

Förderkennzeichen: 20W1717C

**INATA**  
**„Systeme zur automatisierten Auftragskontrolle,  
Qualitätssicherung und Aushärtung von  
Luftfahrtdichtstoffen“**

**Abschlussbericht 31.12.2020**

Erstellt von:

Urs Roemer  
Peter Pohl

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2018 – 31.03.2021

Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung  
Fraunhofer-Projektgruppe FFM  
Ottenbecker Damm 12  
21684 Stade

Stade, den 31.12.2020

## Inhaltsverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Zusammenfassung .....   | 3  |
| 1.1 | Zusammenfassung der wissenschaftlichen & technischen Ergebnisse ..... | 3  |
| 2   | Technischer Ergebnisbericht .....                                     | 4  |
| 2.1 | AP 1: Anwendungsfälle und Lösungsvorschläge .....                     | 4  |
| 2.2 | AP 2: Materialvorbehandlung .....                                     | 6  |
| 2.3 | AP 3: Applikation und Qualitätssicherung .....                        | 23 |
| 2.4 | AP 6: Validierung & Test .....  | 44 |
| 3   | Verzeichnisse .....   | 46 |
| 3.1 | Abbildungsverzeichnis .....   | 46 |
| 4   | Durchführende Forschungsstelle .....                                  | 47 |

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Zusammenfassung der wissenschaftlichen & technischen Ergebnisse

Im Projekt INATA wurden die Arbeiten im Verbundvorhaben zunächst in Arbeitspakete aufgeteilt und anschließend gemäß des Projektplans bearbeitet und ausgewertet. In diesem Abschnitt des Berichts werden die erzielten Ergebnisse im Überblick vorgestellt, während eine detaillierte Beschreibung der erfolgten Tätigkeiten in Kapitel 2 „Technischer Ergebnisbericht“ zu finden ist.

Im Arbeitspaket 1 „Anwendungsfälle und Lösungsvorschläge“ wurden:

- die verschiedenen Anwendungsfälle anhand geeigneter Kriterien definiert und bewertet
- die Anforderungen an ein Probestück definiert

Im Arbeitspaket 2 „Materialvorbehandlung“ wurden:

- Umweltparameter mit Einfluss auf die Aushärtezyklen identifiziert
- optische Messtechnik zur Überprüfung der Mischqualität erprobt
- Dichte- und Viskositätsmessungen der Dichtstoffkomponenten durchgeführt
- Die Materialuntersuchungen der Dichtstoffe, die Erprobung der Einsatztauglichkeit dynamischer Mischer in Kombination mit Dichtmassen und die Mischtauglichkeitsuntersuchungen abgeschlossen.

Im Arbeitspaket 3 „Applikation und Qualitätssicherung“ wurden:

- Probenkörper mit künstlich eingebrachten Lufteinschlüssen entworfen und angefertigt
- verschiedene Technologien zur Detektion von Lufteinschlüssen im Dichtstoff einer Machbarkeitsprüfung unterzogen
- Versuche zur beschleunigten Aushärtung durchgeführt
- eine Bewertung der technologisch machbaren Verfahren zur Luftblasendetektion vorgenommen
- ein Technologiescreening für eine Anwesenheitskontrolle der Dichtstoffnähte durchgeführt
- ein Prototypisches System zur QS mit Hilfe von aktiver Thermografie aufgebaut

Im Arbeitspaket 6 „Validierung / Test“ wurden:

- eine Validierungsplattform am Fraunhofer IFAM aufgebaut
- der Laborprototyp in eine Automatisierungsumgebung übertragen und erprobt

## 2 Technischer Ergebnisbericht

Nachfolgend werden die bearbeiteten Arbeitspakete beschrieben und die Tätigkeiten detailliert dargestellt.

### 2.1 AP 1: Anwendungsfälle und Lösungsvorschläge

Für das Arbeitspaket der Anwendungsfälle und Lösungsvorschläge sollen sämtliche Anwendungssituationen gesammelt werden. Hierzu gehören die verschiedenen denkbaren Baugruppen an denen Sealinganwendungen durchgeführt werden. Auch sollen die Vor- und Nachbereitenden Arbeitsschritte für die aufzustellenden Lösungsvorschläge berücksichtigt werden.

#### 2.1.1 AP1.1: Anwendungsfälle

Im Bereich des Sealings von Flugzeugstrukturen werden verschiedene Anwendungsfälle unterschieden. Generell betrifft das Sealing immer mögliche Korrosionsstellen in der Flugzeugstruktur. Neben gut zugänglichen Bereichen gibt es auf Grund der differentialbauweise durch Stringer, Spante und Rippen auf Hautfeldern eine Vielzahl von Schnittstellen und Unzugänglichkeiten. Innerhalb dieses Arbeitspakets soll, voran getrieben durch den Endanwender, die gesamte Vielfalt an unterschiedlichen Abdichtarbeiten erfasst und bewertet werden. Das Fraunhofer IFAM hat parallel begonnen auf Basis von eigenen Erfahrungen herausfordernde Anwendungsszenarien heraus zu arbeiten um diese in einem geplanten Workshop mit allen Verbundteilnehmern gegenüberzustellen und zu bewerten. Daraufhin wird im folgenden Berichtszeitraum eine Auswahl und Definition der Anwendungsfälle erfolgen.

#### 2.1.2 AP1.2: Lösungsvorschläge

Die Arbeitspakete in Verantwortlichkeit des Fraunhofer IFAM umfassen die Materialvorbehandlung, sowie Applikation und Qualitätssicherung. Die im Bereich der Qualitätssicherung zentrale Zielstellung ist die Integration eines Systems zur Luftblasenerkennung in den Dosierprozess. Hierzu wird bereits in der Anlaufphase des Vorhabens verfügbare Technologien recherchiert und zusammengestellt um daraufhin in einem strukturierten Auswahlverfahren Lösungsvorschläge erarbeitet, aus denen die hinsichtlich der Qualität der Luftblasendetektion und anwendungsfallbezogener Randbedingungen die bestgeeignete Variante ermittelt und umgesetzt werden soll. Dabei findet das Prinzip des filternden Trichters (Abbildung 1) Anwendung.

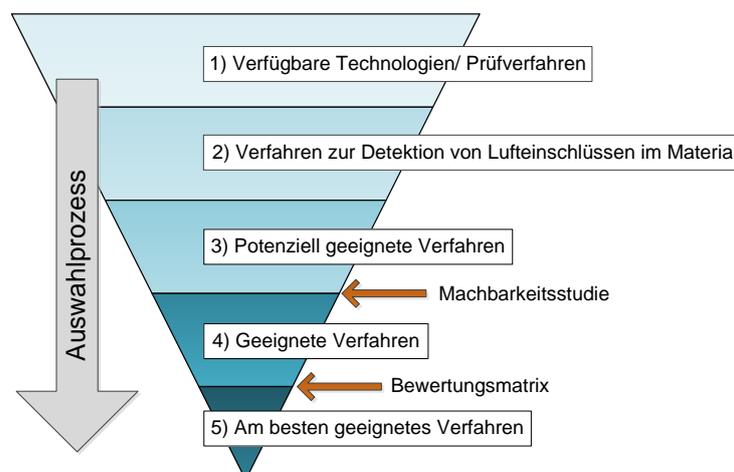


Abbildung 1: Struktur des Auswahlprozesses nach dem filternden Trichter.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten Lufteinschlüsse im Dichtstoff zu detektieren: Zum einen ist eine Inline-Kontrolle denkbar, bei der die Luftblasen im flüssigen Dichtstoff mittels einer geeigneten Sensorik im Dosiersystem erkannt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer nachgelagerten Kontrolle, bei der Lufteinschlüsse in der applizierten Dichtstoffraupe detektiert werden.

Im Fall der Inline-Kontrolle ist ein durchströmter Sensor angedacht, welcher, idealerweise anhand eines binären Signals, das Auftreten von Luftblasen indiziert. Durch eine ventilgesteuerte Schnittstelle wird das mit fehlerbehaftete Volumen des Dichtstoffs anschließend ausgeleitet und somit noch vor dem Auftrag des Dichtstoffs auf die Struktur dem Prozess entnommen. Die Inline-Kontrolle kann nur im Dosiersystem selbst entstandene Luftblasen erkennen und unschädlich machen. Das Auftreten von eventuellen Lufteinschlüssen und Hohlräumen, die unmittelbar beim Dichtstoffauftrag am Düsenaustritt entstehen, ist mit einer Inline-Sensorik nicht detektierbar und muss gegebenenfalls im Rahmen einer nachgelagerten Kontrolle geprüft werden. Folgende Sensorprinzipien werden für die Inline-Kontrolle als potenziell geeignet eingestuft (entspricht dritter Ebene des filternden Trichters):

- **Optische Sensoren:** Dieses Messverfahren nutzt eine Lichtquelle und einen gegenüberliegenden photoelektrischen Sensor. Tritt im durchströmten Querschnitt des Sensors eine Luftblase auf, so registriert der Sensor in diesem Bereich eine höhere Ausgangsspannung, weil die Blase die Lichtdurchlässigkeit lokal erhöht. Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Sensor-Typs ist ein Mindestmaß an optischer Transparenz des betrachteten Strömungsmediums. Wenn selbst dünne Schichten des Fluids annähernd intransparent sind, ist dieses Messprinzip nicht anwendbar.
- **Ultraschall-Sensoren:** Das Messprinzip eines Ultraschall-Durchflusssensors basiert auf der Durchschallung des strömenden Fluids. Die von einem Sender ausgehenden Schallimpulse werden beim Auftreten von Luftblasen am Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Medium teilweise reflektiert, was vom Empfänger registriert wird. In der Regel kommt hier das Durchschallungsverfahren zu Einsatz. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist akustische Transparenz des Strömungsmediums. Haupteinsatzgebiet solcher Sensoren ist die Transfusionsmedizin.
- **Drucksensoren:** Drucksensoren existieren in vielen verschiedenen Formen und Ausführungen. Eine Detektion von Luftblasen in strömenden Fluiden beruht auf der Beobachtung, dass sich ihr Auftreten in einer Strömung in Form einer Druckschwankung bemerkbar macht, die von dem Sensor erfasst wird.
- **Thermische Sensoren:** Entlang der Strömungsrichtung des Fluids ist ein Heizelement mittig zwischen zwei Temperaturfühlern angeordnet. Steht das Fluid, stellt sich an beiden Temperaturfühlern dieselbe Temperatur ein. Wird der Sensor aber durchströmt, stellt sich zwischen beiden Messpunkten ein Temperaturgradient ein, der Rückschlüsse auf die Strömungsrichtung und, nach erfolgter Kalibrierung, auf die Strömungsgeschwindigkeit zulässt. Luftblasen im Fluid könnten so als lokale Ausschläge des Gradienten sichtbar gemacht werden.
- **Kapazitive Sensorik:** Analog zum Plattenkondensator wird bei diesem Sensortyp zwischen zwei Elektroden ein elektrisches Feld aufgebaut. Die Stärke dieses Feldes ist abhängig von der Dielektrizitätszahl des Materials (Dielektrikum), das sich zwischen den Elektroden befindet. Werden die Elektroden auf gegenüberliegenden Seiten einer Strömung angeordnet, so fungiert das strömende Fluid als Dielektrikum. Wenn sich nun eine Luftblase im Fluid zwischen den Elektroden befindet, ändert sich die Kapazität des Kondensators.

- **Magnetisch-induktive Sensorik:** Dieses Messprinzip ist nur bei elektrisch leitfähigen Fluiden anwendbar. Von außen wird an einem durchflossenen Rohr senkrecht zur Flussrichtung ein Magnetfeld angelegt. Dieses erzeugt eine Ladungstrennung innerhalb der Strömung, welche mit entsprechenden Messelektroden erfasst werden kann und Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit und eventuelle Luftblasen erlaubt.

Im Fall der nachgelagerten Kontrolle ist eine zerstörungsfreie Prüfung der bereits applizierten Sealings vorgesehen. Dabei sollen die Siegelnähte nach Möglichkeit berührungsfrei und vollautomatisch hinsichtlich auftretender Lufteinschlüsse geprüft werden. Im Sinne einer modularisierten Produktion wird angestrebt, das entsprechende Prüfverfahren in einem Endeffektor umzusetzen, der von einem Industrieroboter geführt wird, mit dem auch die Sealing appliziert werden. Zur Kontrolle der applizierten Nähte wurden folgende zerstörungsfreie Prüfverfahren als potenziell geeignet eingestuft (entspricht dritter Ebene des filternden Trichters):

- **Ultraschallprüfung (ggf. koppelmittelfreies Verfahren)**
- **Thermografische Prüfung (aktiv)**
- **Durchstrahlungsprüfung**
- **Mikrowellenprüfung**

Die technologische Machbarkeit der genannten Sensorprinzipien (Inline-Kontrolle) und der zerstörungsfreien Prüfverfahren (nachgelagerte Kontrolle) wird im weiteren Verlauf des Projekts anhand geeigneter Versuche ermittelt. Dazu werden Proben und Prüfkörper konzeptioniert, an denen in einem ersten Schritt die qualitative Eignung der verschiedenen Verfahren für den speziellen Anwendungsfall getestet wird. Darauf aufbauend folgt eine ausführliche Versuchsreihe der geeigneten Verfahren (entspricht vierter Ebene des filternden Trichters), in welcher die betrachteten Prüfmethoden quantitativ beurteilt werden sollen. Dabei ist vor allem die Information von Interesse, bis zu welcher minimalen Größe die Luftblasen zuverlässig detektiert werden können. Anschließend wird eine auf den Ergebnissen der Versuche aufbauende Technologiebewertung vorgenommen, in der die in einem Lastenheft zusammengefassten Anforderungen der Projektpartner an das System Berücksichtigung finden. Das Ziel ist die Ermittlung des unter den gegebenen Randbedingungen am besten geeignete Verfahren, auf dessen Grundlage ein Technologiedemonstrator aufgebaut werden soll.

## **2.2 AP 2: Materialvorbehandlung**

### **2.2.1 AP 2.1: Materialeigenschaften**

Der Einfluss der Umweltparameter auf die Aushärtezyklen ist vordergründig durch Temperatur und Luftfeuchtigkeit bestimmt. In einem ersten Schritt wurden die erforderlichen Grundlagen ermittelt. Die entsprechende Prozessspezifikation beschreibt die zulässigen Bereiche von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit bei der Verarbeitung von Dichtstoffen auf Polysulfidbasis. Vom Verbundpartner wurden die jahreszeitlich schwankenden Umweltbedingungen in der Produktion aufgezeichnet und dem Fraunhofer IFAM zur Verfügung gestellt. Diese Werte bilden die Grundlage für einen Versuchsplan, welcher die vorgesehenen Versuchsreihen definiert. Dabei sollen die klebfreie Zeit und die Härtingszeit unter variablen Bedingungen ermittelt werden. Bei der Bestimmung der sich im Verlauf der Topfzeit verändernden Materialeigenschaften ist vor allem die Viskosität von dosiertechnischer Bedeutung. Während der Aushärtungsreaktion des Dichtstoffs nimmt die Visko-

sität des Materials stetig zu. Zur Gewährleistung der erforderlichen Prozesssicherheit in einem automatisierten Dosier- und Auftragsverfahren sind genaue Kenntnisse über solche Zusammenhänge essenziell. Es ist geplant, für projektrelevante Dichtstoffe mithilfe eines Viskosimeters Kennlinien zu ermitteln, welche den zeitlichen Verlauf der Viskosität vom Mischen bis zum Erreichen der Topfzeit darstellen und handhabbar machen sollen.

Zur Bestimmung der sich im Verlauf der Topfzeit verändernden Materialeigenschaften wurden zunächst die Viskosität und Dichte der Basiskomponente des Dichtstoffs untersucht. Die im Datenblatt des Herstellers aufgeführten Werte für die Viskosität sind nicht reproduzierbar. Angegeben sind relative Viskositätswerte, die aufgrund unvollständiger Ausweisung der Messbedingungen wenig aussagekräftig sind. Eigene Messungen relativer Viskosität unter kontrollierten Messbedingungen sind mit ausreichender Präzision wiederholbar. Es deutet sich thixotropes Materialverhalten an, welches näher untersucht werden muss. Im Datenblatt des Herstellers ist die Basiskomponente nicht als thixotropes Fluid ausgewiesen.

Um veränderliche Umweltparameter beim Mischen und Applizieren des Dichtstoffes zu kompensieren, ist eine Bestimmung der Dichte und der temperaturabhängigen Volumendehnung von Vorteil. Es wurde eine einfache und ausreichend präzise Methode - zunächst an der Basiskomponente - erprobt, um die Dichte direkt an der Applizierstrecke stichprobenartig zu ermitteln. Mit der noch zu bestimmenden Kennlinie für die thermische Volumendehnung lassen sich Dichtewerte bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen miteinander vergleichen.

Geplant war die Ermittlung der Kennwerte für Viskosität und Dichte zunächst für die Härter-Komponente und anschließend der Kennwerte für Viskosität - über die gesamte Topfzeit - für den durchmischten Dichtstoff.

Untersucht wurde die Dichte sowie die Ruheviskositäten beider Komponenten des Dichtstoffes Naf-toseal MC-780 B-2. Um genauere Kenntnis über das vermutete thixotrope Verhalten der Dichtstoffkomponenten zu erlangen, wurden mittels „3-Intervals-Thixotropy-Test“ (3ITT) bei kontrollierten Schergeschwindigkeiten (CSR mode) die Relaxationskurven der einzelnen Komponenten näherungsweise bestimmt.

- Dichte:

Die Dichte der Komponenten wurde mit dem Pyknometer-Verfahren bestimmt und ergab sich für die Härter-Komponente zu:

$$\rho = 1,72 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3 \text{ (bzw. } \pm 1,49 \text{ \%)} \text{ bei } T = 19^\circ\text{C}$$

und für die Basis-Komponente zu:

$$\rho = 1,15 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3 \text{ (bzw. } \pm 1,17 \text{ \%)} \text{ bei } T = 20^\circ\text{C}$$

Mit den geplanten Untersuchungen zum Mischungsverhältnis der Dichtstoffkomponenten wird sich zeigen, ob mit diesem vereinfachten Verfahren die Wiederholgenauigkeit für den Einsatz an der Dosieranlage ausreichend ist.

- Ruheviskosität:

Da sich die Viskositätsangaben des Herstellers nicht reproduzieren lassen, zum einen, weil die Messbedingungen nicht vollständig angegeben sind und zum anderen die angegebene Rotationsgeschwindigkeit der Messung oberhalb der Rotationsgeschwindigkeit liegt, bei der das Material kein thixotropes Verhalten zeigt (kritische Scherspannung), wurde zunächst die Rotationsgeschwindigkeit zur Messung der Ruheviskosität bestimmt. Bei der Härter-Komponente liegt diese bei ca. 0,25

U/min, bei der Basis-Komponente bei 0,4 U/min. Sondierungsversuche, d.h. Versuche ohne statistische Signifikanz, ergaben eine dynamische Viskosität von  $26.1000 \pm 24.066$  mPas (bzw.  $\pm 9,2$  %) und von  $3.876.000 \pm 263.211$  mPas (bzw.  $\pm 6,8$  %) der Basis-Komponente bei jeweils 18°C. Nachfolgend sind die Messbedingungen aufgeführt.

ISO 2555

Methode: Brookfield

Spindel: Härter: R3 | Basis: R7

Becherglas (in mL): 600

Schutzbügel: nein

Probe: Naftoseal MC 780-B2 Härter und Basis

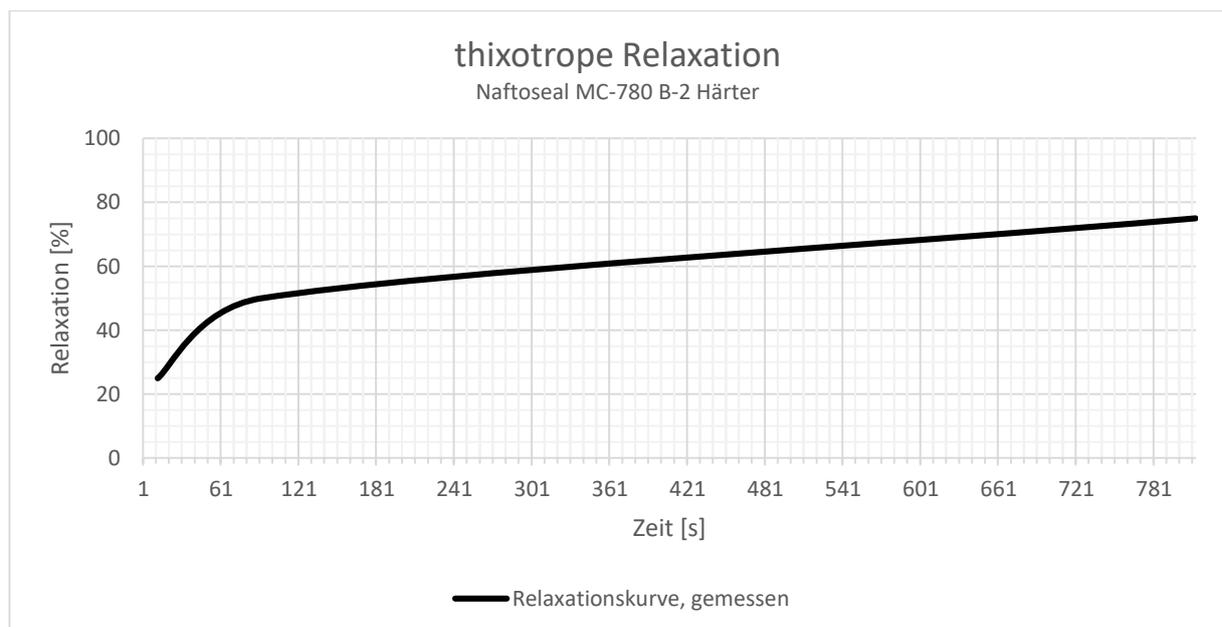
Batch: 19330969

Herkunft: Fass

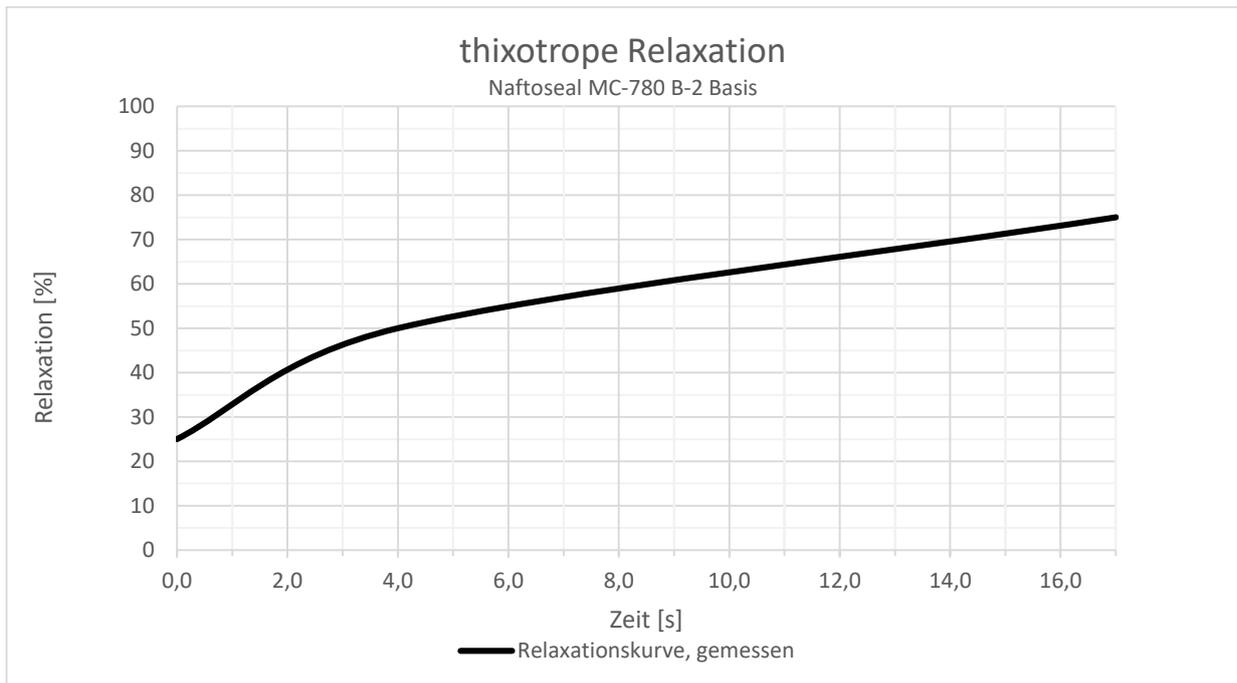
- Thixotrope Relaxationskurven:

Mit dem „3-Intervals-Thixotropy-Test“ wird das thixotrope Verhalten, insbesondere das Relaxationsverhalten nach Strukturdegradation, untersucht. Zunächst wird die dynamische Ruheviskosität bestimmt. Im Ruhezustand findet noch keine bzw. eine nur sehr geringe Strukturdegradation statt. Da zur Messung eine sehr geringe Rotationsgeschwindigkeit benötigt wird, zeigt sich bereits strukturviskoses Materialverhalten, welches für dieses Verfahren jedoch unerheblich ist. Für die Strukturdegradation wurde im zweiten Intervall eine um den Faktor 20 erhöhte Rotationsgeschwindigkeit eingestellt. Im dritten Intervall, bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit wie im ersten Intervall, kann nun die benötigte Zeit zum Erreichen vorher festgelegter Relaxationsniveaus (25%, 50% und 75%) bestimmt werden. Das Relaxationsverhalten folgt dabei näherungsweise einer logarithmischen Funktion.

Die Untersuchung für die Härter-Komponente ergab, dass sich nach ca. 15 Sekunden 25% der dynamischen Ruheviskosität wiedereingestellt haben. Nach ca. 90 Sekunden ist das zweite Relaxationsniveau (50%) erreicht und nach insgesamt 13 Minuten das dritte Relaxationsniveau (75%).



Bei der wesentlich hochviskoserer Basiskomponente sind die 25%- und 50%-Niveaus nach bereits einer und 4 Sekunden erreicht, nach 18 Sekunden das dritte.



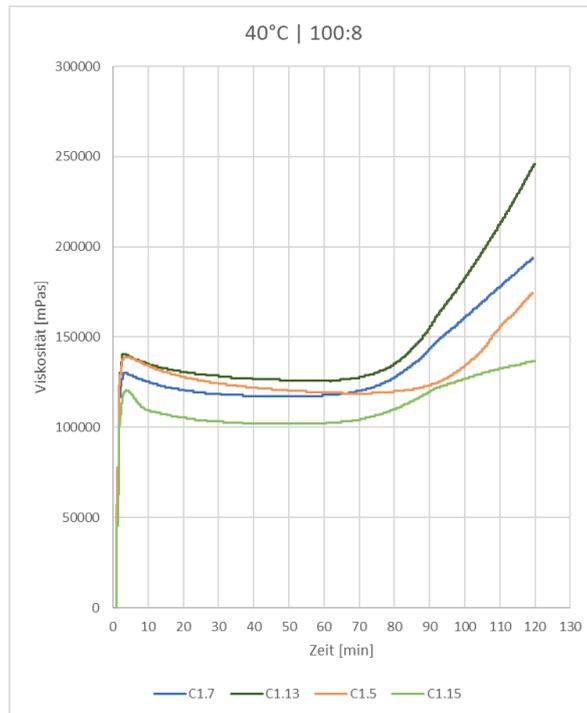
Geplant ist die Ermittlung der Kennwerte für die dynamische Viskosität über die gesamte Topfzeit für den durchmischten Dichtstoff.

In einem ersten Schritt wird vorbereitend der dynamische Mischer befüllt und solange durchspült, bis ein homogene Durchmischung vermutet werden kann und Restmaterial vorheriger Versuche entlang der Förderstrecke verdrängt wurde. Damit ist sichergestellt, dass für den Versuch die temperierte Probe appliziert wird. Dieser Spülvorgang ist der mit Abstand größte Posten für Materialaufwendung. Zur Ermittlung der Dosiergenauigkeit, insbesondere da volumetrisch dosierende Systeme den Einfluss thermisch expandierten Materials nicht erfassen können, wird in einem zweiten Schritt ausgelitert, anschließend gewogen und mit den Soll-Werten verglichen. Des Weiteren werden hier die Materialdrücke entlang der Förderstrecke protokolliert. Zur Veranschaulichung der Dosiergenauigkeit wird eine definierte aerodynamische Naht appliziert (Abbildung 2).



**Abbildung 2: aerodynamische Naht**

Im dritten Schritt wird ein Schmetterlingstest zur Überprüfung und Erfassung der Durchmischung in Abhängigkeit der zu variierenden Parameter durchgeführt. Die Drehzahl des dynamischen Mixers und die Austragsleistung werden hier als maßgebend angenommen, sekundäre Einflüsse sind jedoch möglich.



**Abbildung 3: Viskositätsmessdaten von einer MC780-C2 Messreihe.**

Das Standverhalten wird im letzten Schritt bestimmt. Dazu wird eine Raupe auf eine Probenplatte in vertikaler Ausrichtung appliziert. Nach 2h bzw. nach dem vollständigen Abbinden des Dichtstoffs, wird das Standverhalten ausgewertet (Abbildung 4). Als Referenz dient dabei die obere Kante der Raupe. Gemessen wird bis zum Maximum der Fließfront. Anfangs- und Endpunkte der Raupe werden ignoriert.



**Abbildung 4: Standtest nach Auswertung 2h.**

Vor und nach einem Versuch wird die Raumtemperatur protokolliert.

Der Versuchsaufbau bestand aus:

1. Dosierendeffektor
2. Spülen
3. Auslitern
4. Aerodynamische Naht
5. Schmetterlingstest
6. Befüllen der Viskosimeter-Probenkammer
7. Standtest

Die Materialeigenschaften der Dichtstoffe Naftoseal MC-780 B-2 und C-2 wurden anwendungsnah durch gleichzeitige Variation der vier Parameter Materialtemperatur ( $T = \{30 \dots 70\}$  °C), Austragsleistung (Volumenstrom,  $\dot{Q} = \{20 \dots 60\}$  ml/min), Drehzahl des dynamischen Mixers (Betriebsdruck,  $p = \{2 \dots 6\}$  bar) und Mischungsverhältnis der Dichtstoffkomponenten ( $X = \{100:8 \dots 100:12\}$ , grav.) ermittelt. Das Einstellen der Parameter und die Applikation des Dichtstoffs für die verschiedenen Versuche erfolgte mit der Dosieranlage *MarMax-122B* der *Mahr Metering Systems GmbH*, gekoppelt mit einem 6-Achs Industrieroboter der *KUKA AG*. Der Versuchsreihe lag ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan nach BOX-HUNTER in fünf Stufen zugrunde. Die Dichtstoffe wurden mit jeweils 31 Versuchen untersucht.

Die Merkmale der untersuchten Dichtstoffe wurden anhand von deskriptiven Analysen bestimmt. Für die stetigen Parameter wurden Mittelwert (M), Standardabweichung (SD) und Spannweite (Minimum und Maximum des Wertebereichs) berechnet (Tabelle 1). Für die diskreten, ordinalskalierten Zielgrößen (Durchmischungsqualität, Hautbildezeit) wurden die absolute und prozentuale Häufigkeit bestimmt (Tabelle 2). Für den Vergleich der Merkmale beider Dichtstoffe wurden die Mittelwertsunterschiede für die stetigen Zielgrößen und die relevanten Kontrollparameter (t-Test für unabhängige Stichproben) sowie die Häufigkeitsunterschiede für die ordinalskalierten Zielgrößen ( $\chi^2$ -Test) berechnet. Die Unterschiede in den stetigen Zielgrößen (fett markiert) waren statistisch signifikant mit  $p \leq 0,001$  und  $p \leq 0,004$  (Abbindezeit). Die Unterschiede in den diskreten, ordinalskalierten Zielgrößen (fett markiert) waren statistisch signifikant mit  $p \leq 0,04$  (Hautbildezeit).

**Tabelle 1: Deskriptive Statistiken der stetigen Parameter für beide Dichtstoffe (N=31)**

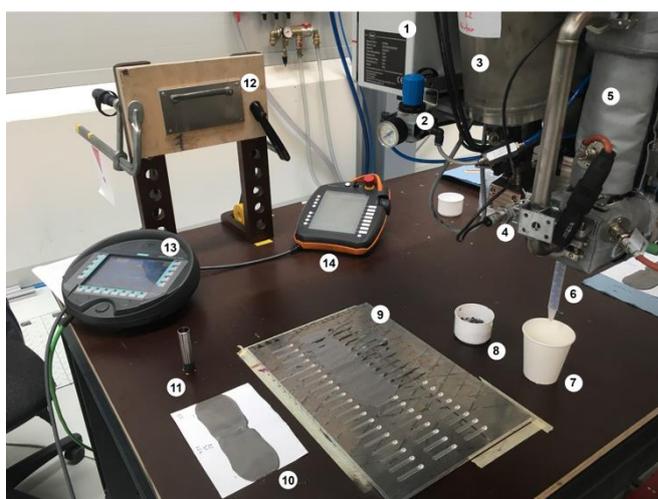
|                                 | Einheit                | MC-780 B-2          |                       | MC-780 C-2           |                     |
|---------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
|                                 |                        | Mittelwert (SD)     | Minimum bis Maximum   | Mittelwert (SD)      | Minimum bis Maximum |
| Einflussgrößen                  |                        |                     |                       |                      |                     |
| Materialtemperatur              | °C                     | 50,7 (9,5)          | 30,3 bis 72,5         | 49,9 (9,0)           | 30,3 bis 70,1       |
| Betriebsdruck des Mixers        | bar                    | 4,0 (0,9)           | 2,0 bis 6,0           | 4,0 (0,9)            | 2,0 bis 6,0         |
| Härter-Anteil (vol.)            | $\frac{100}{x}$        | 6,20 (0,6)          | 4,96 bis 7,44         | 7,26 (0,7)           | 5,81 bis 8,71       |
| Austragsleistung                | ml · min <sup>-1</sup> | 40,0 (8,9)          | 20,0 bis 60,0         | 40,0 (8,9)           | 20,0 bis 60,0       |
| Zielgrößen                      |                        |                     |                       |                      |                     |
| Dosiergenauigkeit               | relative Abweichung    | <b>0,20 (0,08)</b>  | -0,08 bis 0,32        | <b>0,01 (0,03)</b>   | -0,10 bis 0,08      |
| Standvermögen                   | mm                     | <b>13,4 (1,6)</b>   | 10,0 bis 15,5         | <b>43,1 (6,2)</b>    | 35,0 bis 65,5       |
| Dauer der ersten Reaktionsphase | min                    | <b>31,9 (6,6)</b>   | 15,0 bis 44,0         | <b>67,6 (11,7)</b>   | 36,3 bis 87,0       |
| Topfzeit                        | min                    | <b>108,6 (50,9)</b> | 52,0 bis 307,0        | <b>208,0 (115,5)</b> | 88,4 bis 574,2      |
| Abbindezeit                     | h                      | <b>8,0 (1,9)</b>    | 4,5 bis 14,3          | <b>11,3 (5,4)</b>    | 5,4 bis 35,0        |
| Weitere relevante Parameter     |                        |                     |                       |                      |                     |
| Raumtemperatur                  | °C                     | 21,8 (0,8)          | 20,8 bis 24,1         | 22,8 (1,3)           | 20,8 bis 26,8       |
| Appliziertemperatur             | °C                     | 26,8 (2,0)          | 24,2 bis 32,8         | 25,7 (2,1)           | 22,5 bis 31,1       |
| Vorlaufzeit                     | s                      | 5,2 (0,0)           | n. z.                 | 1,8 (0,5)            | 0,9 bis 3,3         |
| Mischgeschwindigkeit            | 1 · min <sup>-1</sup>  | 159 (32)            | 81 bis 221            | 197 (34)             | 133 bis 276         |
| Anfangsviskosität               | mPa · s                | 961 613 (89 746)    | 754 000 bis 1 130 000 | 114 516 (12 260)     | 82 667 bis 140 667  |

**Tabelle 2: Häufigkeitstabelle für die diskreten Parameter beider Dichtstoffe**

|                                 | MC-780 B-2 |    | MC-780 C-2 |    |
|---------------------------------|------------|----|------------|----|
|                                 | Häufigkeit | %  | Häufigkeit | %  |
| Durchmischung <sup>1</sup>      | N = 31     |    | N = 30     |    |
| keine Schlieren                 | 10         | 32 | 13         | 43 |
| wenige kaum sichtbare Schlieren | 5          | 16 | 5          | 17 |
| einige kaum sichtbare Schlieren | 5          | 16 | 7          | 23 |
| wenige sichtbare Schlieren      | 6          | 19 | 3          | 10 |
| einige sichtbare Schlieren      | 3          | 10 | 3          | 7  |
| viele sichtbare Schlieren       | 2          | 7  | 0          | 0  |
| Hautbildungszeit                | N = 31     |    | N = 30     |    |
| 0 bis ≤ 2 h                     | <b>3</b>   | 10 | <b>0</b>   | 0  |
| > 2 bis ≤ 4 h                   | <b>19</b>  | 61 | <b>9</b>   | 30 |
| > 4 bis ≤ 6 h                   | <b>9</b>   | 29 | <b>13</b>  | 43 |
| > 6 bis ≤ 8 h                   | <b>0</b>   | 0  | <b>6</b>   | 20 |
| > 8 bis ≤ 10 h                  | <b>0</b>   | 0  | <b>2</b>   | 7  |

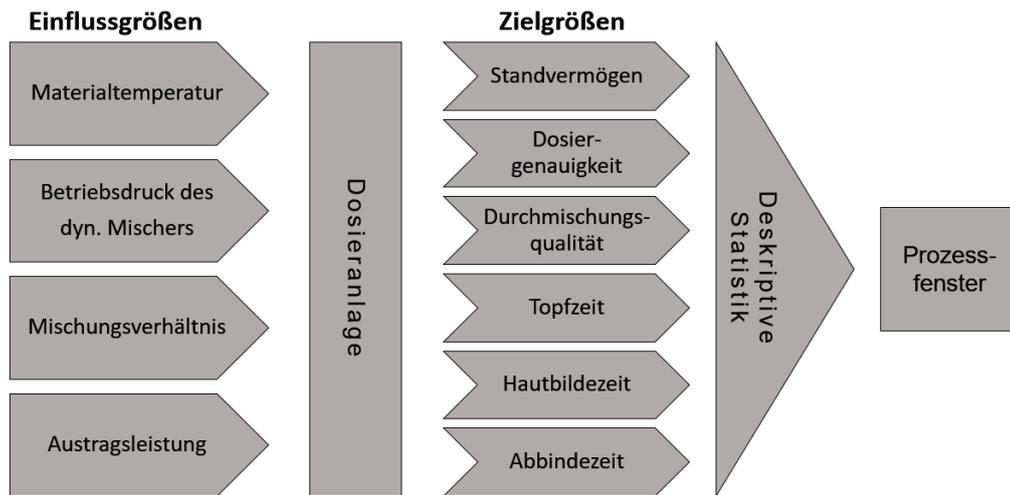
Die Auswahl der Versuche (Einstellungstufen) erfolgte auf der Grundlage des statistischen Versuchsplans zufällig. Die Versuche mit beiden Dichtstoffen wurden unabhängig voneinander durchgeführt, so dass die Merkmale des einen Dichtstoffs keinen Einfluss auf die Merkmale des jeweils anderen Dichtstoffs hatten. Die Normalverteilung der untersuchten Parameter wurde visuell anhand von Histogrammen überprüft. Mithilfe des LEVENE-Tests wurde auf Varianzhomogenität geprüft. Bei ungleichen Varianzen wurde der t-Test mit der WELCH-Korrektur berechnet.

Für alle statistischen Tests wurde ein zweiseitiges Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  festgelegt und die 95 %-Konfidenzintervalle (95%CI) berichtet. Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen den Versuchsaufbau und den schematischen Versuchsablauf.



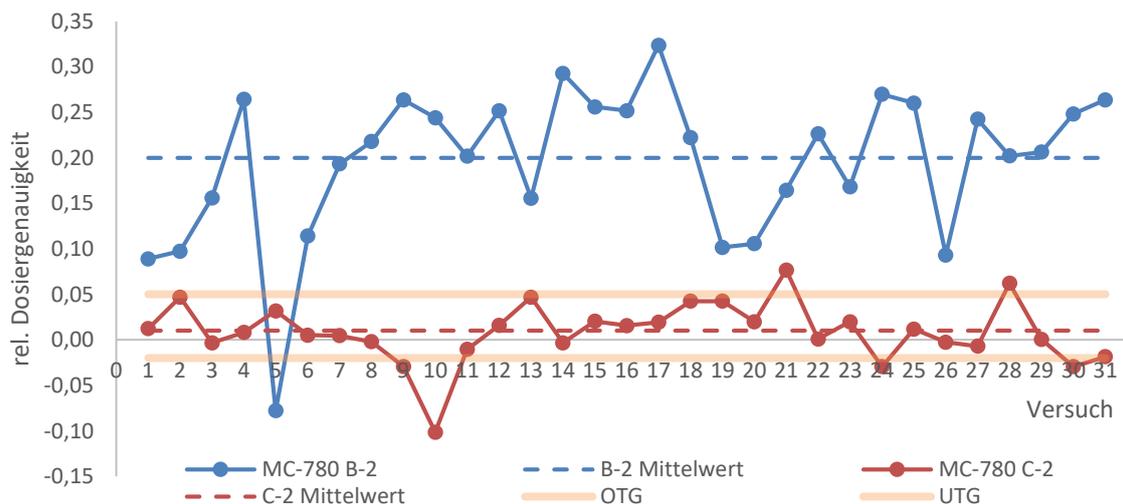
- 1: Schaltschrank Dosieranlage
- 2: Druckminderer für dynamischen Mischer
- 3: Behälter für Härter-Komponente
- 4: Lasersensor zur Drehzahlmessung
- 5: Heizmanschette der Förderpumpe
- 6: Dynamischer Mischer
- 7: Station 1: Spülen
- 8: Station 2: Auslitern
- 9: Station 3: aerodynamische Naht
- 10: Station 4: Schmetterlingstest
- 11: Station 5: Viskosimeter
- 12: Station 6: Standtest
- 13: Control-Panel der Dosieranlage
- 14: Control-Panel des Roboters

**Abbildung 5: Versuchsaufbau**



**Abbildung 6: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufs**

Die Dosiergenauigkeit wurde durch Auslitern einer definierten Menge Dichtstoff und dem anschließenden Vergleich mit dem Sollwert bestimmt. MC-780 C-2 ließ sich im Mittel innerhalb der Toleranzgrenzen (OTG/UTG) dosieren. Für B-2 konnte eine Mittelwertverschiebung gezeigt werden, die sich durch den Nach- sowie Vorlauf aufgrund von viskoelastischer Druckspeicherung erklären lässt. Für C-2 fiel dieser Nach- und Vorlauf gering aus und ist wenig problematisch. Ein Einfluss der Materialtemperatur auf die Dosiergenauigkeit durch eine thermische Expansion des Materials, die bei volumetrisch dosierenden Anlagen zu Dosierfehlern führen kann, ist nicht zu erkennen. Für die prototypische Dosieranlage ergeben sich damit wichtige Anpassungsmöglichkeiten. Ein druckgesteuertes Sperrventil nahe der Applizierdüse könnte den Nachlauf des Dichtstoffs verhindern und die Notwendigkeit eliminieren, den Vorlauf empirisch zu bestimmen. Somit könnte die Dosiergenauigkeit für B-2 erheblich und für C-2 geringfügig verbessert werden. Abbildung 7 zeigt die relative Dosiergenauigkeit aller Versuche für B-2 und C-2, die Toleranzgrenzen  $\{-0,02; 0,05\}$  sowie den jeweiligen Mittelwert.



**Abbildung 7: rel. Dosiergenauigkeit mit Mittelwerten und Toleranzgrenzen**

Für die Untersuchung des Standvermögens wurde eine Raupe auf eine Probenplatte in vertikaler Ausrichtung appliziert. Nach 2 h wurde das Standverhalten ausgewertet (Abbildung 8). Als Referenz diente dabei die obere Kante der Raupe. Gemessen wurde bis zum Maximum der Fließfront.

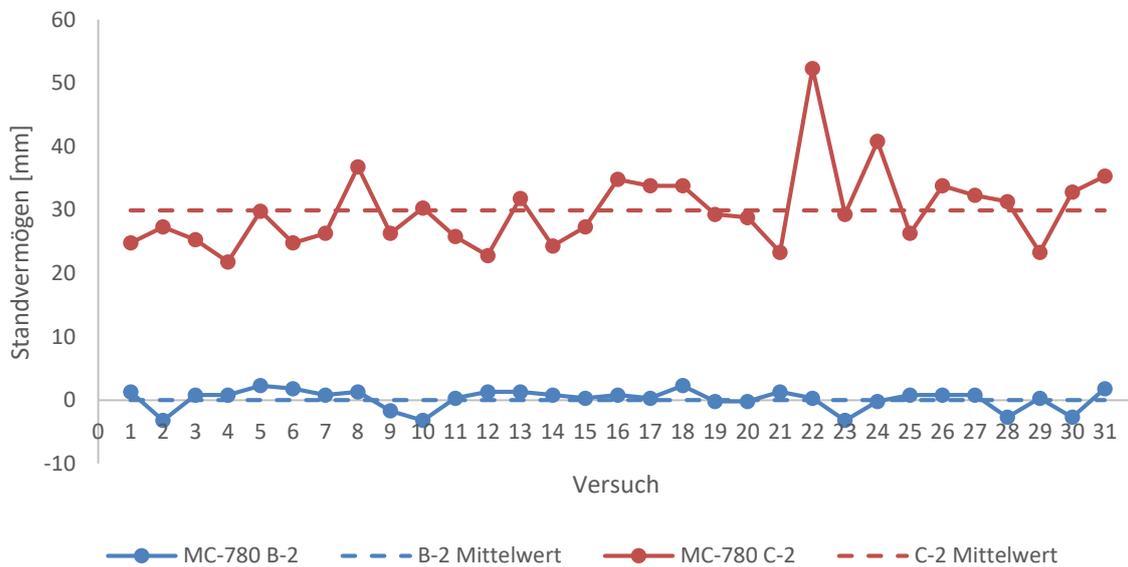
Anfangs- und Endpunkte der Raupe wurden ignoriert. Die Werte für das Standvermögen ergeben sich abzüglich der Raupenbreite (13,4 mm).

**Abbildung 8: Verlaufende Dichtstoffraupe (C-2) nach Applikation**



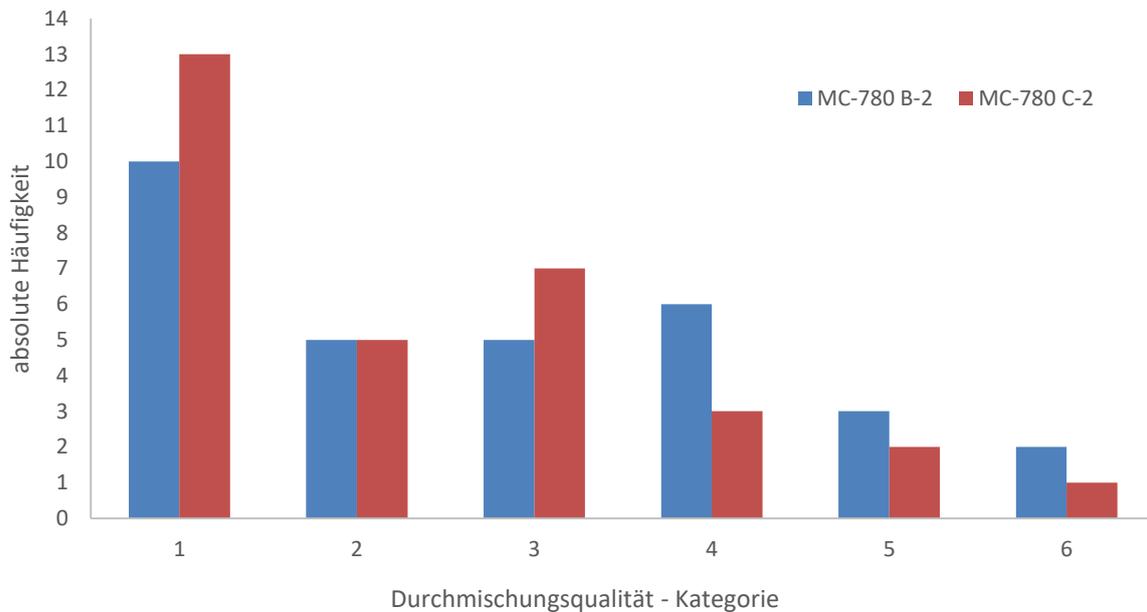
**mit Linien zur Auswertung des Standvermögens**

Bei einem Volumen von ca. 0,05 ml je 1 mm aufgetragener Raupe war B-2 über alle untersuchten Einstellungen standfest. C-2 verlief im Mittel um ca. 30 mm (Abbildung 9) und ist damit im Gegensatz zu B-2 für die Anwendung an geneigten Werkstücken nicht geeignet. Es konnte gezeigt werden, dass weder die Scherverdünnung durch Thixotropie noch die Mischgeschwindigkeit (Drehzahl des dynamischen Mixers) einen erkennbaren Einfluss auf das Standverhalten haben.



**Abbildung 9: Standvermögen mit Mittelwerten**

Mithilfe eines Schmetterlingstest wurde die Durchmischung überprüft. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die Durchmischungsqualität beider Dichtstoffe nicht signifikant unterscheidet (Abbildung 10) und dass die sehr unterschiedliche Viskosität der beiden Dichtstoffe keinen Einfluss auf die Durchmischungsqualität hat. Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass eine geringe Austragsleistung sowie eine hohe Mischgeschwindigkeit die Qualität der Durchmischung positiv beeinflussen. Das bedeutet, dass die maximal mögliche Mischgeschwindigkeit und eine möglichst kleine Austragsleistung gewählt werden sollten, um die bestmögliche Durchmischungsqualität zu erzielen.



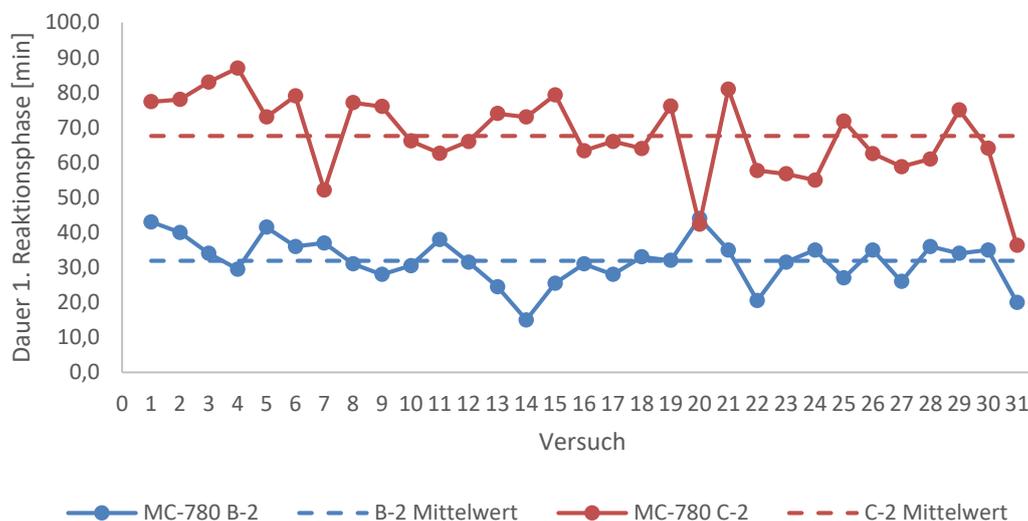
**Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Durchmischungsqualität (diskret)**

*Anmerkung: Kategorien für die Durchmischung (von 1 bis 6): keine Schlieren, wenige kaum sichtbare Schlieren, einige kaum sichtbare Schlieren, wenige sichtbare Schlieren, einige sichtbare Schlieren, viele sichtbare Schlieren.*

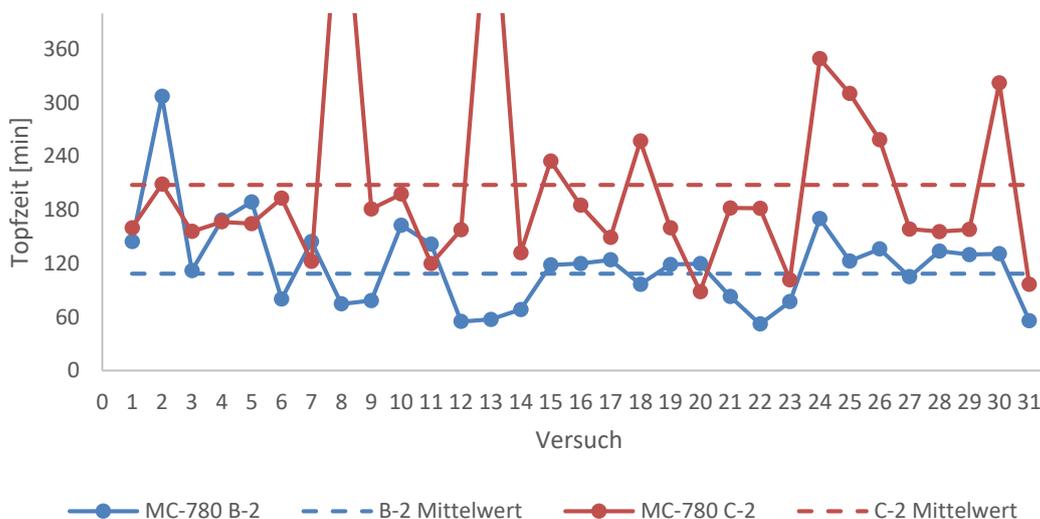
Um den Einfluss der Parameter, insbesondere Materialtemperatur und Mischungsverhältnis der Komponenten, auf die Abbindereaktion zu ermitteln wurde eine Messung der dynamischen Viskosität über die gesamte Topfzeit durchgeführt. Dabei ist die Menge des benötigten Probenmaterials durch das verwendete Low-Volume Messsystem mit 10,4 ml bzw. 13,5 ml je Messung und unter 350 ml bzw. 450 ml je Dichtstoff und Versuchsreihe gering, verglichen mit den sonst üblichen 500 ml je Messung einfacher Messsysteme. Zusätzlich wurde die Hautbildezeit bestimmt und anschließend eine Messung der Shore-A Härte durchgeführt. Damit wurden weitere Kenntnisse zum Verlauf der Abbindereaktion über die Topfzeit hinaus erlangt. Insbesondere das Mischungsverhältnis der Komponenten kann einen erheblichen Einfluss auf die Endhärte des Dichtstoffs haben.

Die erste Phase der Abbindereaktion hat eine große Bedeutung für die automatisierte Verarbeitung der Dichtstoffe, da in dieser Zeit die Viskosität nahezu konstant bleibt. Wird der Dichtstoff innerhalb dieser Zeit ausgetragen, ist das Standvermögen vorhersagbar und eine ausreichende Benetzung des Substrats gewährleistet. Da die Temperatur theoretisch einen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit hat, kann der Dichtstoff mit den Vorgaben des Datenblatts appliziert werden und anschließend, mit Beginn der zweiten Reaktionsphase, durch externe Wärmezufuhr beschleunigt abgebunden werden, ohne dass bspw. die Temperatur das Standverhalten beeinflussen kann. Für C-2 war die erste Reaktionsphase mit rund 68 Minuten mehr als doppelt so lang wie für B-2 (Abbildung 11). Bei der Topfzeit ist der Zusammenhang zwischen den Dichtstoffen ähnlich. B-2 lag

mit 109 Minuten etwas unterhalb der Angabe des Datenblatts. Für C-2 hingegen betrug diese mit 208 Minuten fast doppelt so viel und liegt weit oberhalb der Angabe des Datenblatts (Abbildung 12). Ein möglicher Grund für diesen signifikanten Unterschied ist, dass erst mit der im Datenblatt für C-2 angegebenen Montagezeit (Assembly Time) das Doppelte der Viskosität erreicht ist und dieser Dichtstoff damit den Anforderungen an seinen Einsatzzweck gerecht wird.



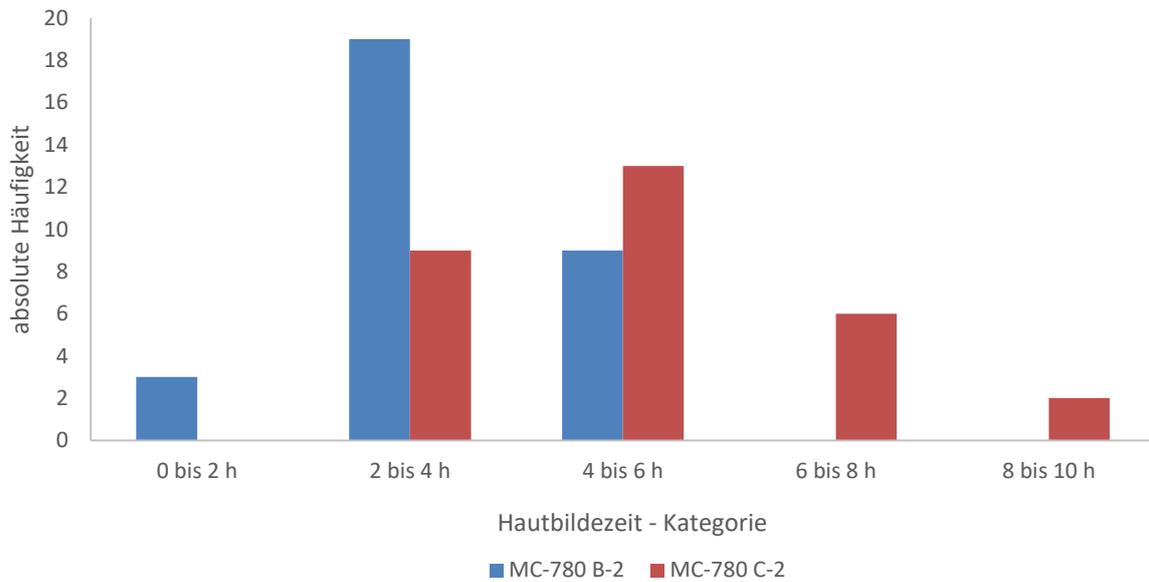
**Abbildung 11: Dauer der ersten Reaktionsphase mit Mittelwert**



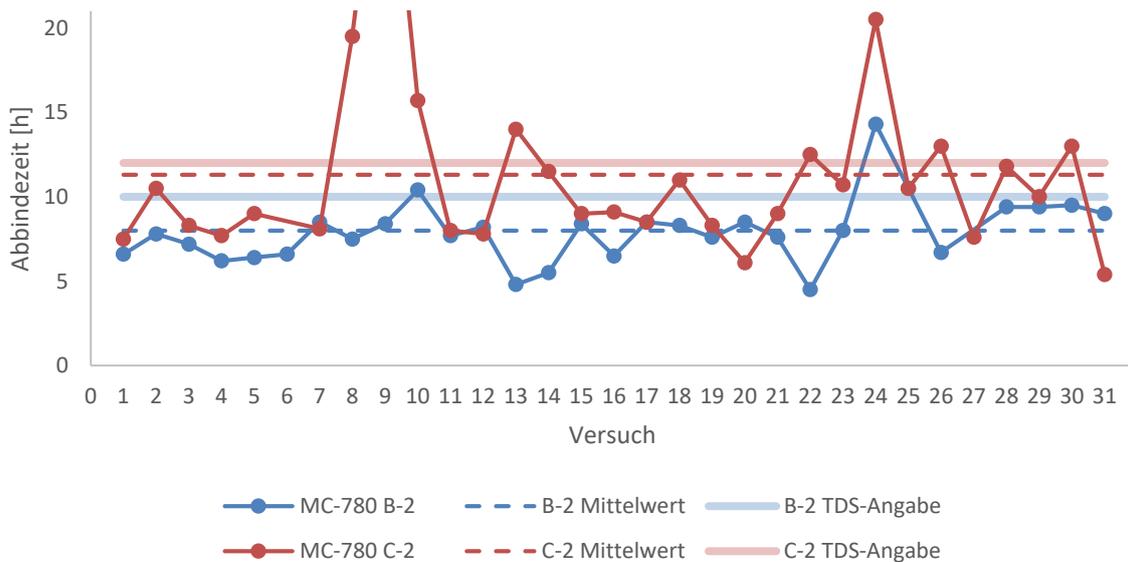
**Abbildung 12: Topfzeit mit Mittelwert**

Mit einem weiteren Test, bei dem überprüft wird, ab wann die Oberfläche des Dichtstoffs klebfrei ist, wurde die Hautbildezeit bestimmt. Die Hautbildezeit gibt den Zeitpunkt an, ab dem ein Werkstück mit dem applizierten Dichtstoff bewegt werden kann, ohne dass das Applikationsbild verändert wird und ist damit ein wichtiges Kriterium für die Verkürzung von prozessbedingten Taktzeiten. Durch diese Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass beide Dichtstoffe die Hautbildezeit nach weniger als sechs (B-2) bzw. weniger als zehn Stunden (C-2) erreichen (Abbildung 13). Darüber hinaus wurde über eine Messung des Härteverlaufs die Abbindezeit bestimmt. Diese lag für B-2 und C-2 mit 8 bzw. 11,3 Stunden leicht unterhalb der im Datenblatt angegebenen Zeiten (Abbildung 14). Damit erfüllt der Applikationsprozess auch durch Variieren der Einflussgrößen die

Vorgaben des Datenblatts. Mit der geringeren Hautbildezeit im Vergleich zur Angabe im Datenblatt ergibt sich damit eine mögliche Taktzeitreduzierung von 40 % bzw. 15 %.



**Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Hautbildezeit (diskret)**



**Abbildung 14: Abbindezeit mit Mittelwert und Datenblattangabe (TDS)**

Das thixotrope Materialverhalten des Dichtstoffs wirkt sich auf die Komponenten in ihren Materialbehältern aus. Je länger das Material ruhte, desto weniger fließfähig wurde es, bis eine Scherbelastung aufgeprägt wurde. Da innerhalb der Behälter keine Scherkräfte, sondern fast ausschließlich Normalkräfte auf das Material wirken, ging dieser Effekt soweit, dass das Material, möglicherweise auch mit oder entgegen dem Einfluss der erhöhten Temperatur, einen gelartigen Zustand einnahm und nicht mehr fließfähig war. Scherkräfte wirken nur in der Nähe des Behälterausflusses, sodass nur ein kleiner Bereich in dessen Nähe fließfähig blieb. War dieses Material ausgetragen, floss keines mehr nach. Wurde der Behälter geöffnet und das Material gerührt, wurde es wieder vollständig fließfähig.

Dieser Effekt birgt ein erhebliches Risiko für den Applikationsprozess, da die Steuerung der Dosieranlage den Materialfluss nicht überwachen kann. Solange der Füllstandssensor suggeriert, dass der Behälter ausreichend gefüllt ist, wird die Steuerung keinen Fehler melden. Geliert beispielsweise die Härterkomponente, wird der Fehler frühestens ersichtlich, wenn das Mischrohr visuell überprüft und eine Veränderung der Farbe des Dichtstoffs festgestellt wird. Jedoch ändert sich die Farbe des Dichtstoffs nicht plötzlich, sondern graduell, sodass Farbänderungen eventuell erst ersichtlich werden, wenn der Dichtstoff bereits appliziert wurde. Dieses Problem kommt so häufig vor, dass hier ein dringender Anpassungsbedarf der Dosiertechnik besteht. Eine Möglichkeit ist es, ein Rührlement in die Materialbehälter zu integrieren, das ein Gelieren zuverlässig verhindert. Eine weitere Möglichkeit ist die Überwachung des Materialflusses durch geeignete Sensoren, oder die Überwachung des Mischrohrs auf farbliche Änderungen durch optische Sensoren. Jedoch wird dadurch nicht die Ursache behoben.

Ein Prozessfenster, in dem die einstellbaren Parameter variiert werden können, sodass die Toleranzgrenzen des Applikationsprozesses an der verwendeten, prototypischen Dosieranlage eingehalten werden, schließt die Materialuntersuchungen ab. Als Grundlage für dieses Prozessfenster dienen die vorherigen Ergebnisse. Für beide Dichtstoffe ist die Empfehlung, die Härterkomponenten in ihren Behältern nicht zu erhitzen, da dies für den Applizierprozess erhebliche Nachteile bringt. Die Grundmassen können für B-2 auf 50 °C und für C-2 auf 40 °C bis 70 °C erwärmt werden, damit die Toleranzgrenzen der Zielgrößen eingehalten werden. Aufgrund reduzierter Lagerstabilität bei hohen Temperaturen und geringem Einfluss auf den Applikationsprozess, wird dies jedoch nicht empfohlen. Für den Betriebsdruck des dynamischen Mixers werden die Toleranzgrenzen ab jeweils 4 bar eingehalten. Der maximale Betriebsdruck von 6 bar ist jedoch einem niedrigeren Druck vorzuziehen. Mischungsverhältnisse von 100 : 8 verlangsamen die Reaktionsgeschwindigkeit so sehr, dass bspw. die obere Toleranzgrenze der Topfzeit erheblich überschritten wird. Dennoch findet auch hier eine Vernetzungsreaktion statt. Für die Dichtstoffe kann ein Mischungsverhältnis (grav.) zwischen 100 : 9 bis 100 : 12 (B-2) bzw. 100 : 11 (C-2) gewählt werden. Für die Austragsleistung gilt: je geringer diese ist, desto besser ist die Qualität der Durchmischung. Die Toleranzgrenzen werden für B-2 bis 40 ml/min bzw. bis 50 ml/min für C-2 eingehalten.

Die Erfassung und Auswertung der Daten für die Dichtstoffe MC-780 B-2 und MC-780 C-2 ist abgeschlossen. Ein kritischer Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen des Verbundpartners wurde durchgeführt. Aus Sicht des Vorhabens wurden die Ziele des AP2.1 erreicht und das Arbeitspaket als abgeschlossen betrachtet.

### 2.2.2 AP 2.2: Mischverfahren

Aus der Kompressibilität heute gängiger Dichtstoffe resultieren bei der Verwendung herkömmlicher Mischer unerwünschte dosiertechnische Effekte, wie beispielsweise verstärktes Nachlaufen. Diese erschweren eine zuverlässige Applikation der Dichtstoffe und stellen eine wesentliche Hürde bei der Automatisierung von Sealing-Prozessen im Luftfahrzeugbau dar. Deshalb sollen im Rahmen dieses Arbeitspakets alternative Mischverfahren erprobt werden, um Erkenntnisse über deren Anwendbarkeit im Luftfahrzeugbau zu gewinnen. Es wurde eine Marktrecherche durchgeführt, um denkbare Mischsysteme zu ermitteln. Dabei wurden unter der Prämisse möglichst geringer Druck- und Scherbeanspruchung der zu mischenden Komponenten sowohl statische, als auch dynamische Mischsysteme in Erwägung gezogen. Gespräche mit verschiedenen Herstellern in Frage kommenden Mischsysteme wurden aufgenommen und folgen dem Ziel, Anwendungspotenziale offenzulegen. Das Ziel einer deutlichen Verringerung der Mischstrecke lässt sich am besten mit dynamischen Mischsystemen erreichen. Die Durchmischung wird im Gegensatz zu Statikmischern durch rotierende Mischelemente sichergestellt. Zur Erprobung sollen unterschiedliche Mischprinzipien an der vorhandenen Dosiertechnik des Fraunhofer IFAM integriert und verglichen werden. Weiterhin wurden erste Vorversuche zur Prüfung der Mischqualität durchgeführt, wobei im Speziellen die Güte der Durchmischung und die Einhaltung des korrekten Mischungsverhältnisses ermittelt werden sollen. Ein optisches System zur Farberkennung befindet sich aktuell in der Erprobung. Als besondere Herausforderung erweist sich hierbei die Herstellung reproduzierbarer Lichtverhältnisse an der Prüfstation. Während Versuche unter Laborbedingungen zu guten Ergebnissen führten, bleibt zu ermitteln, inwieweit sich diese auf die realen Anwendungsfälle übertragen lassen. Parallel dazu sollen weitere potenziell geeignete Systeme hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet werden.

Das in die prototypische Dosieranlage des Fraunhofer IFAM integrierte dynamische Mischsystem wurde in Betrieb genommen und erprobt. In einer Versuchsreihe wurde die Rotationsgeschwindigkeit des Mixers bei unterschiedlichen Volumenströmen variiert und anschließend das Mischbild bewertet. Dabei gelten folgende Grundsätze: Die Drehzahl muss so hoch sein, dass eine zufriedenstellende Durchmischung beider Komponenten gewährleistet ist. Um materialschonend zu dosieren soll die Drehzahl andererseits so gering wie möglich gehalten werden.

Durch die Expansion der kompressiblen Grundmasse nach dem Schließen der Ventile beim Dosierstopp strömt unvermisches Material in den Mischer und wird beim nächsten Dosiervorgang nicht ausreichend durchmischt. Diesem Effekt soll steuerungsseitig durch entsprechende Vor- und Nachlaufzeiten des Mixers entgegengewirkt werden. In weiteren Versuchsreihen sollen unter anderem Nachlaufeffekte bei Anwendung des dynamischen Mixers untersucht werden.

Neben der Integration des dynamischen Mixers in die Dosieranlage des Fraunhofer IFAM konnte im Konsortium ein weiterer potenzieller Anwendungsbereich identifiziert werden. Interfay-Dichtmassen (Klasse C) mit kurzen Topzeiten werden vor allem im Schalenbau in bedeutendem Umfang eingesetzt. Oft werden vom Werker nur kleine Mengen des Dichtstoffs benötigt. Üblicherweise werden die Dichtstoffe jedoch aus Kartuschen dosiert, was dazu führt, dass in diesem Fall ein Großteil des Inhalts einer Kartusche ungenutzt bleibt und entsorgt werden muss. Aus Umwelt- und Kostengründen bietet ein angepasstes Verfahren zur Bereitstellung und Vermischung der Komponenten von Kurzzeitdichtmassen somit erhebliches Optimierungspotenzial.

Die Bereitstellung des Dichtstoffs erfolgt über entsprechend dimensionierte Faspumpen. Aufgrund der kurzen Topzeiten entsprechender Dichtmassen ist jedoch die Verwendung von langen Statikmischern mit hohem Innenvolumen, die nach jeder Dosierung gewechselt werden müssen, wenig sinnvoll. Hier können die dynamischen Mischer einen guten Beitrag leisten, kostenintensive Sonder-

abfälle drastisch zu reduzieren. Das Fraunhofer IFAM hat es sich deshalb zum Ziel gesetzt, die dynamischen Mischsysteme in einem prototypischen Aufbau auch für solche Anwendungsfälle zu erproben. Dazu wird ein Mischblock konstruiert, der über ein Adapter die Montage an einem bestehenden Fördersystem und einen schnellen Wechsel des Mixers ermöglicht.

Es ist ein pneumatischer Antrieb des Mixers vorgesehen. Zudem soll eine Durch eine Modularisierung des Systems ist die Übertragung der Mischeinheit von der Dosieranlage des Fraunhofer IFAM auf gängige stationäre Fördersysteme für Großbinde übertragbar.

Im weiteren Verlauf des Berichtszeitraums wurde der bereits zuvor eingesetzte kompakte dynamisch-statische Mischer in eine neue Aufnahme überführt. Ziel war es hier insbesondere die Verschmutzung durch Leckagen zu reduzieren und den Arbeitsaufwand beim Mischerwechsel erheblich zu reduzieren.

Mit dem aufgebauten System wurden verschiedenen parametrisierte Versuche durchgeführt um genaue Aussagen über die Mischgüte treffen zu können. Zentrales Interesse ist hierbei eine angestrebte Kennlinie aus Materialdurchsatz und Mischergeschwindigkeit um eine qualitativ hochwertige Mischgüte zu erzielen. Die Überprüfung der Mischergebnisse wird hierbei manuell durchgeführt. Mit Hilfe des so genannten Schmetterlingstests wird eine Dichtstoffraupe auf ein Trägerblatt aufgebracht, zusammen gefaltet und homogen im Anschluss verpresst (vgl. Abbildung 15). Durch diese Verteilung können eventuelle Schlieren, in denen Härterbestandteile nicht homogen vermischt wurden sehr gut erkannt werden. Als Referenz für den automatisierten Mischprozess wurde die vom Hersteller abgefüllte Kartuschenlösung heran gezogen. Der mit diesem Material durchgeführte Schmetterlingstest fungiert als Referenzprobe für sämtliche Versuche.



**Abbildung 15: Schmetterlingstest einer vermischten Kartusche als Referenz.**

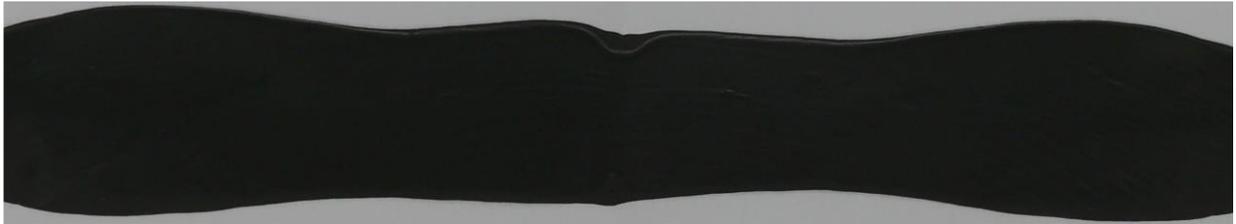
In den durchgeführten Versuchen wurde ein breites Spektrum des Materialdurchsatzes getestet um verschiedene Einsatzszenarien abdecken zu können. In Relation hierzu wurde auch ein breites Spektrum der Mischerumdrehungsgeschwindigkeit beprobt. Wie in Abbildung 16 sichtbar können je nach Parameterauswahl leichte bis deutliche Schlieren auftreten und meist ein klarer Randbereich der Mischergeschwindigkeit definiert werden.



**Abbildung 16: Schmetterlingstest mit unzureichender Durchmischung (Schlierenbildung).**

Mit dem verbesserten dynamisch statischem Mischsystem wurden verschieden parametrisierte Versuche durchgeführt um genaue Aussagen über die Mischgüte treffen zu können.

Im aufgebauten Versuchsstand wurden unterschiedliche Kombinationen aus Materialdurchsatz und Mischerumdrehungsgeschwindigkeit gegeneinander erprobt um eine Kennlinie der optimierten Vermischung zu ermitteln. Nach der erfolgten Mischung wurden die Materialproben mit Hilfe eines Schmetterlingstests (Abbildung 17) beurteilt. Hierbei wird eine Dichtstoffraupe auf ein Trägerblatt aufgebracht, zusammen gefaltet und homogen im Anschluss verpresst.

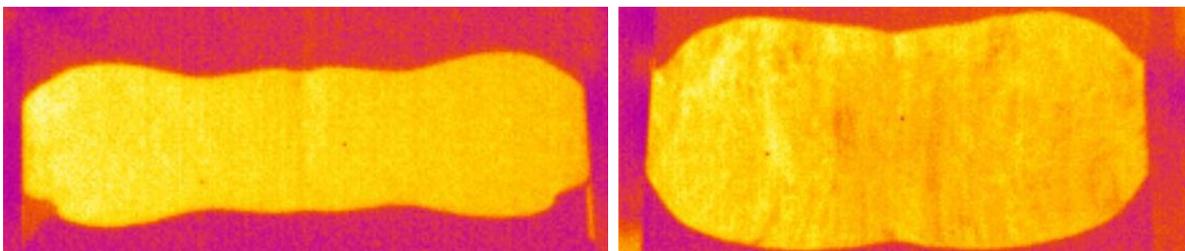


**Abbildung 17: Dichtstoffprobe nach erfolgtem Schmetterlingstest.**

Die Überprüfung erfolgte hierbei manuell durch Sichtprüfung und die Probe wurde auf Inhomogenität und Schlieren untersucht. Als Referenz für den automatisierten Mischprozess wurde die vom Hersteller abgefüllte Kartuschenlösung heran gezogen. Der mit diesem Material durchgeführte Schmetterlingstest fungiert als Referenzprobe für sämtliche Versuche.

Der modifizierte Mischeranschluss wurde an einer klassischen Dosieranlage integriert um die unterschiedlichen Parameterpaarungen zu testen. Hierbei lag das Spektrum des Volumenstroms, der gemischten Dichtstoffmasse zwischen 140 und 180 cm<sup>3</sup>/min sowie die Mischerdrehzahl im Bereich zwischen 140 und 260 u/min. Diese Parameter wurden gleichmäßig gestuft gegeneinander modifiziert und abgetestet. Als Erkenntnis gestaltete sich der optimale Anwendungsbereich oberhalb der Kennlinie von 180 cm<sup>3</sup>/min und 140 u/min sowie 140 cm<sup>3</sup>/min und 260 u/min.

Aus den Erfahrungen in AP 3.2 wurden die Proben der Schmetterlingstests zusätzlich im Infrarotbild betrachtet (Abbildung 18). Hierbei konnte festgestellt werden, dass inhomogene Proben deutlich leichter erkennbar waren als in der manuellen Sichtkontrolle.



**Abbildung 18: Schmetterlingstests im IR Bild**

Die in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse sind ein elementares Erkenntnis für den Einsatz von automatisierten Dosiersystemen. Zudem kann die Nutzung von einer nachrüstbaren statisch dynamischen Mischeinheit in bestehende Systeme nachgerüstet werden um so die Materialausnutzung in heutigen Fertigungsabläufen zu optimieren.

## 2.3 AP 3: Applikation und Qualitätssicherung

### 2.3.1 AP 3.1: Applikation

Für den Produktionsablauf sind lange Härtingszeiten der Klebungen von Nachteil, da der nachfolgende Fertigungsschritt erst erfolgen kann, sobald die Klebschicht eine ausreichende Festigkeit hat. Daher ist es aus fertigungstechnischer Sicht erstrebenswert, die Reaktionsgeschwindigkeit der Aushärtung zu erhöhen. Die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen ist eine Funktion der Temperatur.

Im ersten Versuchsteil soll analysiert werden, inwiefern die Temperatur den Aushärtungsprozess beeinflusst. Für diese Versuche kommt ein Heißluftofen zum Einsatz. Durch erzwungene Konvektion werden in der Ofenkammer kontrollierbare und homogene Temperaturbedingungen geschaffen. Über den Controller werden verschiedene Zeit-Temperatur-Kurven eingestellt. Die maximale Heizrate des Ofens liegt bei 10 K/min. Nach dem Applizieren der Dichtmasse werden die Proben durch Anwendung verschiedener Methoden ausgehärtet. Der Aushärtungsfortschritt wird parallel anhand von DIN 65262-1 analysiert. In der Luft- und Raumfahrt ist diese Norm Standard bei der Qualifizierung von Zweikomponenten-Dichtmassen auf Basis von Polysulfid-Polymeren. Die Norm legt die Anforderungen und das Vorgehen beim Bestimmen der Klebfreien Zeit und der Härtingszeit fest.



**Abbildung 19: Applizierter Dichtstoff auf Probeblech (links) und Querschnitt der Klebung (rechts)**

- Bestimmung der Klebfreien Zeit nach DIN 65262-1:

Polyethylenfolie wird mit einem festen Daumendruck auf die applizierte Dichtmassenschicht angepresst. Eine klebfreie Klebschicht liegt vor, sofern die Oberfläche der Folie rückstandsfrei von Dichtstoffmasse ist. Die bis zum Erreichen dieses Zustandes notwendige Zeit wird als Klebfreie Zeit bezeichnet. Im Verlauf der Versuchsreihen wird die Klebfreiheit an drei Proben, jeweils in Zeitabständen von 15 Minuten, überprüft. Dies wird solange wiederholt, bis die Klebfreiheit an allen drei Proben erreicht ist.

- Bestimmung der Härte (Shore A) nach DIN ISO 7619-1:

Die Shore-Härte ist eine Kennzahl, die hauptsächlich für die Charakterisierung von Elastomeren und gummielastischen Polymeren eingesetzt wird. Zur Härteprüfung kommt ein Durometer zum Einsatz. Die wesentlichen Komponenten des Durometers sind die Andruckplatte, der Eindringkörper, sowie die Anzeigeeinrichtung. Die kreisförmige Andruckplatte hat einen Durchmesser von  $(18,0 \pm 0,5)$  mm. In der zentralen Bohrung der Andruckplatte befindet sich der Eindringkörper. Je nach Geometrie des Eindringkörpers wird zwischen den drei Verfahrensvarianten A, C und D unterschieden. Es ist zu bestimmen, wie weit die Spitze des Eindringkörpers über die untere Fläche der Andruckplatte hinausragt. Unter Einsatz einer Druckfeder wird die Eindringdistanz so umgerechnet, dass direkt ein Härtewert abgelesen werden kann. Ein Härtewert von 0 entspricht dem maximalen Hervorstehen von  $(2,50 \pm 0,02)$  mm, der Härtewert 100 einem Hervorstehen von 0 mm. Gemäß

des technischen Datenblattes von MC-780 B-2 soll als Zielgröße eine Shore-A-Härte von mindestens 30 erreicht sein, ehe die Klebung weiterverarbeitet werden kann. Die bis zum Erreichen dieses Zustandes vergangene Zeit wird als Härtingszeit bezeichnet. Nachdem die Klebfreiheit erreicht ist, wird in Zeitabständen von 15 Minuten die Shore-Härte gemessen. Diese Prüfung wird an jeweils drei Proben durchgeführt. An jeder der drei Proben werden fünf Härtemessungen durchgeführt.

Zur Erzeugung von Referenzwerten werden die Proben in einer ersten Versuchsreihe unter den Umgebungsbedingungen des Technikums ausgehärtet. Während der Versuche werden die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit kontrolliert (24°C, 50%r.F.). Die leichten Schwankungen im Laufe des Versuchstages können toleriert werden, da sie realitätsnahe Produktionsbedingungen widerspiegeln.

- **Versuche im Heißluftofen:**

Für die Versuche im Heißluftofen wurden sieben verschiedene Temperaturniveaus verwendet. Die Versuche ergaben, dass sich die klebfreie Zeit durch eine Erhöhung der Temperatur signifikant verkürzen lässt. Allein die Erhöhung der Raumtemperatur (24°C) um 11K auf 35°C hat eine Halbierung der klebfreien Zeit zur Folge. Die klebfreie Zeit nimmt beim Erhöhen der Reaktionstemperatur ab. In dem Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 45 °C zeigt die Temperaturerhöhung den größten Effekt. Anschließend scheint sich die Kurve einem Grenzwert von einer Stunde asymptotisch anzunähern.

Anhand der Versuchsergebnisse ist zu beobachten, dass die Shore-A-Härte bei hohen Temperaturen wesentlich schneller ansteigt. Demzufolge wird Shore-A  $\geq 30$  schneller erreicht und die Härtingszeit reduziert.

### **2.3.2 AP 3.2: Qualitätssicherung**

Die zentrale Problemstellung im Bereich der Qualitätssicherung ist zunächst die Detektion von Luft einschließen im Dichtstoff. Dabei wurden die Inline-Kontrolle am Dosiersystem (präventiv) und die nachgelagerte Kontrolle (korrektiv) als Möglichkeiten identifiziert. Im weiteren Verlauf wird ebenfalls eine Methode zur Identifizierung einer ausreichenden Mischqualität, sowie eine Anwesenheitskontrolle der Dichtstoffnähte untersucht.

Nach der erfolgten Recherche möglicher Technologien für beide Varianten wurden erste Machbarkeitsuntersuchungen aufgenommen. Es wurde von MC780 B-2 als Dichtstoff ausgegangen. Die Eignung der Sensoren und Prüfverfahren zur Luftblasendetektion ist stark materialabhängig, wofür die beigemengten Füllstoffe zur Herabsetzung der Dichte maßgeblich verantwortlich sind. Sollte sich im weiteren Projektverlauf die Verwendung alternativer Dichtmassen ohne Füllstoffe für die gewählten Anwendungsfälle als zweckmäßig erweisen, wären entsprechende Versuche mit diesen Materialien gegebenenfalls zu wiederholen. Im Folgenden sind die bisherigen Ergebnisse der Machbarkeitsuntersuchungen nach Sensorprinzipien geordnet aufgeführt.

- **Optische Sensoren**

Damit der photoelektrische Sensor eines optischen Systems ein zuverlässiges Signal liefert, muss der Dichtstoff eine minimale Lichtdurchlässigkeit aufweisen. Es wurden dünne Schichten des Dichtstoffs auf vollständig transparenter Folie aufgetragen. Für die entsprechenden Proben werden Schichtdicken 0,1 mm bis 0,5 mm Zehntelmillimeterschritten verwendet. Unmittelbar nach dem Auftragen des Dichtstoffs auf die Folien und nach dem Aushärten der Schichten wurde mit einer

starken Lichtquelle die Transparenz der Proben überprüft. Dabei ist bei allen Proben kein wahrnehmbarer Unterschied zwischen flüssigem und ausgehärtetem Dichtstoff feststellbar. Bei Schichtdicken von 0,2 mm bis 0,5 mm ist das Ergebnis eine vollständige Intransparenz, während bei der Probe mit 0,1 mm Schichtdicke ein sehr geringer Anteil des Lichts durchgelassen wird. Das Konzept eines optischen Sensors zur Detektion von Luftblasen wurde deshalb als nicht umsetzbar bewertet.

- Ultraschall-Sensoren

Der Dichtstoff wurde mittels eines nicht-invasiven Ultraschall-Durchflusssensors der Firma Sonotec in einem Schlauch (Innendurchmesser <10mm) durchschallt. Dabei konnte auf der Empfängerseite kein verwertbares Signal erfasst werden. Daraus ist zu schlussfolgern, dass das Material stark schallabsorbierende Eigenschaften aufweist, was sich mit den Polymerhohlkörpern zur Absenkung der Dichte erklären lässt. Eine auf Ultraschall basierende Lösung kann somit als nicht machbar eingestuft werden.

- Thermische Sensoren

Als limitierende Größe für die Verwendbarkeit von thermischen Sensoren erweist sich die Querschnittsverengung. Bei einer zu starken Verengung des durchströmten Querschnitts bestünde die Gefahr, dass die Druckbelastung des irreversibel kompressiblen Materials zu groß wird. Bei allen recherchierten thermischen Sensoren ist der Innendurchmesser mit unter 2 mm deutlich zu klein. Somit konnten keine geeigneten Sensoren für die Messaufgabe ermittelt werden. Eine thermische Sensorik wird deshalb für den gegebenen Anwendungsfall als nicht geeignet eingestuft und verworfen.

Für die Machbarkeitsuntersuchungen der nachgelagerten Kontrolle wurden zunächst geeignete Proben hergestellt, welche die drei wesentlichen Arten von Fillet Sealing aufweisen. Diese sind Kehlnaht, aerodynamische Naht und Überlappnaht (siehe Abbildung 20). In die aufgetragenen Versiegelungen wurden vor dem Aushärten des Dichtstoffs jeweils halbseitig mittels einer Kanüle Lufteinschlüsse eingebracht. Als Grundwerkstoff der Proben wurde gemäß der projektrelevanten Anwendungsfälle Aluminiumblech gewählt.



**Abbildung 20: Probebauteil der Machbarkeitsuntersuchung**

- Ultraschallprüfung

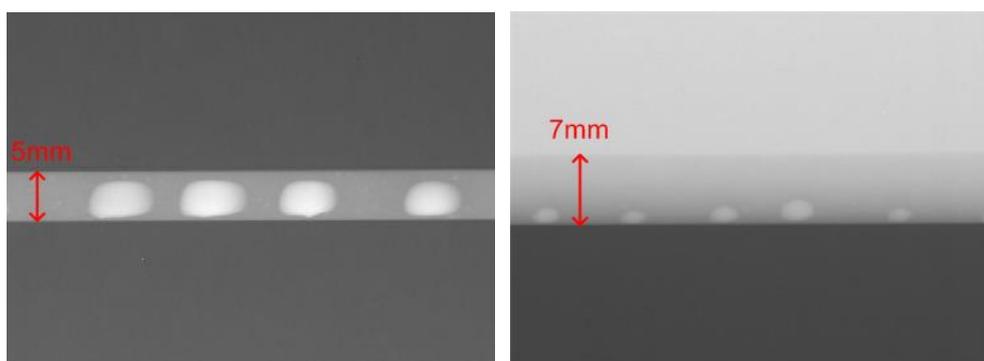
In den Versuchen wurde eine mehrere Millimeter dicke ausgehärtete Schicht des Dichtstoffs unter Verwendung eines Koppelmittels nach dem Durchschallungsverfahren geprüft. Dabei konnte auf der Empfängerseite kein verwertbares Signal erfasst werden. Daraus ist zu schlussfolgern, dass der Dichtstoff stark schallabsorbierende Eigenschaften aufweist. Wie schon bei den Versuchen mit Ultraschall-Durchflusssensoren sind hierfür die Polymerhohlkörper, die als Füllstoffe beigemischt sind, als Ursache anzunehmen. Eine Ultraschallprüfung ist somit aufgrund akustischer Intransparenz bei dem gegebenen Dichtstoff nicht möglich.

- Aktive Thermografie

Die Anregung der zu prüfenden Nahtabschnitte des Probeteils erfolgte mit einem Infrarot-Strahler. Anschließend wurde der Abkühlprozess mit einer IR-Kamera aufgenommen. Luftblasen im Material hemmen die Wärmeleitung, weshalb sich an diesen Stellen eine lokal erhöhte Oberflächentemperatur messen lässt. Im Vergleich sind die durch Luftblasen verursachten Hotspots klar erkennbar, während derartige Ausschläge in der fehlerfreien Naht nicht auftreten. Auch im eigentlichen Wärmebild sind die Hotspots mithilfe der farbcodierten Darstellung gut auszumachen. Die Versuche mit Kehl- und Überlappnaht lieferten qualitativ vergleichbare Ergebnisse. Die aktive Thermografie kann damit prinzipiell als machbar bewertet werden. Über Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens sollen in ausführlichen Versuchsreihen mehr Erkenntnisse gewonnen werden.

- Durchstrahlungsprüfung

Die technologische Eignung einer Röntgen-/Durchstrahlungsprüfung für den vorliegenden Prüffall wurde mit einer Röntgenanlage des Fraunhofer IFAM erprobt. Abbildung 21 zeigt exemplarisch die Röntgenbilder einer aerodynamischen Naht und einer Kehlnaht mit Lufteinschlüssen. Die Fehlstellen zeichnen sich in den Bildern gut ab. Die Größen- und Positionsbestimmung der Hohlräume ist mit hoher Genauigkeit möglich. Entscheidend für die Detektierbarkeit ist der Fehlerkontrast der eingebrachten Lufteinschlüsse. Da die Proben für Luftfahrzeugstrukturen untypisch große Blechdicken aufweisen, ist davon auszugehen, dass der Fehlerkontrast und damit auch die Detektierbarkeit im realen Anwendungsfall höher wäre. Die Durchstrahlungsprüfung geht somit als machbares Verfahren in die folgende Technologiebewertung ein.



**Abbildung 21: Röntgenprüfung der aerodynamischen Naht (links) und der Kehlnaht (rechts)**

- Mikrowellenprüfung

Es handelt sich um Versuche unter Laborbedingungen. Dabei wurde mit einfacher und nicht an den Anwendungsfall angepasster Prüftechnik gearbeitet. Weil die aerodynamische Naht der einzige

Nahtgeometrie ist, bei der aufgrund ihrer ebenen Oberfläche Standard-Prüfköpfe verwendet werden konnten, wurde nur diese Naht beispielhaft geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass Lufteinschlüsse im Dichtstoff grundsätzlich detektierbar sind. Die Ausdehnung der Fehlstellen ist nicht abzulesen. Außerdem kann eine Positionsbestimmung in Längsrichtung der Naht anhand des Signals nur sehr grob erfolgen. Im Anschluss an den Versuch wurde die geprüfte Naht aufgeschnitten. Dabei wurden mehrere Lufteinschlüsse festgestellt, die nicht detektiert werden konnten. Somit scheint es wahrscheinlich, dass die drei detektierten Lufteinschlüsse nur wegen ihrer überdurchschnittlichen Größe erkannt wurden, während kleinere Fehlstellen unerkant blieben.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine Mikrowellenprüfung grundsätzlich machbar ist. Zur Prüfung von Kehl- und Überlappnähten wäre die Entwicklung von Prüfköpfen nötig, die an die Nahtgeometrie angepasst sind. Die Qualität ließe sich mit angepasster Technik steigern, es scheint jedoch fraglich, ob mittels Mikrowellenprüfung Prüfergebnisse auf dem Niveau von Thermografie- oder Röntgenprüfung erreichbar wären.

Die Machbarkeitsuntersuchung der präventiven Detektion von Luftblasen mithilfe einer Sensorik am bzw. im Dosiersystem hat bisher keine weiteren Sensorprinzipien hervorgebracht, die in der betrachteten Anwendung verwendbar sind. Als weitere Technologie sollen kapazitive Sensoren auf Machbarkeit überprüft werden, für welche jedoch spezielle Proben erforderlich sind.

Die in der Machbarkeitsuntersuchung für die nachgelagerte Kontrolle betrachteten Prüfverfahren wurden anhand ausgewählter Kriterien bewertet. Zudem wurde eine Gewichtung der Kriterien vorgenommen.

Nach der qualitativen Bewertung der betrachteten Prüfverfahren hat sich die aktive Thermografie als bestgeeignetes Verfahren erwiesen. In der gewichteten Gesamtbewertung ergibt sich ein klarer Vorteil für die Thermografie. Mit einigem Abstand folgt die Mikrowellenprüfung und schließlich die Röntgenprüfung, die zwar die qualitativ besten Prüfergebnisse erzielte, allerdings in den übrigen Kategorien den konkurrierenden Verfahren unterlegen war. Somit wird das Konzept einer Qualitätssicherung mittels aktiver Thermografie weiter verfolgt. In der nachfolgenden Validierung sollen mithilfe eines robotergeführten Technologiedemonstrators die Grenzen des Verfahrens bestimmt werden. Die Proben aus den Machbarkeitsuntersuchungen sind dafür ungeeignet, weil weder die Entfernung der Lufteinschlüsse zur Dichtstoffoberfläche, noch die genaue Größe der Lufteinschlüsse bekannt ist. Für die nachfolgenden Versuchsreihen werden somit andere Proben benötigt, welche Hohlräume definierter Form, Größe und Position aufweisen.

### *Möglichkeiten der Anwesenheitskontrolle*

Als ein weiterer Aspekt der Qualitätssicherung wurden verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung einer Anwesenheitskontrolle der Dichtstoffnaht ermittelt. Zunächst wurde eine Vorauswahl der Prüfmethode getroffen, da einige Methoden sich schon per Definition nicht für die Anwesenheitskontrolle von Klebstoffen eignen. Mit den vielversprechendsten wird im weiteren Verlauf eine Machbarkeitsstudie durchgeführt.

- Lichtschnittverfahren:

Die Profils Scanner können auf verschiedenen Oberflächen eingesetzt werden und Messgrößen wie Profil, Breite, Höhe, Tiefe, Verformung und Vertiefungen bestimmen und direkt im Sensor berechnen. Aufgrund der Applizierung des Klebstoffes ergeben sich unterschiedliche Höhenprofile, anhand dessen der Klebstoff detektiert werden kann.

- Bildverarbeitung:

Industrielle Bildverarbeitung bedeutet quantitative Bildauswertung. Die Bildverarbeitung ist die logische Erweiterung der manuellen Sichtprüfung, Kameras erzeugen Bilder des Prüfstücks und eine Software wertet diese automatisch aus. Dieses Verfahren ist aufgrund der gut sichtbaren Abgrenzung des Klebstoffes und des Aluminiums vielversprechend.

- Thermografie:

Aluminium besitzt einen niedrigeren Emissionsgrad als der Klebstoff, daraus entsteht bei dem Klebstoff ein größerer Wärmeaustausch mit der Umgebung. Außerdem hat Aluminium eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der Klebstoff und leitet die Wärme schneller wieder ab. Durch diese Eigenschaften entsteht ein Wärmeunterschied zwischen den beiden Materialien, den die Infrarot-Kamera aufnehmen kann. Während des Applikationsprozesses entsteht nur ein sehr geringer Temperaturgradient (z.B. durch exotherme Reaktionen beim Aushärten des Dichtstoffs). Dadurch ist es zusätzlich nötig den Prüfkörper von einer externen Wärmequelle oberflächlich aufzuheizen, um einen geeigneten Wärmeunterschied der beiden Materialien zu erreichen.

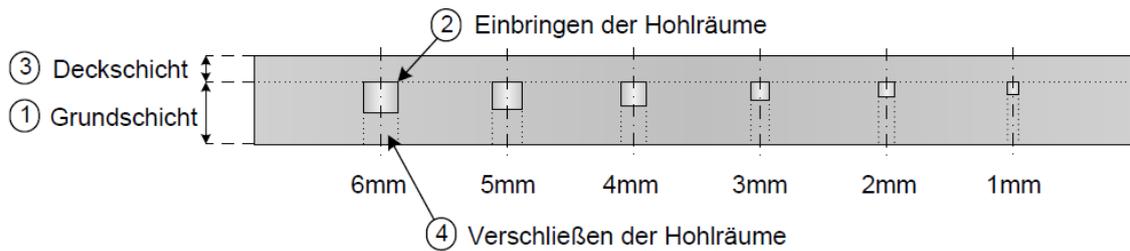
- Ultraschallverfahren:

Ultraschallverfahren haben sich bereits in der Machbarkeitsuntersuchung der nachgelagerten Luftblasendetektion als ungeeignet erwiesen und werden deshalb nicht vertieft betrachtet.

Eine weitere Versuchsreihe wurde durchgeführt, um die Potenziale von Thermografie in Kombination mit vorgewärmten Dichtstoffen zu ergründen. Dazu wurden Kartuschen repräsentativer B- und C-Dichtmassen auf 45°C erwärmt. Anschließend wurde das Material auf blankem Alu-Blech appliziert und von einer IR-Kamera aufgenommen. Dabei zeichnete die Temperaturdifferenz zwischen erwärmter Naht und umgebenden Alu-Blech sehr gut im Bild ab. Eine in das Dosiersystem integrierte Anwesenheitskontrolle durch eine IR-Kamera in Kombination mit vorgewärmten Dichtstoffen kann somit als machbar bewertet werden. Außerdem lassen sich aus den Bildern Informationen zur Nahtgeometrie generieren, so kann beispielsweise eine Änderung der Nahtbreite gut detektiert werden.

#### *Detektion von Lufteinschlüssen mittels aktiver Thermografie*

Für die weiteren Versuche zur Detektion von Lufteinschlüssen in den Sealings auf Basis aktiver Thermografie wurden spezielle Prüfkörper angefertigt. Vorgesehen sind ausgehärtete Dichtstoffproben, welche nur aus dem Dichtstoff MC-780 B2 bestehen und die Form eines Quaders mit den Maßen 25 x 10 x 140 mm hat. In Längsrichtung sind in regelmäßigen Abständen zylinderförmige Hohlräume eingebracht die Durchmesser von 1 mm bis 6 mm haben. Diese haben in jedem Prüfkörper den gleichen Abstand zur Oberfläche, der im Folgenden als Überdeckung bezeichnet wird. Eine schematische Schnittdarstellung eines solchen Riegels ist in Abbildung 22 zu sehen.

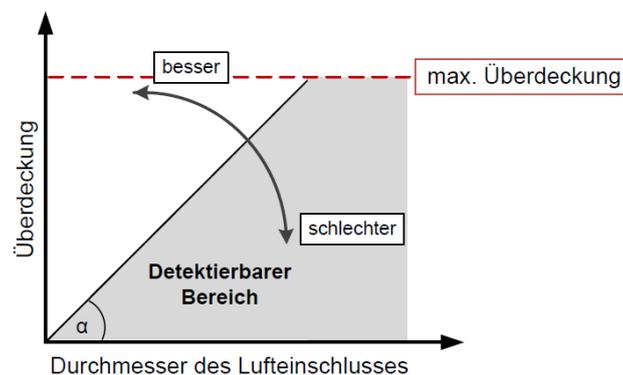


**Abbildung 22: Schematische Darstellung der Prüfkörper**

Zwei wesentliche Informationen sollen in den nachfolgenden Versuchen ermittelt werden:

- Welche minimalen Abmessungen darf ein Lufteinschluss haben, um noch detektierbar zu sein?
- Wie tief darf ein Lufteinschluss im Material liegen, damit er noch detektierbar ist?

Beide Größen sind abhängig voneinander. Hohlräume einer bestimmten Größe sind nur bis zu einer maximalen Überdeckung detektierbar. Liegt eine Fehlstelle zu tief im Material, ist sie aufgrund thermischer Diffusion nicht als Hotspot auf der Dichtstoffoberfläche zu erkennen. Der Zusammenhang lässt sich in Form einer Kennlinie darstellen, die in Abbildung 23 zu sehen ist. Unter der Annahme eines linearen Verlaufs der Kennlinie kann der Steigungswinkel der Kennlinie als Maß für die Güte des Prüfverfahrens interpretiert werden. Ein steiler Verlauf der Kennlinie und ein großer Steigungswinkel  $\alpha$  sind als Anzeichen für eine hohe Prüfqualität des Verfahrens zu deuten. In diesem Fall lassen sich kleine Fehlstellen auch bei einer großen Überdeckung noch detektieren. Umgekehrt bedeutet ein flacher Verlauf mit einem infolgedessen kleinen Steigungswinkel, dass sich Fehlstellen vergleichsweise schlecht detektieren lassen. In der beispielhaften Darstellung der Kennlinie beträgt der Steigungswinkel der Kennlinie  $45^\circ$ . Bei diesem Wert darf die Überdeckung eines Hohlraums maximal so groß sein, wie ein Durchmesser quer zur Prüfrichtung.



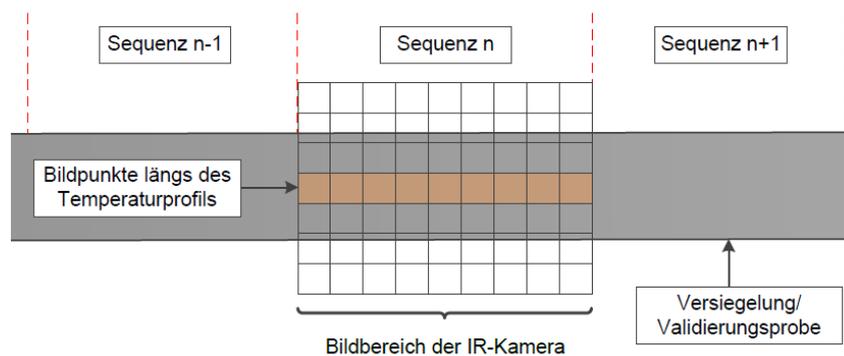
**Abbildung 23: Kennlinie zur Charakterisierung des Verfahrens**

Das von der Kamera erzeugte farbcodierte Wärmebild ist ohne weitere Verarbeitung ungeeignet, um die Grenzen des Verfahrens mittels Versuchen zu quantifizieren. Deshalb bedarf es einer Möglichkeit ein Ausgangssignal zu erzeugen, das sich gut auswerten und weiterverarbeiten lässt. Es wird angestrebt, die verwendete Kamera-Software so zu konfigurieren, dass Temperatur-Verläufe

generiert werden, welche sich gut darstellen und auswerten lassen. Grundsätzlich sind dabei zwei verschiedene Prüfabläufe möglich.

- **sequentielle Prüfung:**

Die Prüfung erfolgt ähnlich den Versuchen in der Machbarkeitsuntersuchung statisch. Dabei wird mit dem Roboter ein bestimmter Bereich einer Naht angefahren, angeregt und der Abkühlvorgang mit der Kamera aufgezeichnet. Anregung und Aufnahme der Wärmebilder erfolgen nicht simultan. Somit ist nach der Erwärmung des Prüfbereichs mit dem Strahler ein Verfahren des Roboters nötig, um die Kamera über dem zuvor vom Strahler aufgeheizten Prüfbereich zu platzieren. Anschließend fährt der Roboter den nächsten Ausschnitt der Naht an.

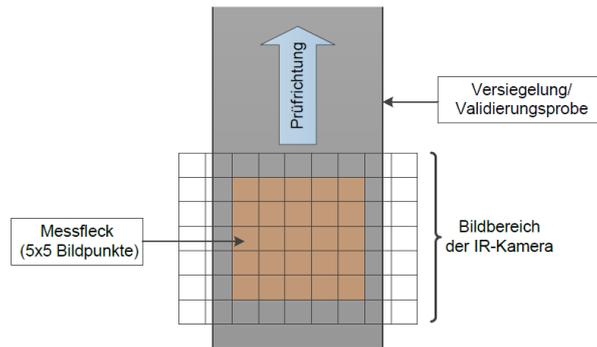


**Abbildung 24: sequentielle Prüfung**

Bei der sequentiellen Prüfung erfolgt die Auswertung analog zu den Vorversuchen mithilfe eines Temperaturprofils. Mittig im Wärmebild wird eine horizontale Linie platziert, die eine Pixelreihe aus dem Bildbereich der Kamera repräsentiert. Eine schematische Darstellung zur Veranschaulichung des Prinzips bietet Abbildung 24. Die Temperatur entlang der Linie im Moment der Aufnahme des Bildes lässt sich als Temperaturprofil darstellen. Der Endeffektor wird so über den Nahtausschnitt geführt, dass das Temperaturprofil längs zur Naht verläuft und etwa mittig auf ihr liegt. Somit sind Hotspots auf der Oberfläche als lokale Maxima im Temperaturverlauf erkennbar.

- **kontinuierliche Prüfung:**

Bei der kontinuierlichen Prüfung wird der Endeffektor mit konstanter Geschwindigkeit über der Siegelnaht entlang geführt. Nach der oberflächlichen Erwärmung mittels Infrarot-Strahler folgt die Aufzeichnung der Kamera. Auch hier stellt sich die Frage der Auswertbarkeit der erzeugten radiometrischen Videodatei. Eine Datenverarbeitung auf Basis eines solchen Videoausschnitts wäre sehr komplex. Darum wird die Software der Kamera so konfiguriert, dass auch hier ein Temperaturverlauf erzeugt wird, jedoch im Gegensatz zur sequentiellen Prüfung ein Temperatur-Zeit-Verlauf. Im Bildbereich der Kamera wird mittig ein Messfleck von 5x5 Pixeln gebildet. Dargestellt wird der zeitliche Verlauf der über alle Bildpunkte des Messflecks gemittelten Temperatur. Analog zur sequentiellen Prüfung sind lokale Maxima im Verlauf als Hotspots auf der Nahtoberfläche zu interpretieren. Anhand der konstanten Prüfgeschwindigkeit des Roboters lässt sich die Zeit-Achse in eine Weg-Achse umrechnen. Somit ist eine Bestimmung der Lage detektierter Hotspots mit hinreichender Genauigkeit möglich.



**Abbildung 25: kontinuierliche Prüfung**

Die als potentiell geeignet eingestuft Prüfverfahren im Bereich der Anwesenheitskontrolle wurden anhand von Laborexperimenten einer Machbarkeitsstudie unterzogen. Diese Versuche fanden in einem Klebstofflabor statt und wurden mithilfe eines Bosch APAS Roboters durchgeführt.



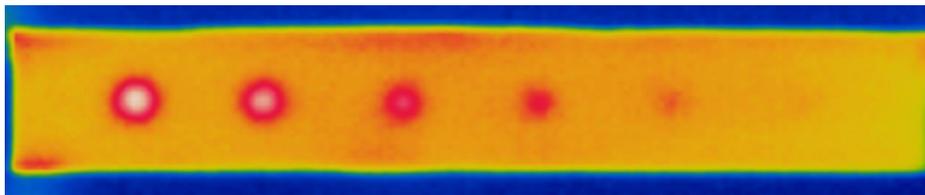
**Abbildung 26: Versuchsaufbau**

Für die Versuche wurde ein Musterbauteil angefertigt, das fehlerfreie und fehlerbehaftete Nähte repräsentiert. Als relevante Fehlstellen wurden in Rücksprache mit dem Verbundpartner freie Kanten, ungleichmäßiger Klebstoffauftrag, zu breite Nähte und zu schmale Nähte festgelegt. Die Versuche befinden sich aktuell in der Umsetzung. Detaillierte Ergebnisse werden im nächsten Zwischenbericht dargestellt.

In der kontinuierlichen Prüfanordnung sind IR-Strahler und IR-Kamera definiert zueinander angebracht und werden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verfahren und die Abkühlung erfasst. Hierbei wurden die Prüfgeschwindigkeiten zwischen 25 und 100 mm/s variiert und die Messdaten erfasst. An den gefertigten Probekörpern konnten so unterschiedliche Überdeckungszustände dargestellt werden. In den Messplots ist direkt erkennbar wie sich unterschiedlich große Lufteinschlüsse in der Anregung detektieren lassen.

Die Versuche wurden in Prüfgeschwindigkeit sowie Lufteinschlussgröße und –tiefe variiert und auf diesen Weg die Detektionsgrenzen für das kontinuierliche Verfahren ermittelt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in diesem Verfahren ab einer Überdeckung von 3mm keine Prüfergebnisse sicher detektiert werden können.

Als Gegenpart hierzu wurde über das Prinzip der sequentiellen Prüfung ebenfalls mit den entworfenen Testkörpern mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Hierbei wurde speziell die Anregungs- und Abklingzeit variiert um diverse Einschlussgrößen und Überdeckungshöhen miteinander zu vergleichen. Mit diesem Prüfablauf konnten die unterschiedlichen Lufteinschlüsse im IR-Bild sichtbar gemacht werden (Abbildung 27).



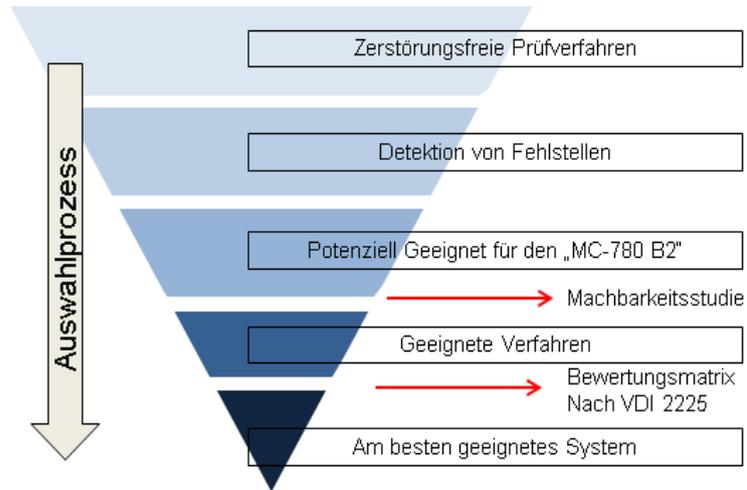
**Abbildung 27: Lufteinschlüsse sichtbar im IR-Bild des Probekörpers nach Anregung**

Für die weitere Versuchsdurchführung wurde eine einheitliche Aufheizdauer verwendet, da sich die Abkühlzeit als ausschlaggebender für die IR Auswertung heraus stellte. Die gemessenen Temperaturen verändern sich über den Probekörpern im Verhältnis zur Abkühlzeit. Speziell bei kleineren Lufteinschlüssen wird das Temperatursignal uneindeutig.

So konnte ermittelt werden, dass die sequentielle Prüfung grade kritische Lufteinschlüsse größer 3mm in bis zu 3mm Überdeckung zu detektieren ist. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Detektion möglich ist. Hinzu ist die sequentielle Prüfmethode etwas sensitiver bei dickeren Überdeckungsschichtdicken. Jedoch wird auch die Faustformel der Thermografie bestätigt, dass nur Fehlstellen in dem Durchmesser erfasst werden können die kleiner gleich der Materialüberdeckung sind.

#### *Untersuchung der Mischqualität*

Ergänzend zu diesen Arbeiten wurde auch der Fragestellung nach der korrekten Durchmischung des zwei Komponenten Materials nachgegangen. Hierbei war aus Sicht der QS die Fragestellung nach der korrekten Mischqualität entscheidend. Diese ist aufzuteilen in die korrekte Durchmischung der Komponenten, sowie in die korrekte Dosierung der Einzelkomponenten zueinander. Um sich dieser Fragestellung zu nähern wurde nach einem theoretischen Technologie Screening eine Vorauswahl durchgeführt (vgl. Abbildung 28). Mit diesen Kandidaten wurden anschließend praktische Versuche durchgeführt ob eine Detektion und Bewertung möglich ist. Nach einer Bewertung der Ergebnisse wurde ein entsprechender Prototyp aufgebaut und getestet.



**Abbildung 28: Auswahlprozess zur Mischqualitätsbewertung**

Aus den, nach der Theorie möglichen zerstörungsfreien Prüfverfahren mussten die Ultraschallprüfung, die Fluoreszenzprüfung und IR-Thermografie nach erfolgten Versuchen ausgeschlossen werden (Abbildung 29). Die Untauglichkeit begründet sich hierbei aus der Besonderheit des Dichtstoffes und der Prüfaufgabe. Die erfolgreich erprobten Verfahren wurden systematisch bewertet und die Entscheidung fiel auf eine automatisierte Variante der optischen Sichtprüfung.

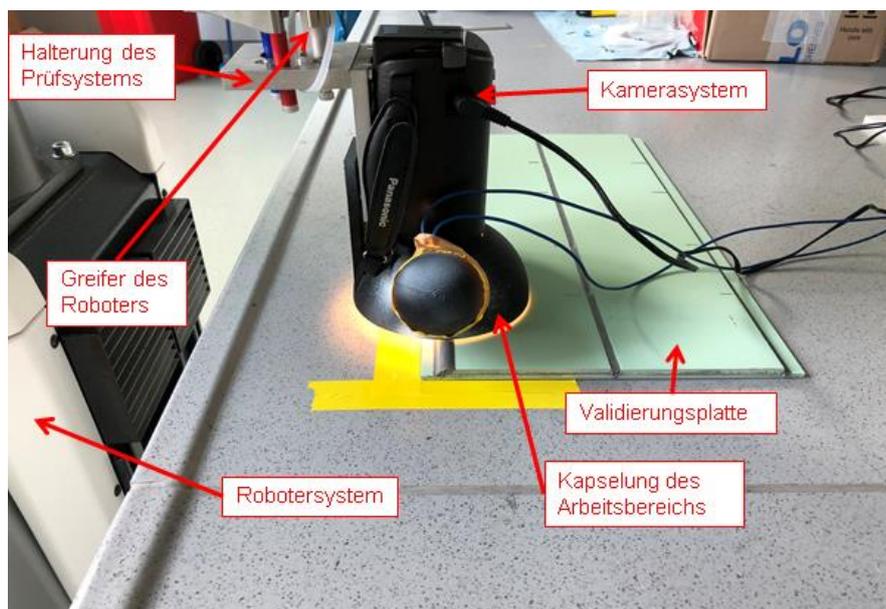
| Verfahren              | Theorie | Praxis |
|------------------------|---------|--------|
| Durchstrahlungsprüfung | ✓       | ✓      |
| Farbprüfung            | ✓       | ✓      |
| Ultraschallprüfung     | ✓       | ✗      |
| Sichtprüfung           | ✓       | ✓      |
| Fluoreszenzprüfung     | ✓       | ✗      |
| Infrarotthermografie   | ✓       | ✗      |
| Infrarotspektroskopie  | ✓       | ✓      |

**Abbildung 29: Bewertung der Prüfmethode nach theoretischer Eignung und praktischer Tauglichkeit**

Für dieses Prüfkonzept wurde eine gesonderte Prüfanordnung erarbeitet und speziell die homogene Beleuchtung des Prüfobjekts in den Fokus gestellt. Bei der Prüfanordnung ist zentral in einer Glocke die Kamera positioniert. Rundherum befindet sich eine mattierte diffus streuende Glocke, welche indirekt mit Hilfe von LEDs beleuchtet wird.

Für die Untersuchungen wurde ein gesondertes Versuchsbauteil erstellt, in dem die unterschiedlichen Naht-Typen abgebildet werden und zudem abweichende Mischungsverhältnisse eingebracht wurden. So liegen Bereiche mit dem Soll-Mischungsverhältnis 100:10 vor sowie Werte außerhalb der Herstellertoleranz als Grenzwerte von 100:8 und 100:12. Zwischen diesen Abschnitten befinden sich zudem Übergangszonen zwischen den Materialien.

Die Untersuchungen wurden unter unterschiedlichen Beleuchtungssituationen durchgeführt um auch den Einfluss externer Lichtquellen auf die optische Erscheinung und damit das Messergebnis beurteilen zu können. Neben einer Labor Situation unter künstlichem Licht wurde ebenfalls der Einfluss von Tageslicht wie auch absolute Dunkelheit betrachtet. Der hierfür verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 30 dargestellt.



**Abbildung 30: Versuchsaufbau im Labor über Versuchsbauteil**

In den Untersuchungen konnten detektierbare Unterschiede im messbaren Farbton der Dichtstoffe nachgewiesen werden. So sinkt der Farbtonwert mit ansteigendem Härteranteil in der Dichtmasse und umgekehrt. Zudem konnte gezeigt werden, dass ein Einfluss von Sonnenlicht Ergebnisse verfälschen kann, was unter künstlichen Lichtbedingungen nicht der Fall war. Von daher ist auf die Beleuchtungssituation immer zu achten.

Insgesamt konnte mit dem prototypischen System gezeigt werden, dass eine optische Beurteilung des durchmischten Dichtstoffes möglich ist. Eine Schlierenbildung ist hierbei deutlich schwerer zu detektieren als eine generelle Abweichung des Mischungsverhältnisses. Es stellte sich zudem dar, dass die inline Prüfung von komplexen Naht Geometrien eine hohe Herausforderung darstellt die nicht zwingend im Verhältnis stehen zu dem Mehrwert des Prüfungsergebnisses. Daher wird ein solches Prüfungsverfahren im Bereich des Oberflächenschutzes mittels Polysulfiddichtmassen eher für eine Stichproben Untersuchung neben dem Produktionsprozess geeigneter sein als eine 100% Bauteilprüfung.

### *Applikationskontrolle von Dichtnähten*

Eine weitere wichtige Aufgabe für eine prozesssichernde Qualitätssicherung ist die Erfassung der aufgetragenen Dichtnähte und deren qualitative Bewertung. Hierfür wurden zunächst aus den heutigen Prozessen die Anforderungen für ein solches System ermittelt und aufgestellt. Die QS muss hierbei klären ob die Naht anwesend ist, ob die Position zum Bauteil korrekt ist und ob Fehlstellen vorhanden sind.

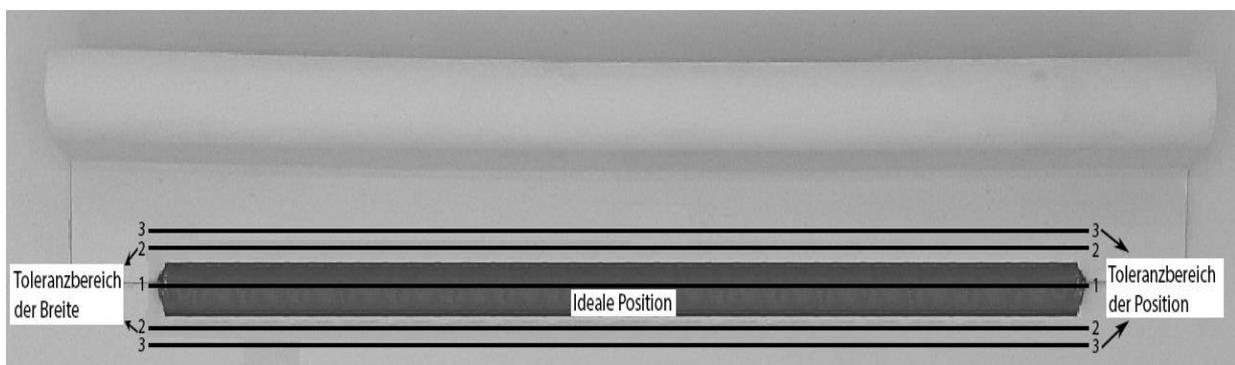
In einem weiteren Schritt wurde auf theoretischer Basis erfasst welche zerstörungsfreien Prüfmethoden generell für die Anwesenheitskontrolle verfügbar sind. In einem darauf aufsetzenden Arbeitsschritt wurde auf Basis der bisherigen Erfahrungen geprüft welche Verfahren für den verwendeten Dichtstoff relevant sind. Durch diesen Auswahlprozess konnten die zur Wahl stehenden Technologien auf drei Möglichkeiten reduziert werden, welche in eine praktische Laborerprobung weiter verglichen werden sollten. Bei diesen Methoden handelt es sich um:

- Bilderfassung und –Verarbeitung
- Aktive Thermografie
- 2D Lichtschnittsensor

In Versuchen im Labormaßstab wurden Testbleche verwendet um mit diesen Erkenntnisse zu sammeln die für eine spätere Auswahl notwendig sind. Zentrale Fragestellungen waren hierbei die Detektierbarkeit von den verschiedenen Nahttypen, eine gute Zugänglichkeit der relevanten Bereichen, die schonende Materialbehandlung und auch eine spätere Automatisierbarkeit des Prozesses.

### *Bildverarbeitung*

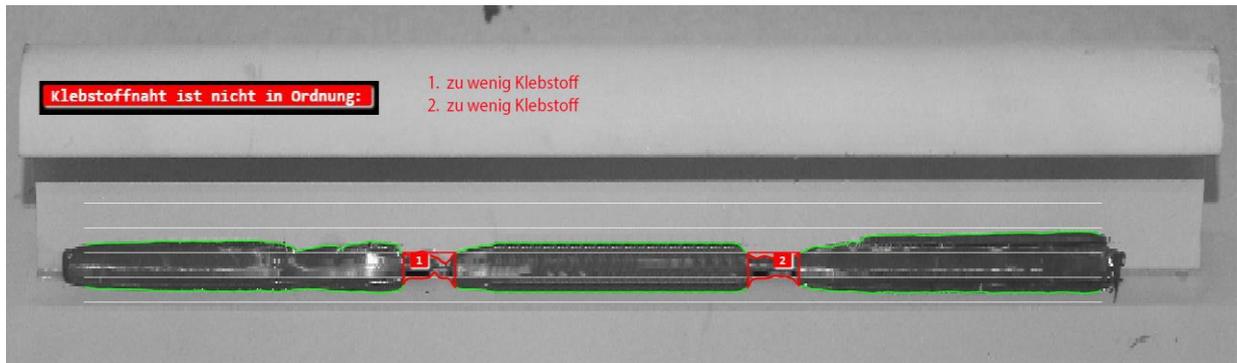
Für die Erkennung von Dichtstoffnähten mit Hilfe eines Kamerasystems ist in erster Linie die Erkennbarkeit eine Grundvoraussetzung. Hier ist die dunkle Farbgebung des Dichtstoffes vom Vorteil auf den hellen Grundierungsfarbtönen der Flugzeugschalen. Die Zugänglichkeit der Bauteile ist hierbei ebenfalls mit einem Roboter gut zu ermöglichen, auch unter den Stringer streben kann optisch die Dichtnaht erkannt werden. Mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware können für die Verarbeitung der Daten mit einem Referenzbild die Prüfkriterien definiert werden (Abbildung 31). So kann die ideale Sollposition vorgegeben werden und auch die Toleranzbereiche eingelernt werden. So ist es auch möglich maximale und minimale Auftragsbreiten zu definieren.



**Abbildung 31: Toleranzbereiche bei der Bildverarbeitung an einem Testbauteil**

Durch diese Vorgaben kann die Bewertungssoftware die Vorgaben kontrollieren und eine automatische Beurteilung durchführen. So kann beispielhaft die Kehlnaht an der Stringerhinterkante

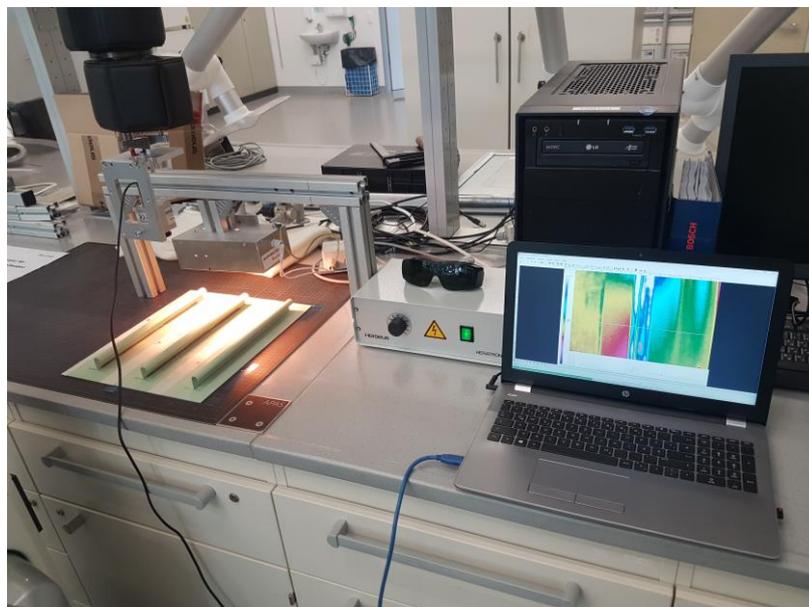
auch unter dem Stringer sehr gut erkannt werden (Abbildung 32). Die Bewertung der Naht kann hierbei auch im Bild erfolgen, wo die abweichenden Bereiche rot markiert werden.



**Abbildung 32: Automatisierte Auswertung der Dichtnaht mit einer Bildverarbeitung**

### *Thermografie*

Eine weitere technologische Möglichkeit der Nahtkontrolle kann die Thermografie darstellen. Schon bei der Luftblasendetektion konnte dieses Verfahren sich durchsetzen, somit ist die Verwendbarkeit für Dichtstoffanwendungen bereits nachgewiesen. Nach einer aktiven Anregung kann mit Hilfe einer IR-Kamera ein sehr gut erfassbarer Kontrast zwischen dem Dichtstoff und der Aluminiumhaut erkannt werden. In einem kompakten Versuchsaufbau (Abbildung 33) wurden verschiedene Anregungsstrategien und Abkühlzeiten getestet um eine gute Bildgenerierung zu ermöglichen.

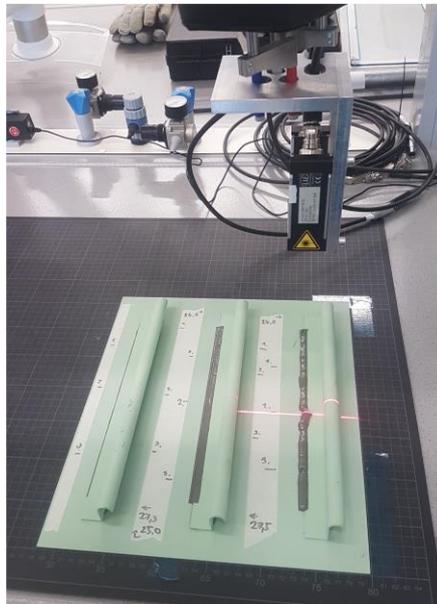


**Abbildung 33: Versuchsaufbau für die IR-Thermografie**

In unterschiedlichen Testapplikationen wurden Messbereiche definiert und quer zur Nahtichtung platziert. So konnten Messkurven der unterschiedlichen Applikationen generiert werden, welche eine Auswertung deutlich vereinfachen. Der Nahtbeginn stellt hierbei einen deutlich sichtbaren Sprung dar. Auch ein Positionfehler und eine Luftblase an der Oberfläche können sowohl im Thermobild als auch in den Temperaturgraphen gut erkannt werden.

### *Lichtschnittsensor*

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung von Dichtnähten kann ein sogenannter 2D Lichtschnittsensor darstellen. Mit diesem Sensor werden auf einer Linie liegend viele Messpunkte aufgenommen und in der Auswertung hiermit ein Schnittprofil aus diesen Daten generiert. Mit einem rudimentären Versuchsstand an einem Leichtbauroboter sollte ermittelt werden wie ein solches System für die Messaufgabe korrekt positioniert werden kann (Abbildung 34).



**Abbildung 34: Versuchsaufbau für die Erprobung eines Lichtschnittsensors**

Die Erfassung der Überlappnaht auf dem Stringerfuß kann von oben mit dem Sensor sehr gut erfasst werden. Das Messbild des Sensors liefert hier einen gut auszuwertenden Messschrieb in dem die Dichtnaht erkannt werden kann. Auch eventuelle Formabweichungen sind hierbei festzustellen und können als Fehler erkannt werden. In Relation zu der Stringer Geometrie kann auch die korrekte Position der Dichtnaht geprüft werden.

Anders sind jedoch die Messergebnisse der Kehlnaht an der Stringerhinterkante. Diese wird durch den Versteifungsbereich von oben verdeckt, was eine Sichtbarkeit erschwert. Kritisch stellte sich hierbei jedoch das Messbild dar. Der Sensor muss zur Sichtbarkeit gekippt werden um eine Messdatenaufnahme zu ermöglichen. Anders als bei den Kamerasystemen werden hier konkret Messungen durchgeführt um den Messschrieb erstellen zu können. Durch die Neigung des Messgeräts ist die genaue Position jedoch schwer zu erfassen. Auch die ermittelten Daten der eigentlichen Dichtnaht wird sichtbar, dass nicht eindeutig der Dichtstoff und das Aluminiumbauteil voneinander unterscheiden werden können.

### *Bewertung*

Nach den durchgeführten Vorversuchen zur Systemauswahl wurden die zuvor erstellten Kriterien gewichtet und objektiv bewertet. Hierbei konnten sich die beiden Kamerasystemen deutlich vom Einsatz eines Linienscanners abheben. Ausschlaggebend war hier neben der Erreichbarkeit speziell die im Bild sehr klar unterscheidbare Grenze zwischen Dichtstoff und Bauteil.

Fortführend wird die Technologie mit der besten Eignung für das gesamte Einsatzspektrum ausgewählt in einen prototypischen Aufbau mit Hilfe eines Robotersystems an der realen Flugzeugstruktur im CFK Nord erprobt. Eine zentrale Rolle wird hierbei die prozesssichere Erkennung der Dichtnahtbereiche unter Berücksichtigung der komplexen Bauteilstruktur spielen. Diese Entwicklung und Erprobung wird in der verbleibenden Projektlaufzeit absolviert werden.

Im Bereich der Qualitätssicherung wurden die Entwicklungen eines prototypischen Aufbaus, welches mit Hilfe eines Robotersystems zur prozesssicheren Erkennung der Dichtnahtbereiche verwendet werden soll, weiter vorangetrieben.

Da das Ziel der Qualitätssicherung darin besteht, komplexe Flugzeugschalen in möglichst wenig Durchgängen sowohl auf Anwesenheit von Dichtstoffnähten als auch auf Fehlstellen innerhalb der Dichtstoffnähte zu untersuchen, wurde der Fokus im weiteren Verlauf des Projektes auf die aktive Thermografie gelegt. Der Grund für die Auswahl der aktiven Thermografie ist, dass sich im bisherigen Verlauf des Projektes gezeigt hat, dass durch die Verwendung dieses Verfahrens sowohl eine Anwesenheitskontrolle als auch eine Detektion von Fehlstellen möglich ist.

#### *Auswahl einer geeigneten Anregungsmethode für die aktive Thermografie*

Um die Entwicklung des Prototypens für die Qualitätssicherung mittels aktiver Thermografie weiter voranbringen zu können, musste zunächst eine Auswahl der geeignetsten Anregungsmethode durchgeführt werden. Eine Anregung durch eine Wärmequelle ist erforderlich, um die benötigte Energie für eine aktive Thermografie-Prüfung in das zu untersuchende Objekt einbringen zu können. Im Rahmen der Untersuchungen wurden dabei folgende Anregungsmethoden getestet:

- Kontinuierliche optische Anregung mittels UV-Strahler
- Kontinuierliche optische Anregung mittels IR-Strahler
- Konvektive Anregung mittels Heizlüfter
- Optische Impulsanregung mittels Blitzlampe

Durchgeführt wurden die Vorversuche zur Auswahl einer Anregungsmethode aus Gründen der Vergleichbarkeit an einem eigens aufgebauten Prüfstand mit denselben Bedingungen für alle untersuchten Anregungsmethoden. Die Wärmebilder wurden dabei mit Hilfe der Infrarot-Kamera PI400 und der zugehörigen Software von der Firma Optris aufgenommen. Bei den Prüfkörpern handelt es sich um originalgetreue Bleche in verringertem Maßstab mit aufgebrachten Stringern, die vom Projektpartner sowohl in lackierter als auch in unlackierter Variante zur Verfügung gestellt wurden.

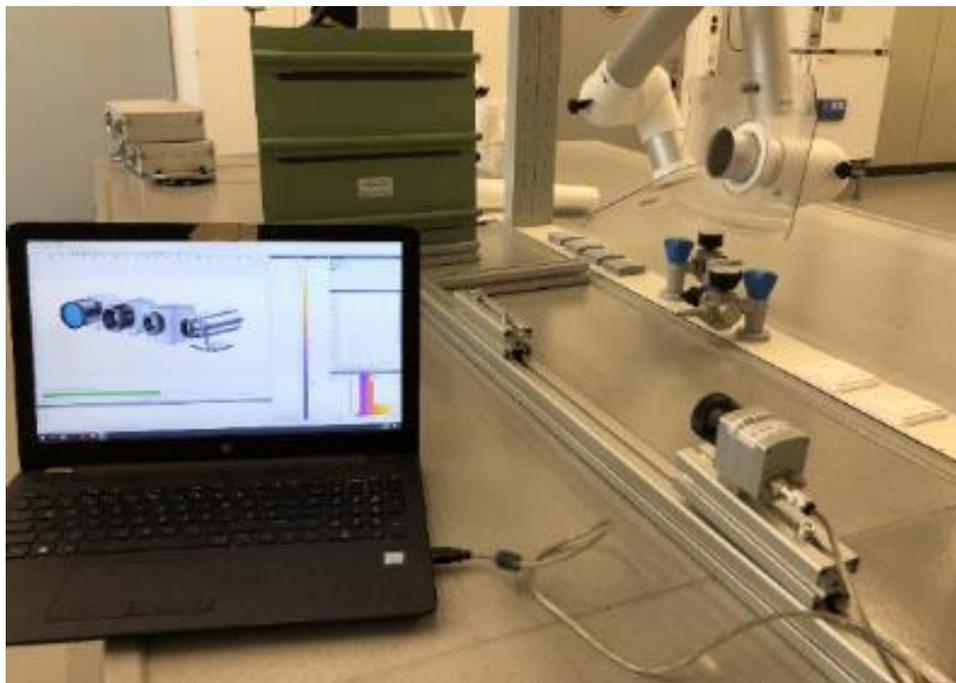


**Abbildung 35: Prüfkörper**

Wie an der Darstellung der Prüfkörper in der oberen Abbildung 35 zu erkennen ist, beinhalten die Nähte sowohl Fehlstellen als auch unterschiedliche Formen der Fehldosierung, wobei die mittleren Nähte die annähernd idealen Nahtdimensionen darstellen sollen. Ebenfalls erwähnenswert ist, dass die Nähte, die auf den lackierten Blechen aufgebracht wurden, nach dem Auftrag mit einem Pinsel nachgezogen wurden, so dass ihre Schichtdicke weitaus geringer ist als die Schichtdicke der Nähte auf den unlackierten Blechen.

### *Versuchsdurchführung der Anregungsversuche für die aktive Thermografie*

Wie eingangs bereits erwähnt, wurden alle Versuche zur Auswahl einer geeigneten Anregungsmethode an demselben Versuchsstand im Labor durchgeführt. Der Versuchsstand, der in der folgenden Abbildung 36 dargestellt ist, besitzt eine integrierte Aufnahme für die jeweiligen Bauteile und Anregungsmethoden, sowie variabel einstellbare Kamerapositionen. Durch die zuvor ermittelten fixen Kamera- und Bauteilpositionen entfällt das erneute Ausrichten der IR-Kamera nach dem jeweiligen Prüfdurchlauf, so dass der Fokus der Laborversuche auf die Positionierung der Anregungsquellen und die Festlegung der Dauer und Intensität der jeweiligen Anregung gelegt werden konnte. Die Anordnung der Energiequelle wurde jeweils so gewählt, dass die Ausleuchtung der Prüfkörper möglichst homogen erfolgen konnte und die Reflektionen im Wärmebild so gering wie möglich gehalten wurden. Für jede Anregungsmethode wurde eine definierte Anzahl von Prüfdurchläufen durchgeführt, wobei für die Bewertung an dieser Stelle die Qualität der erstellten Wärmebilder und somit die Erkennbarkeit der Dichtstoffnähte von Bedeutung ist.

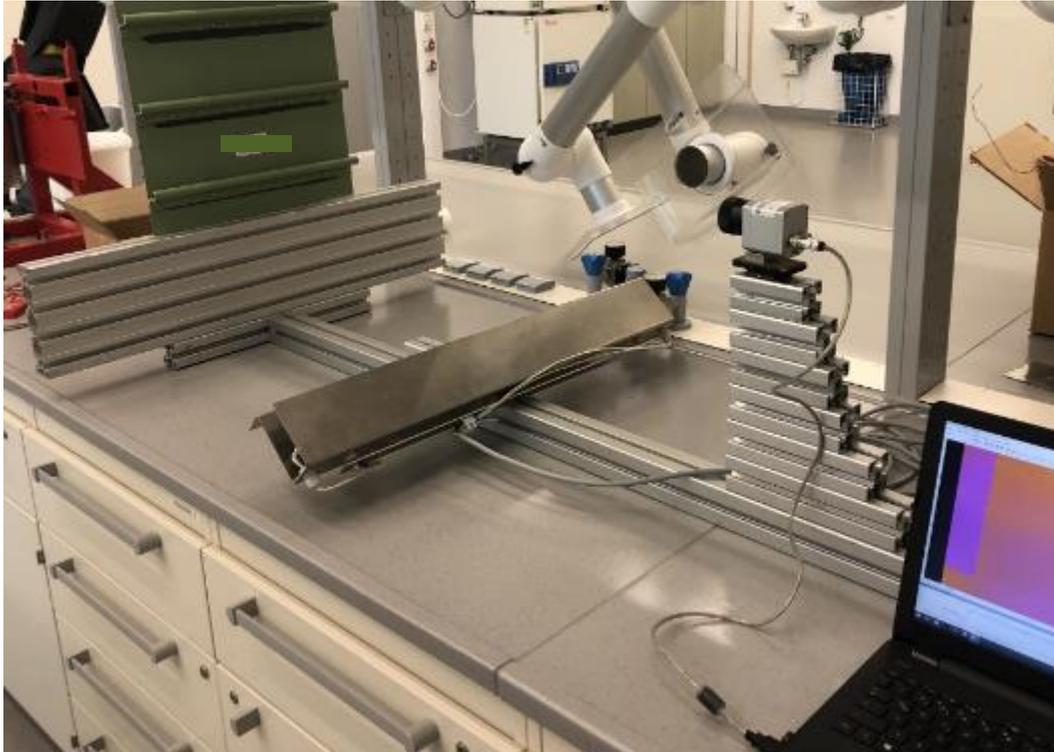


**Abbildung 36: Grundlegender Versuchsaufbau im Labor**

Die verwendete IR-Kamera besitzt eine Auflösung von 382x288 Pixeln und hat eine Bildfrequenz von 80Hz. Der Abstand der Kamera zum zu prüfenden Bauteil und die Fläche, die unter Berücksichtigung der Qualität der Ergebnisse maximal erfasst werden kann, ist dabei vor allem von der Auflösung der verwendeten Kamera abhängig. Mithilfe von IR-Kameras mit höherer Auflösung, können dementsprechend größere Bauteile untersucht werden, was vor allem bei der Untersuchung von großflächigen Flugzeugstrukturen von großer Bedeutung ist.

#### *Anregung mittels IR-Strahler*

Für die Anregung mittels Infrarot-Strahlung wurde ein Infrarotstrahler von Heraeus mit einer eigens gefertigten Umhausung verwendet. Betrieben wurde der IR-Strahler, der mit einer Leistung von 3000W ausgestattet ist, mit dem zugehörigen Steuerungsgerät Heratron (Nennleistung: 3,5kW), womit die Intensität der IR-Strahlung in Stufen von 0/10 bis 100% einstellbar ist. Der Versuchsaufbau für die aktive Thermografie mittels IR-Strahlung ist in der folgenden Abbildung 37 dargestellt.



**Abbildung 37: Versuchsaufbau für die Anregung mittels IR-Strahlung**

Für die Veranschaulichung der Versuchsergebnisse aller Anregungsmethoden wurde jeweils ein Wärmebild des lackierten und unlackierten Prüfkörpers mit drei aufgebracht Dichtstoffnähten verwendet. Wie sich im Verlauf der Laborversuche gezeigt hat, ist die Anwesenheitskontrolle der Nähte auf dem matten Probenblech besonders schwer zu realisieren. Die Gründe dafür sind die, durch den Pinselüberstrich bedingten, sehr geringen Schichtdicken.

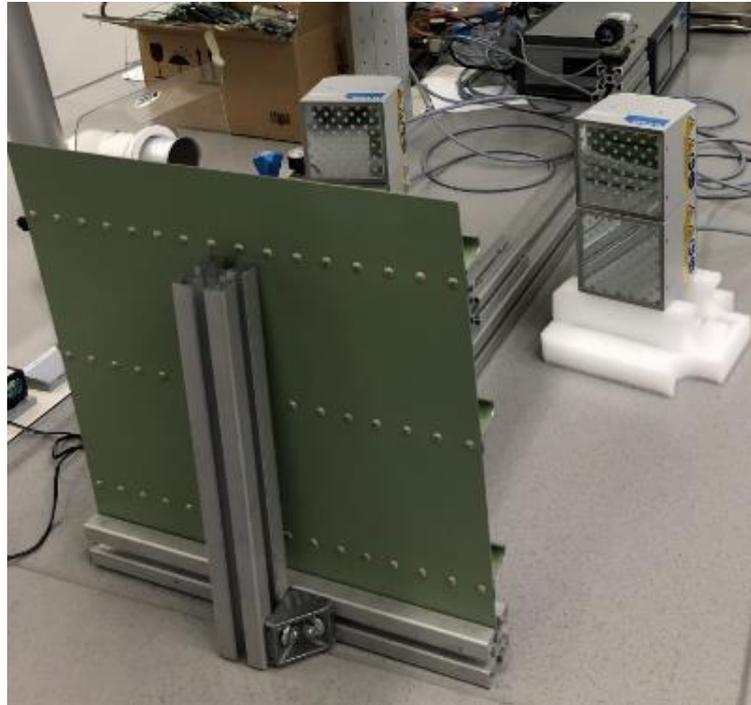
Anhand der Wärmebilder und Temperaturprofile auf der rechten Seite der oberen Abbildung lässt sich eine Aussage über die Detektierbarkeit der Dichtstoffnähte treffen. Wie am Temperaturprofil und im Wärmebild der lackierten Probe zu erkennen ist, kann lediglich die überdosierte Naht einigermaßen eindeutig erkannt werden. Die mittlere Naht, die den Idealfall darstellen soll, kann nicht ausreichend erkannt werden und die unterdosierte Naht ist gar nicht erkennbar. Anhand der Kurvenverläufe des Temperaturprofils kann keine Aussage über die Dimensionen der Nähte auf dem lackierten Prüfkörper getroffen werden.

Der untere Teil der Abbildung zeigt, dass die überdosierte und idealen Nähte des unlackierten Prüfkörpers sowohl im Wärmebild als auch im Temperaturprofil eindeutig identifizierbar sind. Dieses Erkenntnis ist auf die um ein vielfaches höheren Schichtdicken der Nähte auf den unlackierten Prüfkörpern zurückzuführen.

Ebenfalls erwähnenswert ist die Tatsache, dass es beim Aufheizprozess durch den IR-Strahler zu hohen thermischen Belastungen der Lichtquelle und des Bauteils gekommen ist. Bezieht man die Erkenntnisse aus den Laborversuchen auf eine mögliche Anwendung dieser Anregungsmethode in der Praxis, ist zu ihrem Nachteil festzustellen, dass es in Folge einer Störung beispielsweise zu einem Stillstand des Roboters kommen kann, was zur Folge hätte, dass das Bauteil kontinuierlich über eine längere Zeit mit IR-Strahlung bestrahlt wird und es dadurch zu einer thermischen Überbelastung und somit zu einer Zerstörung der untersuchten Dichtstoffnähte kommen kann. Außerdem ist festzuhalten, dass die Methode für mehrere aufeinanderfolgende Prüfungen weniger geeignet ist, weil der IR-Strahler eine relative lange Abkühldauer besitzt und somit vergleichbare, nacheinander ablaufende Prüfungen schwierig zu realisieren sind.

### *Anregung mittels UV-Strahler*

Für die Anregung mittels UV-Strahlung wurden vier UV-Flächenstrahler von der Firma Delo verwendet. Betrieben wurden die Flächenstrahler mit dem zugehörigen Steuerungsgerät Delolux pilot, mit dem es möglich ist die Beleuchtungsdauer und -intensität für jede der vier Flächenstrahler einzeln zu programmieren.



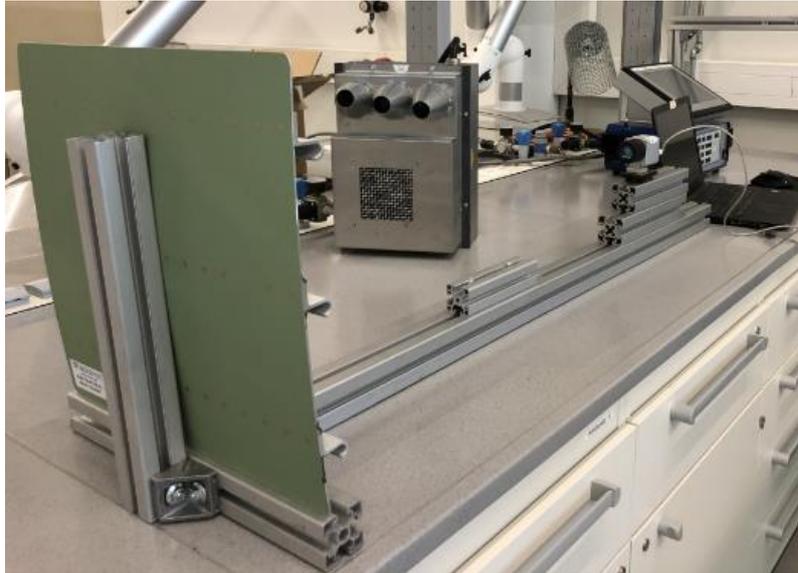
**Abbildung 38: Versuchsaufbau für die Anregung mittels UV-Strahlung**

Anhand der Wärmebilder und Temperaturprofile der beiden Prüfkörper ist zu erkennen, dass die Anregung mittels UV-Licht, vor allem bei geringen Schichtdicken, nicht ausreichend ist. Die verwendeten UV-Strahler bringen nicht genügend Energie auf, um eine aktive Thermografie-Prüfung an den verwendeten Prüfkörpern durchführen zu können.

Bei der Bestrahlung der Prüfkörper durch die UV-Strahler kam es zwar zu einer geringen thermischen Belastung der Strahler und der Bauteile und es wurde lediglich eine geringe Aufheizdauer benötigt, um die volle Leistung der UV-Strahler auf das Bauteil zu übertragen, allerdings wird vor allem in Hinblick auf die Versuchsergebnisse eine aktive Thermografie-Prüfung mit den verwendeten UV-Strahlern als Anregungsquelle eindeutig nicht empfohlen.

### *Anregung mittels Heizlüfter*

Für die konvektive Anregung mittels eines Heizlüfters wurde der Heizlüfter TeQua-Air von der Firma Matondo und das zugehörige Steuerungsgerät TeQua-Tronic 6 verwendet. Mit der Kombination aus Lüfter und Steuerungsgerät lassen sich Aufheiz- und Abkühlphasen hinsichtlich ihrer Dauer und Intensität programmieren.

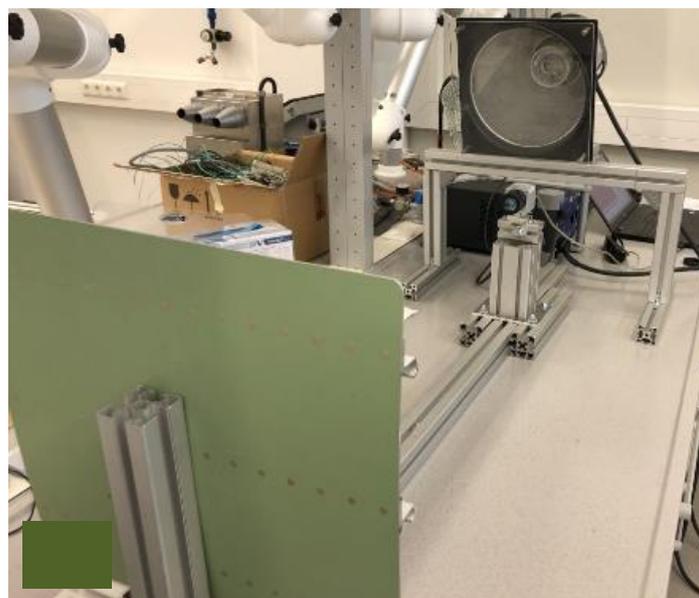


**Abbildung 39: Versuchsaufbau für die Anregung mittels Heizlüfter**

Nachdem verschiedene Aufheiz- und Abkühlszenarien in unterschiedlichen Positionen untersucht wurden, lässt sich festhalten, dass die konvektive Anregung mit dem verwendeten Heizlüfter für eine aktive Thermografie-Prüfung auszuschließen ist, weil keine brauchbaren Wärmebilder realisiert werden konnten. Eine homogene Erwärmung war dabei kaum realisierbar und anhand des Temperaturprofils konnte nicht zwischen Stringer und Dichtstoffnaht unterschieden werden. Der Einfluss von Reflektionen im Wärmebild ist vor allem in dieser Versuchsreihe deutlich geworden, wobei das matte Bauteil nicht so stark betroffen war, wie das sich spiegelnde Bauteil.

#### *Anregung mittels Blitzlampe*

Für die impulsartige Anregung mittels Blitzlampe wurde die Blitzlampe EH Pro 6000 und der dazugehörige Blitzgenerator TRIA 6000S von der Firma Hensel verwendet. Die Blitzleistung beträgt bis zu 6000 Ws und ist in 10 Stufen einstellbar. In der folgenden Abbildung 40 ist der Versuchsaufbau zu sehen.



**Abbildung 40: Versuchsaufbau für die Anregung mittels Blitzlampe**

Auffallend bei der Durchführung der Versuche mit der Blitzlampe und dem Blitzgenerator waren die besonders kurzen Taktzeiten. Es ist ein schnelles Verfahren, bei dem es durch die kurzzeitige Energieeinbringung zu einer geringen thermischen Belastung der untersuchten Bauteile kommt.

Betrachtet man die Wärmebilder und Temperaturprofile ist auffällig, dass die Dichtstoffnähte im Vergleich zu den anderen untersuchten Verfahren besonders eindeutig erkennbar sind. Anhand der Temperaturprofile ist es möglich, eine Aussage über die Dimensionen der untersuchten Nähte zu treffen. Wie in den Wärmebildern zu sehen, ist die Blitzanregung die einzige Methode, bei dem die besonders schmalen Nähte mit den geringsten Schichtdicken erkennbar sind.

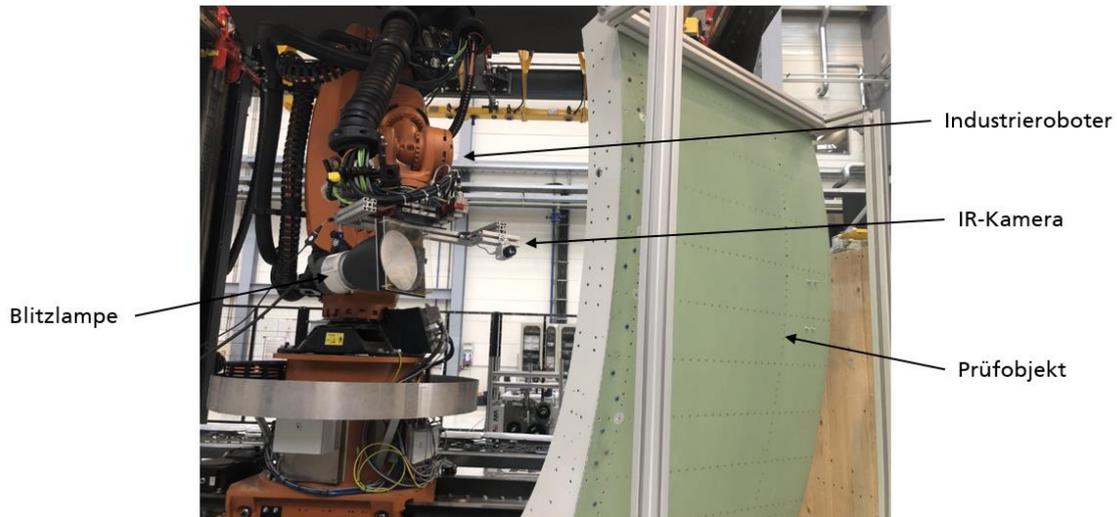
### *Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick*

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich nach Abschluss der Versuche die Methoden der konvektiven Anregung mittels Heizlüfter und der optischen Anregung durch UV-Strahlung als ungeeignet erwiesen haben. Die Anregung mittels IR-Strahlung lässt sich nur bedingt empfehlen, weil es bei der Verwendung der IR-Strahler zu sehr hohen thermischen Belastungen an Bauteil und Energiequelle gekommen ist und die Wärmebilder und Temperaturprofile nur bei hohen Schichtdicken eine ausreichende Naherkennung geliefert haben. Die Blitzlampe hat eindeutig die qualitativ besten Ergebnisse geliefert und zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sehr kurze Taktzeiten realisierbar sind und die thermische Belastung relativ geringgehalten wird. Ebenfalls ist neben der Anwesenheitskontrolle eine Prüfung auf Fehlstellen möglich.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden die Erkenntnisse über die geeignetste Anregungsmethode aus dem Labor, also die Blitzanregung, auf eine praxisbezogene, industrielle Umgebung übertragen. Dafür wurde ein Prototyp erstellt, der an einen Industrie-Roboter gekoppelt wird und mit dem es möglich ist, auch schwierig zugängliche Bereiche, wie den Intercom-Bereich, mittels einer aktiven Thermografie-Prüfung in möglichst wenig Durchläufen zu untersuchen.

## 2.4 AP 6: Validierung & Test

Nach der Verbundentscheidung, die Validierung der Dichtstoffapplikation und der Qualitätssicherung an getrennten Standorten durchzuführen konnten die jeweiligen Arbeiten auch unter Einfluss der COVID-19 Pandemie begonnen werden. In einem ersten Schritt wurde der im Labor aufgebaute Technologieträger in das Robotertechnikum übertragen und zunächst an einen Industrie Roboter transferiert (Abbildung 41).



**Abbildung 41: QS Messeinrichtung am Industrieroboter**

Um den Prototypen für die Thermografie-Prüfung mittels Blitzanregung unter möglichst realitätsnahen Bedingungen testen zu können, wurde für die Versuche am Industrieroboter ein Hautfeld verwendet. Die größte Herausforderung bestand vor allem bei der Zugänglichkeit der zum Teil sehr schwer zu erreichenden Stellen. Ebenfalls wurde darauf geachtet eine Prüfsequenz zu erstellen, bei der das Hautfeld in möglichst wenigen Durchgängen vollständig untersucht werden kann.

Das Hautfeld wurde mit verschiedensten Kehl- und Überlappnähten versehen, wobei bei der Applikation darauf geachtet wurde, dass eine möglichst breite Palette an Fehlstellen und Fehldosierungen abgebildet werden konnte. In der folgenden Abbildung sind die Fotos der applizierten Nähte mit den zugehörigen Wärmebildern gegenübergestellt worden. Anhand dieser Darstellung ist zu erkennen, dass sowohl eine Anwesenheitskontrolle, als auch eine Untersuchung auf Dosierfehler und Fehlstellen möglich ist. Vergleicht man die beiden Darstellungen miteinander ist zu erkennen, dass einige Fehlstellen, die optisch zunächst nicht sichtbar sind, im Wärmebild sichtbar gemacht werden.

### *Prüfsequenzen*

Um eine fehlerfreie Kommunikation zwischen IR-Kamera, Auswerterechner und Industrieroboter gewährleisten zu können, musste zusätzliche Hardware in das System integriert werden. Zunächst galt es, einen USB-Server zu integrieren, da die Verbindung zwischen IR-Kamera und Auswerterechner per USB erfolgt und die Kabellänge in diesem Fall auf wenige Meter begrenzt ist. Mit dem USB-Server ist es möglich, das Signal von USB auf Ethernet umzuwandeln, wodurch eine räumliche Trennung zwischen Bildaufnahme per IR-Kamera und Auswertung per Rechner möglich ist. Damit eine Kommunikation zwischen dem Roboter und der IR-Kamera stattfinden kann, war es außerdem erforderlich ein Industrielles Prozessinterface zu integrieren. Durch dieses Interface ist es unter an-

derem möglich, Aufnahmen zu starten und zu stoppen, wenn der Roboter die jeweilige Aufnahme- position erreicht hat. Aufbauend darauf, wurde nach gründlicher Prüfung der Zugänglichkeiten und optimalen Roboterpositionen für den jeweiligen Prüfabschnitt, ein Roboterprogramm entwi- ckelt, der die thermografische Prüfung nahezu automatisiert durchführt. Im nächsten Schritt galt es, die automatisiert erstellten Wärmebilder auszuwerten.

### *Kombination der aktiven Thermografie mit der technischen Bildverarbeitung*

Wie im dazugehörigen Abschnitt bereits erläutert, eignet sich die technische Bildverarbeitung her- vorragend zur Detektion von Fehlstellen und Fehldosierungen und lässt sich in Kombination mit der aktiven Thermografie auf die Detektion von nicht sichtbaren Fehlstellen erweitern. Zwingend erfor- derlich für eine zuverlässige Aussage über die Qualität der Nähte mittels Bildverarbeitungssoftware sind saubere, eindeutig identifizierbare Wärmebilder. Während die Voraussetzungen für informa- tionsreiche Wärmebilder eine gute Positionierung mittels Roboter und eine homogene Ausleuch- tung mittels Blitzlampe sind, ist die Voraussetzung für eine zuverlässige Auswertung mittels Bild- verarbeitungssoftware sorgfältig ausgewählte Parameter. Es muss zunächst individuell festgelegt werden, mit welchen Toleranzen die Nähte behaftet sein dürfen. Kommt es zu einer Abweichung von diesen Toleranzen, erfolgt eine Meldung der Software. Mit geringem Programmieraufwand wäre es also möglich, die automatisierte Aufnahme der Wärmebilder, um eine automatisierte Aus- wertung mittels Bildverarbeitungssoftware zu ergänzen und damit den gesamten Prozess zu auto- matisieren.

Wie in Abbildung 42 zu sehen ist, kann das QS-System ohne viel Aufwand von einem Industrieroboter auf einen Leichtbauroboter übertragen werden. Lediglich die Aufnahme- positionen und das Roboterprogramm müssen dafür verändert werden.



**Abbildung 42: Prototyp des QS-System an einem Leichtbauroboter**

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Dimensionen der zu prüfenden Bereiche sowohl vom Akti- onsbereich des Roboters, als auch von der Auflösung der verwendeten IR-Kamera abhängen. Es ist also durch Verwendung von IR-Kameras mit höheren Auflösungen möglich, einen viel größeren Bereich in einer Prüfsequenz zu untersuchen.

## 3 Verzeichnisse

### 3.1 *Abbildungsverzeichnis*

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Struktur des Auswahlprozesses nach dem filternden Trichter. ....                              | 4  |
| Abbildung 2: aerodynamische Naht.....  | 9  |
| Abbildung 3: Viskositätsmessdaten von einer MC780-C2 Messreihe.....  | 10 |
| Abbildung 4: Standtest nach Auswertung 2h.....   | 10 |
| Abbildung 5: Versuchsaufbau .....  | 13 |
| Abbildung 6: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufs.....  | 14 |
| Abbildung 7: rel. Dosiergenauigkeit mit Mittelwerten und Toleranzgrenzen.....                              | 14 |
| Abbildung 8: Verlaufende Dichtstoffraupe (C-2) nach Applikation.....                                       | 15 |
| Abbildung 9: Standvermögen mit Mittelwerten .....  | 15 |
| Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Durchmischungsqualität (diskret).....                              | 16 |
| Abbildung 11: Dauer der ersten Reaktionsphase mit Mittelwert .....   | 17 |
| Abbildung 12: Topfzeit mit Mittelwert.....   | 17 |
| Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Hautbildezeit (diskret) .....                                      | 18 |
| Abbildung 14: Abbindezeit mit Mittelwert und Datenblattangabe (TDS) .....                                  | 18 |
| Abbildung 15: Schmetterlingstest einer vermischten Kartusche als Referenz. ....                            | 21 |
| Abbildung 16: Schmetterlingstest mit unzureichender Durchmischung (Schlierenbildung). ....                 | 21 |
| Abbildung 17: Dichtstoffprobe nach erfolgtem Schmetterlingstest. ....                                      | 22 |
| Abbildung 18: Schmetterlingstests im IR Bild .....   | 22 |
| Abbildung 19: Applizierter Dichtstoff auf Probeblech (links) und Querschnitt der Klebung (rechts)<br>..... | 23 |
| Abbildung 20: Probebauteil der Machbarkeitsuntersuchung.....   | 25 |
| Abbildung 21: Röntgenprüfung der aerodynamischen Naht (links) und der Kehlnaht (rechts) ....               | 26 |
| Abbildung 22: Schematische Darstellung der Prüfkörper .....  | 29 |
| Abbildung 23: Kennlinie zur Charakterisierung des Verfahrens.....  | 29 |
| Abbildung 24: sequentielle Prüfung.....  | 30 |
| Abbildung 25: kontinuierliche Prüfung .....  | 31 |
| Abbildung 26: Versuchsaufbau .....   | 31 |
| Abbildung 27: Lufteinschlüsse sichtbar im IR-Bild des Probekörpers nach Anregung.....                      | 32 |
| Abbildung 28: Auswahlprozess zur Mischqualitätsbewertung.....  | 33 |
| Abbildung 29: Bewertung der Prüfmethode nach theoretischer Eignung und praktischer<br>Tauglichkeit.....    | 33 |
| Abbildung 30: Versuchsaufbau im Labor über Versuchsbauteil .....   | 34 |
| Abbildung 31: Toleranzbereiche bei der Bildverarbeitung an einem Testbauteil .....                         | 35 |
| Abbildung 32: Automatisierte Auswertung der Dichtnaht mit einer Bildverarbeitung .....                     | 36 |
| Abbildung 33: Versuchsaufbau für die IR-Thermografie.....  | 36 |
| Abbildung 34: Versuchsaufbau für die Erprobung eines Lichtschnittsensors .....                             | 37 |
| Abbildung 35: Prüfkörper .....   | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 36: Grundlegender Versuchsaufbau im Labor.....                 | 39 |
| Abbildung 37: Versuchsaufbau für die Anregung mittels IR-Strahlung ..... | 40 |
| Abbildung 38: Versuchsaufbau für die Anregung mittels UV-Strahlung ..... | 41 |
| Abbildung 39: Versuchsaufbau für die Anregung mittels Heizlüfter .....   | 42 |
| Abbildung 40: Versuchsaufbau für die Anregung mittels Blitzlampe .....   | 42 |
| Abbildung 41: QS Messeinrichtung am Industrieroboter.....                | 44 |
| Abbildung 42: Prototyp des QS-System an einem Leichtbauroboter .....     | 45 |

## 4 Durchführende Forschungsstelle

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)  
 - Klebtechnik und Oberflächen -

Automatisierung und Produktionstechnik

Ottenbecker Damm 12  
 21684 Stade

Tel.: 04141/ 78707-226

Leiter der Forschungsstelle:  
 Projektleiter:

Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer  
 Dipl.-Ing. Urs Roemer