Fraunhofer IFAM	15648 N/1 / 6
Name der Forschungsstelle(n)	IGF-Vorhaben-Nr. / GAG
	01.05.2008 bis 30.04.2010
	Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 01/05/2008 - 30/04/2010

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die

AiF

geförderten IGF-Forschungsvorhaben

[X] Normalverfahren

[ ] Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Die Untersuchung des Einsatzes von IR-Kamerasystemen für die Qualitätssicherung im Fertigungsprozess Kleben am Besipiel der Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

[ ] ist beigefügt

[ ] liegt bereits vor

[ ] wird fristgerecht nachgereicht

Bremen, 03.08.2010

Ort, Datum

Susanne Markus

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

DECHEMA

Name der AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)

Aktenzeichen der MV

AiF-Vorhaben-Nr: 15648 N/1

Blatt-Nr.:

AiF-Antrags-Nr.:

Fraunhofer
IFAM

Schlussbericht
AiF-Vorhaben-Nr.: 15648 N/1

Untersuchung des Einsatzes von IR-Kamerasystemen für die Qualitätssicherung im Fertigungsprozess Kleben am Beispiel der Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags

Dr. Susanne Markus, Dipl. Phys. Udo Meyer,
Dr. Peter Schiffels, Dipl. Ing. Marcel Sieben

Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung
Wiener Straße 12
28359 Bremen

Bremen, 03.08.2010

Danksagung

Unser Dank gilt den Mitgliedern des Projekt-begleitenden Ausschusses, die durch ihre fachliche Kompetenz und durch viele wertvolle Anregungen und Vorschläge wesentlich zum Gelingen des Projekts beigetragen haben. Insbesondere möchten wir uns bedanken bei:

Herrn Dr. Alexander Rosner von der Firma MAN Nutzfahrzeuge AG für das anwendungsbezogene Know How aus dem Bereich der klebtechnischen Fertigung, das er in das Projekt eingebracht hat, sowie die Bereitstellung von Prüfblechen, Aktivator- und Primerlösungen für die Durchführung der Versuche.

Herrn Alexander Kessler von der Firma Hilger und Kern GmbH für die Bereitstellung einer Dosieranlage zum definierten Auftrag der Aktivator- und Primerlösungen.

Herrn Helmut Vogt von der Firma Progress Werk Oberkirch AG für die Bereitstellung zylindrischer Stahlbauteile für die Durchführung der Versuche.

Herrn Hans Langhof von der Firma Arvin Meritor GmbH für die Bereitstellung von Rohglasscheiben zur Durchführung der Versuche.

Schließlich bedanken wir uns für die über die AiF gewährte finanzielle Unterstützung durch das BMWi.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse 4

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung 5
2.1 Anlass für den Forschungsantrag 5
2.2 Ausgangssituation 5
2.3 Stand der Forschung 6
2.4 Forschungsziel 6
2.5 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse 6
2.6 Lösungsweg und Erreichung des Forschungsziels 7

3 Experimente und Ergebnisse 8
3.1 Experimentelle/ Theoretische Voraussetzungen 8
3.1.1 Definition der Systeme/Randbedingungen 8
3.1.2 Thermografie 9
3.1.3 Laserkonfokalmikroskopie 12
3.1.4 Voraussetzungen Simulation 13
3.2 Untersuchung der Anwendbarkeit/ Systemzuverlässigkeit der Methode 16
3.2.1 Thermografieergebnisse 16
3.2.2 Simulationsergebnisse 28
3.3 Untersuchung zur Quantifizierung der Auftragsmengen 34
3.3.1 Thermografieergebnisse 34
3.3.2 Simulationsergebnisse 40
3.4 Aspekte zur fertigungstechnischen Integration und bedarfsgerechten Anpassung der Prozessüberwachung 43
3.4.1 Fertigungstechnische Integration der IR-Überwachung 43
3.4.2 Demonstration der Umsetzbarkeit des Verfahrens 46
3.4.3 Bedarfsgerechte Anpassung der Prozessüberwachung 48

4 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrags 50

5 Verwendung der Zuwendung, Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit 50

6 Wirtschaftliche Bedeutung des Themas für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) 51
6.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse 51
6.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU 51

7 Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse/ Transfer der Forschungsergebnisse 52

8 Förderhinweis 52

9 Durchführende Forschungsstelle 52

1 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Aktivatoren und Primer werden zur Verbesserung der adhäsiven Eigenschaften von Bauteiloberflächen in der klebtechnischen Fertigung eingesetzt. Nach ihrem Auftrag sind diese Substanzen mit dem bloßen Auge oft nicht mehr zu erfassen. Damit besteht die Gefahr, dass unzureichend vorbehandelte Bauteiloberflächen nicht erkannt und somit schadhafte Klebungen verursacht werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden daher die Einsatzmöglichkeiten der Thermografie zur Überwachung des Auftrags von Aktivator- und Primersystemen untersucht. Dabei wurde das Emissionsverhalten im IR-Wellenlängenbereich, das im Wesentlichen durch die Temperaturänderung infolge der Verdunstung der in den Aktivator- /Primersystemen enthaltenen Lösungsmittel beeinflusst wird, ausgewertet.

Neben grundlegenden Untersuchungen an Lösungsmitteltropfen und -filmen, wurde der Auftrag von Aktivatoren und Primern auf KTL-Blechen sowie Siebdruckoberflächen auf Glas betrachtet. Dabei wurde sowohl der manuelle als auch der automatisierte Auftrag berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass während des Aktivator- Primerauftrags ein Temperaturabfall auftritt, der hinreichend lange (20 bis 40 Sekunden) anhand der signifikanten Änderung der IR-Emission nachzuweisen ist. Untersuchungen unterschiedlicher Auftragsmengen führten zu dem Ergebnis, dass die Abnahme der IR-Emissionsverläufe nach Auftrag der Aktivator-/ Primersysteme auch zur Quantifizierung des Aktivator-/ Primerauftrags geeignet ist.

Die entsprechenden Wärmetransportvorgänge, die zur Temperaturänderung der Substrate beim Auftrag der Aktivatoren und Primer führen, wurden durch numerische Integration der Wäremetransportgleichungen unter vorgegebenen Randbedingungen wie Geometrie, Temperaturgradient, Wärmeleitfähigkeit, Strahlungsverlust usw. simuliert. Die Ergebnisse decken sich weitgehend mit denen der experimentellen Untersuchungen.

Darüber hinaus wurden Hinweise auf die fertigungstechnische Umsetzung der Methode zur Qualitätssicherung und zur bedarfsgerechten Anpassung einer Systemlösung gegeben. Für den prinzipiellen Nachweis des Aktivator- bzw. Primerauftrags auf eine Bauteiloberfläche lassen sich die im vorliegenden Forschungsvorhaben ermittelten Erkenntnisse auf einfache Detektorsysteme übertragen. Diese sind aufgrund ihres geringen Preises besonders für KMU von großem Interesse.

Die industrielle Umsetzbarkeit der Überwachung des Auftrags haftvermittelnder Substanzen wurde im Rahmen eines Technikumsversuchs gezeigt. Dabei wurde während des robotergeführten Aktivatorauftrags auf eine Siebdruckoberfläche das Kamerabild mit dafür erstellten Algorithmen ausgewertet.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Anlass für den Forschungsantrag

Beim Einsatz von Aktivatoren oder Primern zur Verbesserung der adhäsiven Eigenschaften von Bauteiloberflächen im Klebprozess, sind diese Substanzen nach dem Auftrag mit dem bloßen Auge oft nicht mehr zu erfassen. Damit besteht die Gefahr, dass unzureichend vorbehandelte Bauteiloberflächen nicht erkannt und somit Qualitätsmängel oder sogar Schadensfälle verursacht werden. Die Überwachung des Auftrags von Aktivator- oder Primersystemen ist daher eine sinnvolle Maßnahme zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Klebverbindungen und zur Vermeidung von Schadensfällen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die Anwendungsmöglichkeiten einer IR-Kameraüberwachung zur Detektion des Primer- bzw. Aktivatorauftrags untersucht. Dabei werden zur Detektion des erfolgten Auftrags die unterschiedlichen IR-Emissionen von Substratoberfläche und aufgetragener Substanz genutzt. Die in der Klebtechnik verbreitet eingesetzten Aktivator- bzw. Primersysteme enthalten im Allgemeinen Lösungsmittel, die nach dem Auftrag verdunsten und damit eine Abkühlung der Substratoberfläche bewirken. Da das Emissionsverhalten im IR-Wellenlängenbereich im Wesentlichen durch die Temperaturänderung infolge der Substratabkühlung bestimmt wird, kann der Aktivator-/ Primerauftrag über die Verdunstungskälte mit Hilfe von IR-Kamerasystemen als Kontrast im digitalen Bild erfasst und weiter verarbeitet werden.

2.2 Ausgangssituation

Im Fertigungsprozess Kleben müssen die adhäsiven Eigenschaften einer Oberfläche so eingestellt werden, dass im Verbund mit entsprechenden Klebstoffen die vorgegebenen Festigkeiten erzielt werden und zudem eine entsprechende Langzeitbeständigkeit erreicht wird. Daher erfolgen vor der Applikation des Klebstoffs häufig mehrere Oberflächenbehandlungschritte. Oft wird die Oberfläche zuerst gereinigt und entfettet. Anschließend erfolgen mechanische, physikalische oder chemische Oberflächenvorbehandlungsschritte. Zur Nachbehandlung der Oberflächen werden häufig Aktivatoren und Primer eingesetzt. Der Einsatz von Primern und Aktivatoren zur Verbesserung der Haftung von Klebstoffen auf Bauteiloberflächen ist Stand der Technik in vielen klebtechnischen Anwendungen wie z.B. dem Scheibenkleben im Fahrzeugbau.

Eine visuelle Beurteilung dieser Vorbehandlung ist in der Regel nicht oder nur schwer möglich, da farblose Systeme bzw. mit dem Untergrund farbidentische Substanzen aufgetragen werden. Im Fall der Aktivatoren kommt hinzu, dass die an der Oberfläche verbleibenden Schichten nur eine Dicke von wenigen Monolagen aufweisen und daher mit dem Auge prinzipiell nicht wahrgenommen werden können.

2.3 Stand der Forschung

Im Bereich klebtechnischer Fertigung existieren vereinzelte Maßnahmen, um den Auftrag der Aktivator-/ Primersubstanzen zu unterstützen. Dazu gehören z.B. Kontrollmaßnahmen an den Auftragsflaschen oder der Einsatz von Schablonen und Masken. Ein sicheres Verfahren zum Nachweis des Aktivator- oder Primerauftrags existiert zurzeit nicht. Ein indirektes Verfahren beruht auf der Verwendung von Farbstoffen oder Fluoreszenzmarkern. Diese Zusatzstoffe ermöglichen die visuelle Erfassung der aufgetragenen Substanzen. Sie sind jedoch kostenintensiv und dürfen die Eigenschaften der Primer und Aktivatoren nicht verändern.
Die Thermografie wird häufig als zerstörungsfreie Prüftechnik (ZfP) im Bereich der Werkstoffprüfung von Materialien und Bauteilen eingesetzt. Ein bekanntes Anwendungsfeld im Bereich der Zur Qualitätssicherung ist Überprüfung der Wärmedämmung von Gebäuden (Bauthermografie).
Mit Hilfe von IR-Kameras werden lokale Unterschiede in der Emission von IR-Strahlung an Bauteiloberflächen als Kontrast in den entsprechenden Aufnahmen wiedergegeben. Die IR-Strahlungsemission wird insbesondere durch Temperaturänderungen beeinflusst. Der Kontrast wird im digitalen Bild erfasst und kann automatisiert ausgewertet werden. Die entsprechenden Wärmetransportvorgänge, die zur Temperaturänderung an der Oberfläche beim Auftrag der Aktivatoren und Primer führen, können durch numerische Integration der Wäremetransportgleichungen unter vorgegebenen Randbedingungen wie Geometrie, Temperaturgradient, Wärmeleitfähigkeit, Strahlungsverlust usw. simuliert werden. Forschungsziel/Ergebnisse/Lösungsweg

2.4 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Eignung und die Anwendung von IR-Kamerasystemen zur Echtzeiterfassung des Aktivator-/ Primerauftrags auf zu klebenden Bauteiloberflächen zu untersuchen. Im Rahmen der Untersuchungen sollte die Breite der Einsatzmöglichkeiten bzw. die Grenzen der Anwendbarkeit der Methode für das betrachtete Einsatzgebiet ermittelt werden. Die Untersuchung der Möglichkeiten zur quantitativen Beurteilung des Auftrags stellte in diesem Zusammenhang eine besondere Herausforderung dar. Zudem sollten Konzepte zur fertigungstechnischen Umsetzung der Methode als Inline-Analyseverfahren erstellt werden und entsprechende Hinweise zur bedarfsgerechten Anpassung einer Systemlösung erfolgen.

2.5 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde das Verfahren der Thermografie erstmals zum Nachweis von Aktivator- und Primersystemen eingesetzt. Diese Art der Überwachung des Auftrags von Aktivator-/Primersystemen stellt eine neuartige prozessintegrierte Qualitätssicherungsmaßnahme dar.
Anbieter von IR-Kamerasystemen (KMU) werden auf Basis der Projektergebnisse in die Lage versetzt, entsprechende Systeme für die Überwachung von Klebprozessen zu entwickeln und anzubieten. Betriebe, die in ihrer Fertigung Aktivator- oder Primersysteme einsetzen, können mit Hilfe eines solchen Kamerasystems die Sicherheit des Fertigungsschrittes Kleben in ihrer Prozesskette und damit die Qualität ihrer Produkte erhöhen.

2.6 Lösungsweg und Erreichung des Forschungsziels

In Zusammenarbeit mit dem Projekt-begleitenden Ausschuss wurden Anforderungsprofile erstellt, anhand derer die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von IR-Kamerasystemen zum Nachweis der Aktivator-/ und Primersysteme demonstriert werden sollten. Dabei wurden Materialien und Bedingungen berücksichtigt, die allgemeingültige Aussagen bezüglich der Anwendbarkeit des Verfahrens erlauben. Bei der Auswahl der Substrate wurden Materialien gewählt, deren thermische Eigenschaften sich signifikant unterscheiden (Metall und Glas). Zudem erfolgte eine Analyse typischer Schadensfälle, die in der Fertigung durch fehlerhaften Auftrag der Aktivator- und Primersysteme entstehen. Diese wurden im Labor experimentell nachgestellt, um die geeigneten/relevanten Prozessbedingungen für einen Einsatz von IR-Kamerasystemen in der Qualitätskontrolle sicher zu stellen.

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgte der Auftrag der ausgewählten Haftvermittlersysteme an den vorab definierten Substratoberflächen unter gezielter Variation

- der Applikationssysteme
- der Auftragsgeometrien
- der Auftragsgeschwindigkeiten
- der Art des Auftrags (manuell/automatisiert)

Mit Hilfe einer für Forschungszwecke geeigneten IR-Kamera wurden dabei die Parameterfenster zur Erzeugung optimaler Ergebnisse zum Nachweis von Aktivator- und Primersystemen bestimmt.

Die praktischen Versuche zur Anpassung und Optimierung des Verfahrens wurden durch FEM-Simulation unterstützt. Im Fokus lag die Simulation der durch die Verdunstung der in den Aktivator- und Primersystemen enthaltenen Lösungsmittel hervorgerufenen Wärmetransportvorgänge.

Die Quantifizierung der Auftragsmengen von Aktivator- oder Primersystemen erfolgte anhand von Korrelationen der Auftragsmengen mit den beobachtbaren Signalintensitäten der IR Kamerasysteme. Dabei wurden definierte Substanzmengen mittels einer Dosieranlage auf die Oberfläche aufgebracht, die einen präzisen und reproduzierbaren Auftrag der ausgewählten Auftragssysteme ermöglichte. Zur Angabe genauer Konzentrationen der haftvermittelnden Substanzen an den entsprechenden Oberflächen fand eine quantitative Analyse der aufgetragenen Systeme mit Hilfe von Referenzmethoden statt.

Die Untersuchungen zur Quantifizierung der Aktivator- und Primermengen wurde ebenfalls durch FEM-Simulation unterstützt. In der Simulation erfolgte analog zum Experiment eine Variation der Menge des aufgetragenen Aktivators/Primers.

Zudem wurden Konzepte zur Integration der Methode in bestehende Fertigungsprozesse entwickelt. So wurde eine effiziente Kombination von Auftrag und Nachweis der Aktivator-/ Primersysteme bezüglich der Anordnung und Ansteuerung der Hardwarekomponenten erarbeitet.

In diesem Zusammenhang wurden auch Routinen zur automatisierten Bildauswertung erstellt, die den Auftrag und die Lage der aufgetragenen Substanzen bestimmen und bewerten. In Anlehnung an die optimalen Parameter zur IR-Bilderfassung relevanter Primer-/

Aktivatorsysteme und des fertigungstechnischen Konzeptes wurden Aussagen zur Konzipierung einer fertigungsangepassten Systemlösung gemacht. Dabei wurde auch der Aspekt der Kosteneinsparung bei der Herstellung eines solchen Überwachungssystems berücksichtigt.
Der automatisierte Einsatz des Verfahrens zur Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags wurde am Ende des Projektes im IFAM-Anwendungslabor gezeigt.

3 Experimente und Ergebnisse

3.1 Experimentelle/ Theoretische Voraussetzungen

3.1.1 Definition der Systeme/Randbedingungen

Glas mit Keramiksiebdruck und KTL-beschichtetes Aluminium wurden als Fügeteiloberflächen zur Durchführung der Versuche gemeinsam mit dem Projekt-begleitenden Ausschuss ausgewählt. Zudem wurden Stichprobenversuche mit einem zylindrischen Stahlbauteil durchgeführt.
Als Aktivator-/ Primersysteme wurden die Aktivatorlösung „Sika Aktivator" und die Primerlösung „Sika 206 G+P" verwendet. Zudem wurden Modellversuche mit Isopropanol als gängiges Lösungsmittel durchgeführt. Die Versuche wurden unter Laborbedingungen (Temperatur: ca. 22 °C, r.L.: ca. 40 %) durchgeführt. Eine Variation der Umgebungsbedingungen wurde vom PbA als irrelevant bewertet.

Im Rahmen des Projektes erfolgte der manuelle Auftrag des Primers/Aktivators mit Hilfe von verschiedenen Applikatoren. Z.B. wurde mit Hilfe eines mit Aktivator bzw. Primer getränkten Zellstofflappens manuell über die Probenoberfläche gewischt. Im Fall des Aktivatorauftrags wurde anschließend wie in der industriellen Praxis mit einem trockenen Zellstofflappen nachgewischt (wipe-on/wipe-off). Dadurch soll überschüssige Lösung von der Oberfläche entfernt werden und eine Überbehandlung vermieden werden. Eine Dosierung der Auftragsmenge ist bei diesem Verfahren nicht möglich. Des Weiteren erfolgt der manuelle Auftrag von Aktivator oder Primer durch eine Kunststoffflasche mit Schwammaufsatz. Als Referenzsystem, das eine sehr genaue Dosierung der Auftragsmenge ermöglicht, wurde zudem eine halbautomatische Pipette verwendet.
Als automatisierter Auftrag erfolgte der robotergestützte Schwamm- bzw. Sprühauftrag. Der definierte Auftrag erfolgte hierbei mit einer Dosieranlage, die aus einer Dosiereinheit, mit der die Auftragsmenge eingestellt wird und einem Dosierventil, das die Durchflussgeschwindigkeit regelt, besteht. Das Dosierventil ist an einem Roboterarm befestigt und kann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten über die Probe gefahren werden.
Die tatsächlich auf die Probenoberfläche aufgebrachte Aktivator-/ Primermenge wird anhand der Verfahrgeschwindigkeit des Roboters und der Durchflussgeschwindigkeit des jeweiligen Auftragssystems bestimmt.

3.1.2 Thermografie

Physikalische Grundlagen der Thermografie

Jeder Körper emittiert auf Grund der thermischen Bewegung seiner Atome oder Moleküle elektromagnetische Strahlung. Ein wichtiger Bezugskörper stellt der Schwarze Strahler dar, der eine Reihe von idealisierten Eigenschaften besitzt:

- das Spektrum der von diesem idealen thermischen Strahler emittierten elektromagnetischen Strahlung hängt nur von seiner Temperatur ab
- die vom Schwarzen Strahler absorbierte Energie ist gleich der von ihm emittierten Energie
- die emittierte Strahlung ist richtungsunabhängig

Das Emissionsspektrum des Schwarzen Strahlers[1] wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz (1) beschrieben:

$$M(T,\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1\right)} \qquad (1)$$

M: spezifische Ausstrahlung eines idealen thermischen Strahlers
T: absolute Temperatur
λ: Wellenlänge
c: Lichtgeschwindigkeit.
h: Plancksches Wirkungsquantum
k: Boltzmann-Konstante

In Abbildung 1 ist das Plancksche Strahlungsgesetzt in doppeltlogarithmischer Auftragung mit T als Parameter dargestellt. Anhand der emittierten Strahlung eines idealen Strahlers ist es demnach möglich, seine Temperatur anzugeben.

[1] Realisieren lässt sich ein schwarzer Strahler beispielsweise durch eine kleine Öffnung in einem Hohlraum. In guter Näherung emittiert eine derartige Öffnung Schwarzkörperstrahlung.

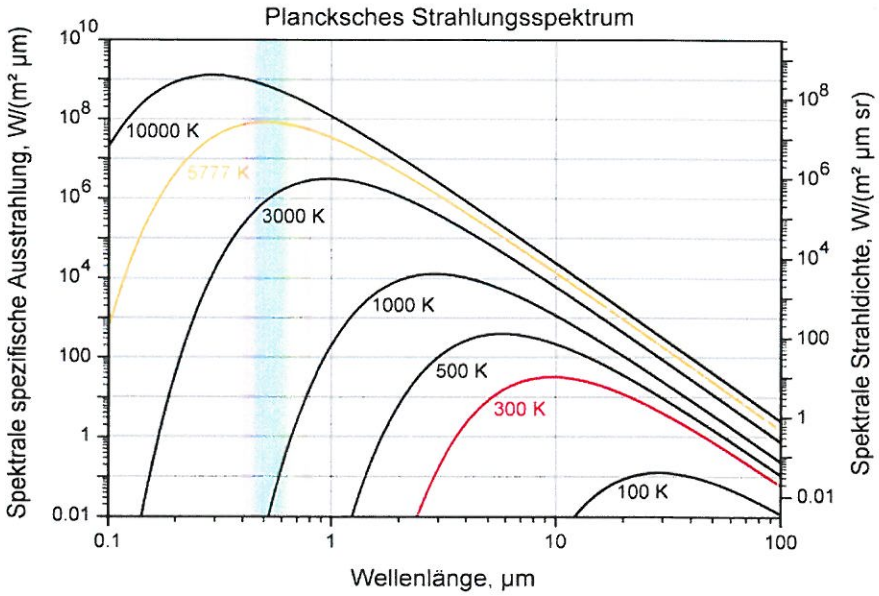

Abbildung 1: Darstellung des Planckschen Strahlungsgesetzes in doppeltlogarithmischer Auftragung

In der Regel weichen reale physikalische Systeme jedoch von dem idealen Verhalten eines Schwarzen Strahlers ab. Hinsichtlich der Strahlungsbilanz realer Oberflächen wird nur ein Teil der auf die Oberfläche treffenden Strahlung absorbiert, während ein Teil der Strahlung reflektiert oder transmittiert wird. Für den Absorptionsgrad α, den Reflexionsgrad ρ und den Transmissionsgrad τ einer Oberfläche gilt in jedem Wellenlängenbereich:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \qquad (2)$$

Grundlage der IR-Messtechnik ist nun das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz, das besagt, dass der Absorptionsgrad dem Emissionsgrad ε entspricht. Damit lautet die Strahlungsbilanz:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \qquad (3)$$

Die von einem Körper ausgehende Strahlung stammt also nur zu einem Teil von ihm selber, während weitere Teile von Wärmequellen oder Senken in der Umgebung stammen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Spektrum der emittierten Strahlung und der Temperatur des Körpers ist damit nicht mehr gegeben.

Erschwerend kommt hinzu, dass auch das Kirchhoffsche Gesetz weiteren Einschränkungen unterworfen ist. Streng gilt es nur für graue, diffuse Strahler, d.h. der Emissionsgrad muss wellenlängenunabhängig und die Emission richtungsunabhängig sein. Polymere besitzen eine ausgeprägte Wellenlängenabhängigkeit des Emissionsgrades, sind jedoch in erster Näherung diffuse Strahler. Metalle dagegen besitzen zusätzlich noch eine ausgeprägte Winkelabhängigkeit der Emission.

Technische Nutzung der Thermografie

Das IR-Spektrum wird auf der kurzwelligen Seite bei einer Wellenlänge von 780 nm durch den sichtbaren Bereich und auf der langwelligen Seite durch die Terahertzstrahlung bei rund 100 µm begrenzt. Für die IR-Thermografie ist der Bereich bis ca. 15 µm relevant. Aufgrund starker

atmosphärischer Absorptionsbanden lässt sich das IR-Spektrum in drei technisch nutzbare Wellenlängenbereiche unterteilen (s. Abbildung 2).

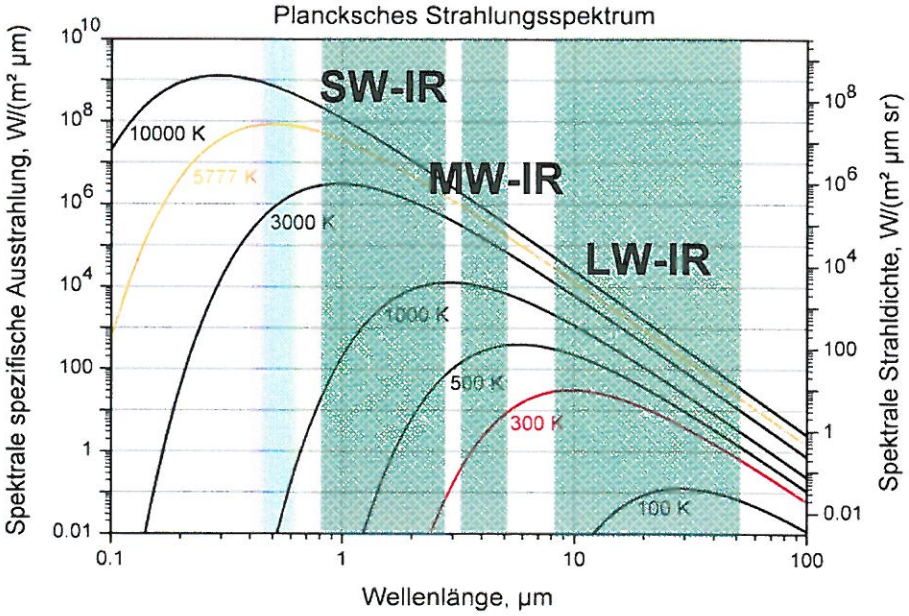

Abbildung 2: Plancksches Strahlungsspektrum mit Unterteilung des IR-Spektrums (gelb: SW-IR, schmaler grüner Balken: MW-IR, breiter grüner Balken: LW-IR)

Für Umgebungsbedingungen mit Temperaturen zwischen 15°C und 25°C liegt die maximale Intensität im langwelligen Bereich (LW-IR) des IR-Spektrums, während die größte Änderung der Intensität und damit die größte Empfindlichkeit im mittleren IR-Bereich (MW-IR) liegt. Der kurzwellige Bereich (SW-IR) spielt aufgrund der sehr geringen Strahlungsintensität für Anwendungen bei Raumtemperatur eine untergeordnete Rolle. Für die Untersuchungen im vorliegenden Forschungsvorhaben ist daher eine IR-Kamera für den mittleren IR-Bereich eingesetzt worden. Die Taurus 110k (IR-CAM Erlangen) hat einen Cadmium-Quecksilber-Tellurid Detektor, der Messungen von 1,5 µm bis 5 µm ermöglicht. Mit Hilfe der für Forschungszwecke geeigneten Kamera kann eine Temperaturauflösung 20 mK erreicht werden.

Die detektierten IR-Intensitäten werden üblicherweise in einem Graustufen-, oder Falschfarbenbild dargestellt. Die Graustufen oder Falschfarben entsprechen dabei keinen Wellenlängen im IR, sondern charakterisieren die Emission im gesamten, von der IR-Kamera erfassten Spektrum. Die Skalierung ist willkürlich und kann an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. In Abbildung 3 ist die Emission eines Lösungsmitteltropfens auf einer Siebdruckoberfläche mit Hilfe unterschiedlicher Farbpaletten dargestellt.

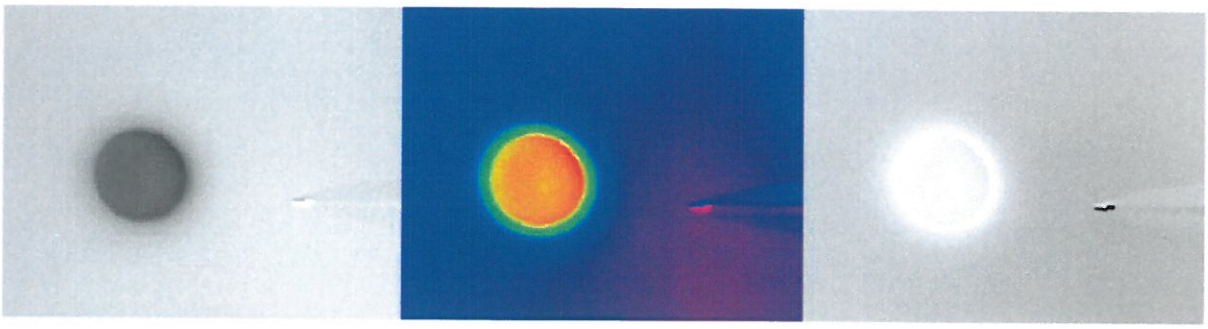

Abbildung 3: IR-Intensität eines Lösungsmitteltropfens Graustufenbild (Links), Falschfarbendarstellung (Mitte), spezielle Farbpalette, die die mittlere Intensitäten hervorhebt (Rechts)

3.1.3 Laserkonfokalmikroskopie

Neben der Thermografie wurde die Laserkonfokalmikroskopie zur Charakterisierung der Aktivator- und Primerfilme eingesetzt. Die Laserkonfokalmikroskopie ist eine berührungslose Messmethode zur Erzeugung hochaufgelöster Abbildungen der Oberflächentopologie. Im Gegensatz zur klassischen Mikroskopie wird nicht die ganze Probe gleichzeitig erfasst, sondern nur kleine nahezu beugungsbegrenzte Areale.

Ein Laserstrahl wird durch ein Objektiv mit kurzer Brennweite fokussiert. Liegt die Probenoberfläche in der Fokusebene, wird das Licht an dieser reflektiert, und gelangt durch das Objektiv über einen halbdurchlässigen Spiegel auf einen lichtempfindlichen Detektor. Die Probe wird horizontal und vertikal punktförmig abgerastert. Daraus lässt sich eine 3-dimensionale Abbildung der Oberfläche erzeugen.

Die Versuche wurden mit dem Laserkonfokalmikroskop VK-9710 der Firma Keyence durchgeführt. Die Höhen- sowie die Lateralauflösung beträgt 0,001 µm, die laterale Auflösung: 0,001 µm. Die Wellenlänge des Lasers liegt bei 408 nm.

3.1.4 Voraussetzungen Simulation

Ein Ziel des Projekts bestand darin, die experimentellen Untersuchungen durch geeignete numerische Simulationsverfahren zu unterstützen. Die Grundlage der Simulation bilden die Wärmetransportvorgänge im Substrat und in dem aufgetragenen Aktivator oder Primer, welche durch Temperaturgradienten infolge der Verdunstung des Tropfens ausgelöst werden. Entscheidend für die quantitative Analyse des Kontrasts im IR-Kamerabild ist die Verdunstungskälte des Lösungsmittels (Verdampfungsenthalpie), die zu einer detektierbaren Abkühlung der Substratoberfläche führt. In Folge der Verdunstung tritt als sekundärer Effekt eine Wiedererwärmung des Substrats ein, welche den detektierbaren Kontrast verringert. In Abbildung 4 sind die physikalische Problemstellung sowie die numerische Umsetzung am Beispiel des Tropfenauftags schematisch wiedergegeben.

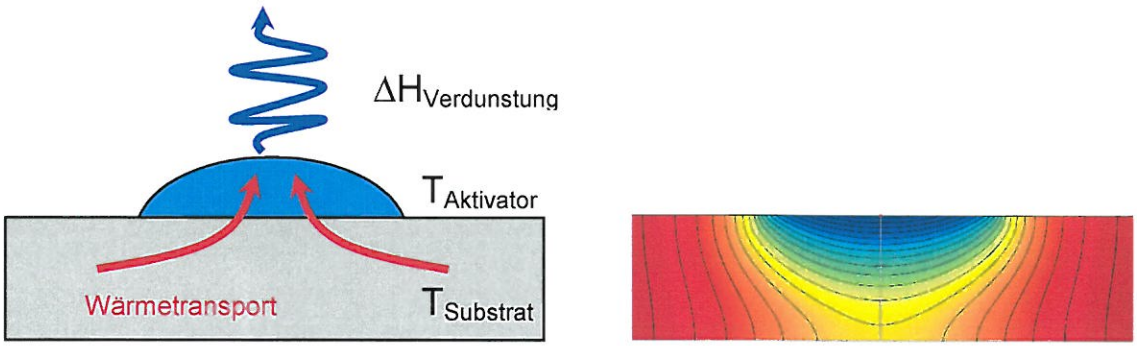

Abbildung 4: Schematische Darstellung der in der Simulation zu berücksichtigenden Wärmetransportprozesse (Links) sowie die simulierte Temperaturverteilung (Rechts) am Beispiel des Tropfenauftrags

Grundsätzlich sind in der Modellierung alle relevanten Wärmetransportmechanismen wie Konvektion im flüssigen Medium, Konduktion im Festkörper sowie die Wärmeverluste durch Abstrahlung zu berücksichtigen. Letztere ist insbesondere abhängig vom Emissionsvermögen der Oberfläche. Dem Stand der Technik entsprechend können Wärmetransportvorgänge durch numerische Integration der zugrunde liegenden partiellen Differentialgleichungen unter vorgegebenen Randbedingungen wie Geometrie, Temperaturgradient, Wärmeleitfähigkeit, Strahlungsverlust usw. simuliert werden [Fra96, Bir01]. Im Fall der Verdunstung des Lösungsmittels von der Oberfläche wird der Temperaturgradient zunächst durch die Verdunstungskälte an der Oberfläche induziert und ist damit von den thermodynamischen Eigenschaften des Lösungsmittels abhängig.

Die Komplexität der Fragestellung kann reduziert werden, wenn sowohl die Strahlungsverluste als auch der Wärmetransport durch Konvektion eine untergeordnete Rolle spielen. Im Fall der Verdampfung von Wassertropfen auf heißen Oberflächen konnte in der Literatur gezeigt werden, dass die Effekte des Wärmeverlustes durch Abstrahlung nur eine geringe Rolle

spielen [Tar09, Tar07]. Experimentelle Untersuchungen zur Verdampfung der Wassertropfen lassen sich auf der Grundlage dieser Näherung deuten.

Unter diesen Bedingungen kann die Wärmetransportgleichung ausgedrückt als Gleichung für die zeitliche Änderung der Temperatur im Substrat wie folgt vereinfacht werden:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = Q - \rho C_p \mathbf{u} \nabla T \qquad (4)$$

ρ : Dichte $[kg\ m^{-3}]$
C_p : Spezifische Wärmekapazität $[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
T : Temperatur $[K]$
k : Thermische Leitfähigkeit $[Wm^{-1}K^{-1}]$
$\mathbf{u}$: Geschwindigkeitsvektor (Konvektion) $[ms^{-1}]$
Q : Wärmequelle- oder Senke $[Wm^{-3}]$

Speziell im Fall ortsunabhängiger, isotroper thermischer Leitfähigkeiten gilt unter Vernachlässigung von Konvektionsströmen folgende Gleichung, welche für sämtliche im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Simulationen zu Grunde gelegt wird [Bir01, Fra96]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k\nabla^2 T = Q \qquad (5)$$

Die Verdunstung des Lösungsmittels im Aktivator oder Primer definiert die Wärmesenke und ist über die Einwirkzeit sowie über die bekannte Verdampfungsenthalpie der Lösungsmittel zugänglich. Am Ort des Aktivator oder Primerauftrags gilt – wieder unter Vernachlässigung von Konvektionsströmen – für den Zeitraum der Verdunstung die Randbedingung:

$$\mathbf{n} \cdot k\nabla T = q_0 \qquad (6)$$

$\mathbf{n}$: Vektor normal zur Oberfläche
q_0 : Wärmefluss zum Substrat $[Wm^{-2}]$

In den Simulationen wird die zeitliche Veränderung der Tropfengeometrie durch die Verdunstung berücksichtigt, indem der Ort an welchem die Randbedingung (6) gilt, während der Integration der Wärme-Transportgleichung entsprechend der Verdunstung des Tropfens oder des Flüssigkeitsfilms im Fall des Schwammauftrags verändert wird. Die Randbedingung für die Wärmesenke wird somit explizit zeitabhängig. Nach dem Verdunsten des Tropfens verschwindet die Wärmesenke und es kommt zum Temperaturausgleich durch Wärmetransport im Substrat. Für alle weiteren Randbedingungen wurde thermische Isolation (q_0=0) angenommen.

Die Simulationen wurden mit dem Programmpaket *COMSOL-Multiphysics®* – Version 3.5 (*Heat-Transfer Module*) durchgeführt, welches eine Finite-Element Diskretisierung der Simulationsdomäne verwendet und eine Stoff-Datenbank zu thermodynamischen Daten wie Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten umfasst. Die Wärme-Transportgleichung wurde als Anfangswertproblem behandelt, wobei als Anfangsbedingung in jedem Fall eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Substrat angenommen wurde. Die zeitliche Entwicklung der Temperatur im Substrat wurde durch numerische Integration der Transportgleichung unter Verwendung variabler Zeitschritte bestimmt. Dabei kann die Symmetrie des Systems z.B. die zweidimensional axial-symmetrische Geometrie des Tropfens in der Simulation zur Reduktion des Rechenaufwandes berücksichtigt werden. Entsprechend der experimentellen Vorgaben wurde der Aktivator- oder Primerauftrag als Wärmesenke mit bekannter Verdampfungsenthalpie dargestellt, wobei Wärmetransport-Prozesse im Lösungsmittel unberücksichtigt bleiben.
Das der Simulation zugrunde liegende Modell wurde zunächst anhand der experimentell detektierten Kontraste sowie deren zeitlicher Entwicklung am Beispiel idealisierter Geometrien (Aktivator/Primer Tropfen auf einer planaren Substratoberfläche) validiert wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt wird. In Abschnitt 3.3.2 wird die Modellierung genutzt, um eine Korrelation zwischen der Auftragsmenge und den experimentell beobachtbaren Kontraständerungen herzustellen.

Bir01 R. B. Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfood, Transport Phenomena, John Wiley & Sons Inc; 2nd Edition, 2001

Fra96 Frank P. Incropera and David P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th edition, John Wiley & Sons, New York, 1996

Ela00 Elaine S. Oran, Jay P. Boris, Numerical Simulation of Reactive Flow, Cambridge University Press, 2nd Edition, 2000

Tar09 P. Tartarini, M.A. Corticelli, L.Tarozzi, Dropwise Cooling: Experimental Tests by Infrared Thermography and Numerical Simulations, Applied thermal Engineering, 29, 1391 – 1397, 2009

Tar07 L. Tarozzi, A. Muscio, P. Tartaini, Experimental Tests of Dropwise Cooling on Infrared-Transparent Media, Experimental Thermal and Fluid Science 31, 857-865, 2007

3.2 Untersuchung der Anwendbarkeit/ Systemzuverlässigkeit der Methode

3.2.1 Thermografieergebnisse

Untersuchung der Emissionseigenschaften von Probenoberflächen und Auftragssystemen

Zur Bestimmung des Emissionsgrades der Probenoberflächen wurden die Proben aufgeheizt und die Emission der Probenoberfläche mit Hilfe der IR-Kamera bestimmt. Zur Korrelation von Emissions- und Temperaturmessungen wurde die Oberflächentemperatur mit einem Kontaktthermometer gemessen. Der Emissionsgrad ergibt sich durch Bezug auf einen schwarzen Strahler (Emissionsgrad ε = 1). Für die KTL-Oberfläche wurde dabei ein Emissionsgrad von ε = 0,53 und für die Siebdruckoberfläche ein Emissionsgrad von ε= 0,89 bestimmt. Die Variation des Einfallswinkels zwischen 15° und 30° führte bei beiden Oberflächen zu keiner signifikanten Variation des Emissionsgrades. Die verwendeten Substrate sind aufgrund der gemessenen Emissionsgrade prinzipiell für die Untersuchung mit IR-Kameras geeignet.

Aktivator und Primer unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Emissionseigenschaften. Bei dem verwendeten Primer handelt es sich um einen Schwarzprimer, der auf ebenfalls schwarzen Siebdruckoberflächen in Schichtdicken von mehreren Mikrometern aufgetragen wird. Daraus resultiert ein hoher Emissionsgrad, der in etwa dem der Siebdruckoberfläche entspricht. Der verwendete Aktivator ist dagegen transparent und wird in dünnen Filmen aufgetragen. Für den Aktivator wurde daher überprüft, in wieweit dieser auch im Infraroten Bereich des Spektrums transparent ist und ob es ggf. möglich ist, mit speziellen Filtern den Kontrast zu verstärken. Dazu wurden Absorptionsspektren typischer Lösungsmittel, die in Aktivatoren enthalten sind, gemessen (s. Abbildung 5).

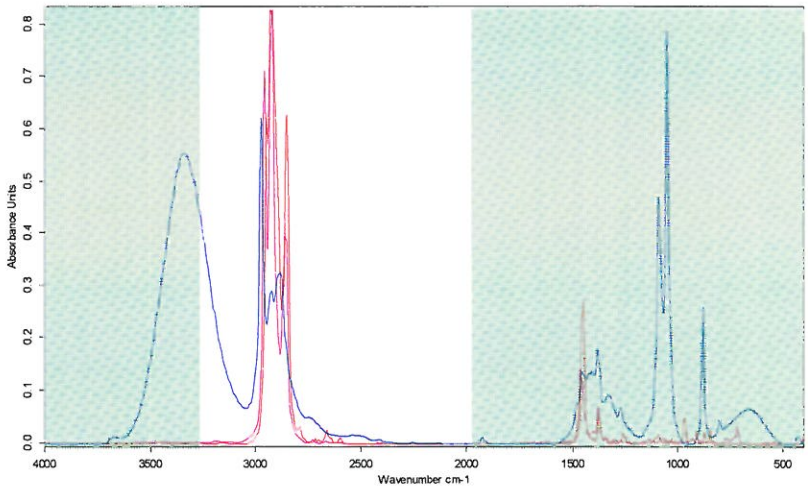

Abbildung 5: IR-Absorptionsspektrum von Isopropanol (blau), Methylcyclohexan (rot) und Heptan (rosa)

Die grün eingefärbten Bereiche entsprechen dem kurz- und langwelligen Infrarot, während das weiße Feld in der Mitte dem untersuchten mittleren Infrarot entspricht. Deutlich ist zu sehen, dass mit Ausnahme von Absorptionsbanden im Wellenzahlbereich um 2800 cm^{-1} die Lösungsmittel im mittleren IR-Bereich transparent sind.
Das Absorptionsspektrum des flüssigen SIKA-Aktivators (s. Abbildung 6) weist im mittleren IR die gleiche Charakteristik wie die Spektren der Lösungsmittel auf. Die nichtflüchtigen Bestandteile des Aktivators sind aufgrund ihrer geringen Konzentration im Spektrum nicht eindeutig nachweisbar. Der Großteil der Emission einer mit einem Aktivator behandelten Oberfläche stammt demnach im Wesentlichen von der Substratoberfläche.

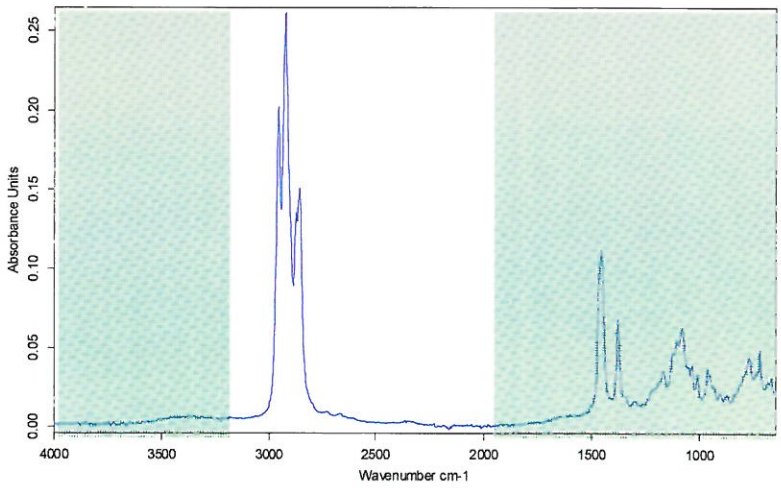

Abbildung 6: Infrarot-Absorptionsspektrum des SIKA Aktivators

Untersuchung der Systeme vor dem Auftrag

In Abbildung 7 bis Abbildung 9, ist die IR-Emission kurz nach dem Aufziehen von Isopropanol, Primer und Aktivator mit einer Pipette sowie die dazugehörigen Intensitäten entlang der eingezeichneten Profillinien dargestellt. In allen Fällen ist eine starke Abnahme der IR-Emission zu verzeichnen. Die Abnahme der Emission liegt für die untersuchten Lösungen in der gleichen Größenordnung. Für Isopropanol und Aktivator beträgt der Abfall der Emission 5 $W\ m^{-2}\ s^{-1}$ im Fall des Primers beträgt er 3 $W\ m^{-2}\ s^{-1}$.
Der Abfall in der Intensität ist darauf zurückzuführen, dass sich die Lösungen während der Verdunstung der Lösungsmittel abkühlen und dabei die Temperatur der Pipettenspitze abnimmt. Der hohe Emissionsgrad der Pipettenspitze (Polymer) sorgt dabei für eine gute Messbedingung zur Erfassung der IR-Emission. Die Unterschiede des Intensitätsabfalls im Fall des Aktivators und Lösungsmittels im Vergleich zum Primer lassen sich auf den vergleichsweise geringen Lösungsmittelanteil des Primers zurückführen. Die Abnahme der IR-Emission entspricht für die drei betrachteten Flüssigkeiten einer Abkühlung von ca. 4°C bis 6°C.
Die Untersuchung des Emissionsverhaltens der Auftragssysteme wurde bei Umgebungstemperaturen zwischen 20°C und 30°C durchgeführt. Die Höhe der Temperaturabnahme wurde davon nicht beeinflusst. Der beschriebene Effekt der mit Hilfe der

Thermografie detektierbaren Temperaturabnahme ist demnach unter normalen Umgebungsbedingungen unabhängig von der Umgebungstemperatur.

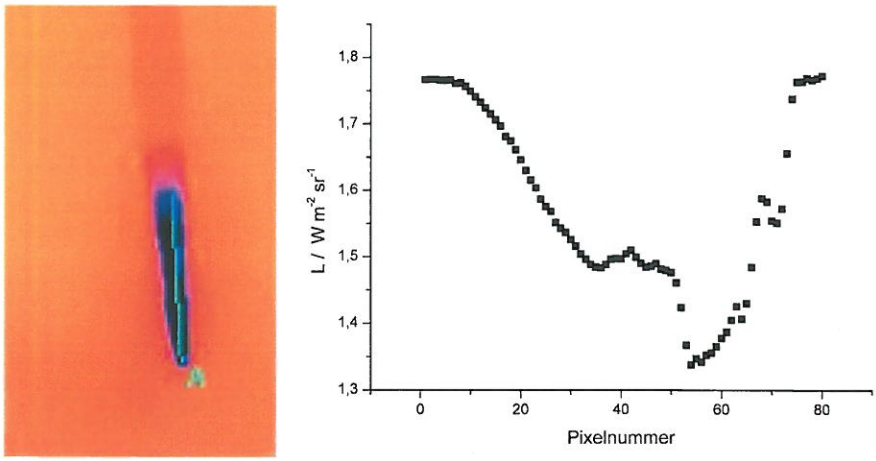

Abbildung 7: IR-Emission der Pipette kurz nach dem Aufziehen von Isopropanol (Links), Strahldichte längs der Profillinie A an der Pipettenspitze (Rechts)

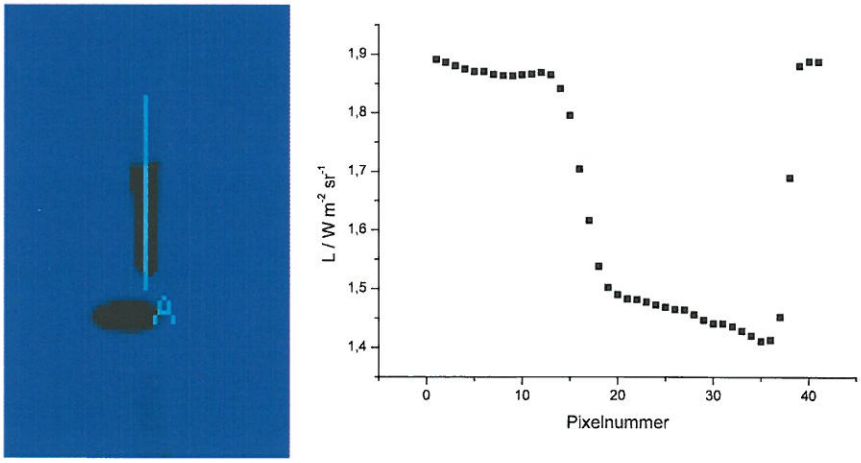

Abbildung 8: IR-Emission der Pipette kurz nach dem Aufziehen der Aktivatorlösung (Links), Strahldichte längs der Profillinie A an der Pipettenspitze (Rechts)

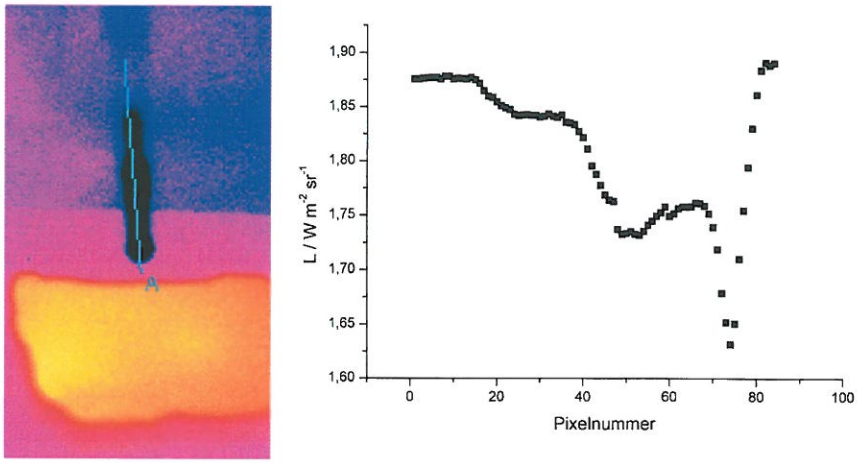

Abbildung 9: IR-Emission der Pipette kurz nach dem Aufziehen des Primers (Links), Strahldichte längs der Profillinie A an der Pipettenspitze (Rechts)

Neben der IR-Emission der Auftragssysteme in Pipetten wurde auch die IR-Emisson für das Referenzsystem Isopropanol in Bezug auf technisch relevante Applikatoren betrachtet. In Abbildung 10 ist die IR-Emission eines Schwammes kurz nach dem Herauspressen des Lösungsmittels dargestellt. Dazu sind die entsprechenden Intensitäten entlang der eingezeichneten Profillinien dargestellt. Der Abfall der Emission ist vergleichbar mit den Werten beim Pipettenaufzug. Das Schwammmaterial wird durch die Verdunstung des Lösungsmittels abgekühlt.

In Abbildung 11 ist die IR-Emission während des Sprühens von Isopropanol aus einer Dosierdüse und der Intensitätsverlauf entlang der eingezeichneten Profillinie dargestellt. Da in diesem Fall weder Pipettenspitze noch Schwamm vom Lösungsmittel abgekühlt werden, ist der detektierte Emissionsabfall während des Sprühvorganges schwächer als bei der Emissionsmessung im Fall des Schwamms bzw. der Pipette.

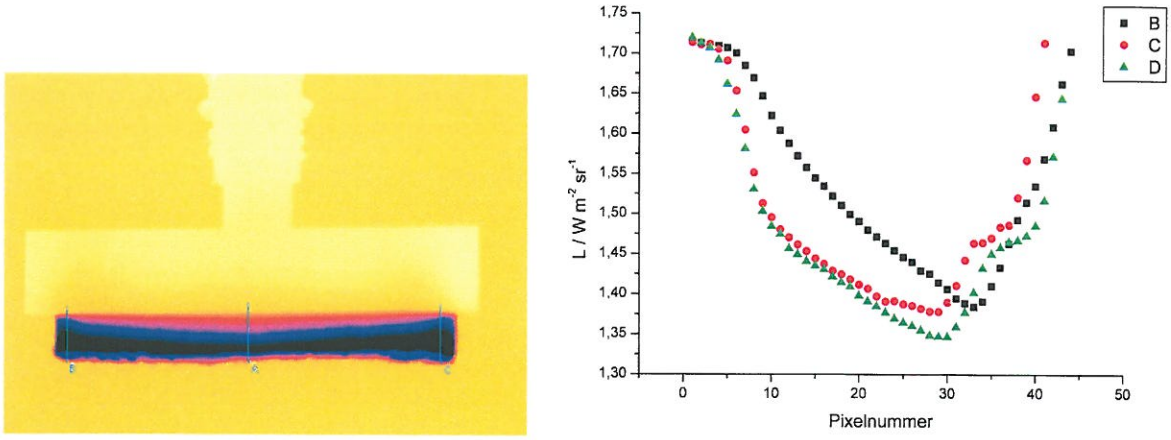

Abbildung 10: IR-Emission des Schwammes kurz nach dem Herauspressen des Lösungsmittels (Links), Strahldichte der IR-Emission (Rechts)

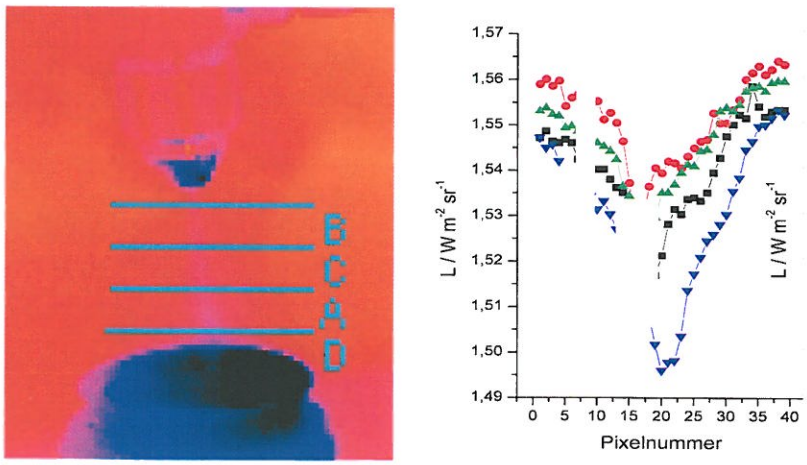

Abbildung 11: IR-Emission beim automatischen Sprühauftrag von Isopropanol (Links), Strahldichte der IR-Emission (Rechts)

Beim Sprühauftrag, Pipetten- und Schwammauftrag kommt bereits vor dem Kontakt der Auftragssysteme mit der Probenoberfläche zu einer Abkühlung des Lösungsmittels bzw. des Lösungsmittelanteils der Auftragssysteme. Bei Umgebungstemperaturen von 20°C bis 30°C ist von einem Temperaturabfall von ca. 5 °C auszugehen, der nicht von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird. Bei der Überwachung von manuellem und automatischem Schwammauftrag von Aktivator und Primer ist daher von einer deutlichen Änderung der IR-Emission auszugehen, die mit Hilfe der Thermografie erfasst werden kann.

Untersuchung aufgetragener Systeme

In Abbildung 12 ist der Tropfenauftrag (Tropfenvolumen: 10 µl) des Referenzsystems Isopropanol auf eine Siebdruckoberfläche dargestellt. Beim Auftreffen der stark abgekühlten Flüssigkeit auf die Oberfläche kommt es unmittelbar zu einem signifikanten Temperaturabfall und damit verbunden zu einer deutlichen Verminderung der Emission der IR-Strahlung.

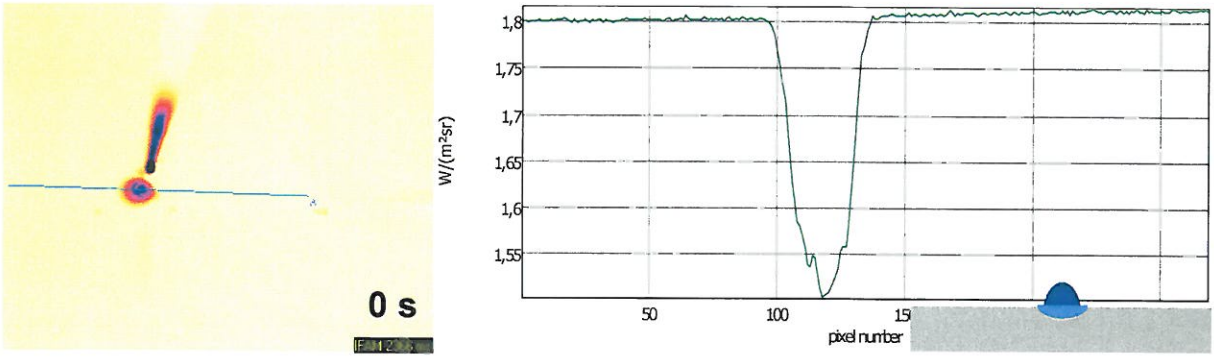

Abbildung 12: Pipettenauftrag von Isopropanol auf Siebdruck; Auftrag des Tropfens

Während das Lösungsmittel auf der Oberfläche spreitet, ist die Emission an den Stellen der Oberfläche, an denen das Lösungsmittel die Oberfläche benetzt, geringer als an der umgebenden Oberfläche (s. Abbildung 13). Dabei ist die Differenz zwischen der IR-Emission

der benetzten und unbenetzten Oberfläche geringer als beim Auftrag des Tropfens (vgl. Abbildung 12).

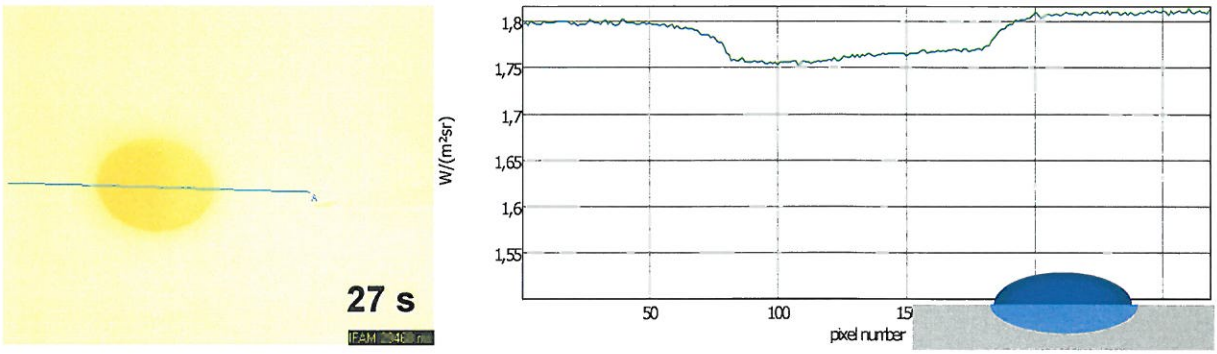

Abbildung 13: Pipettenauftrag von Isopropanol auf Siebdruck; Spreiten des Tropfens

Hat der Tropfen auf seinen maximalen Durchmesser erreicht, kommt es, durch die Verdunstung des Lösungsmittels zu einer Durchmesserverringerung des Tropfens. Die Emission nimmt gegenüber der Spreitungsphase noch einmal ab. Durch Wärmeleitungseffekte kommt es zudem zu einer Verbreiterung des Bereiches, in dem die Emission abnimmt. Dieser reicht über den maximalen Spreitungsradius des Tropfens hinaus (s. Abbildung 14).

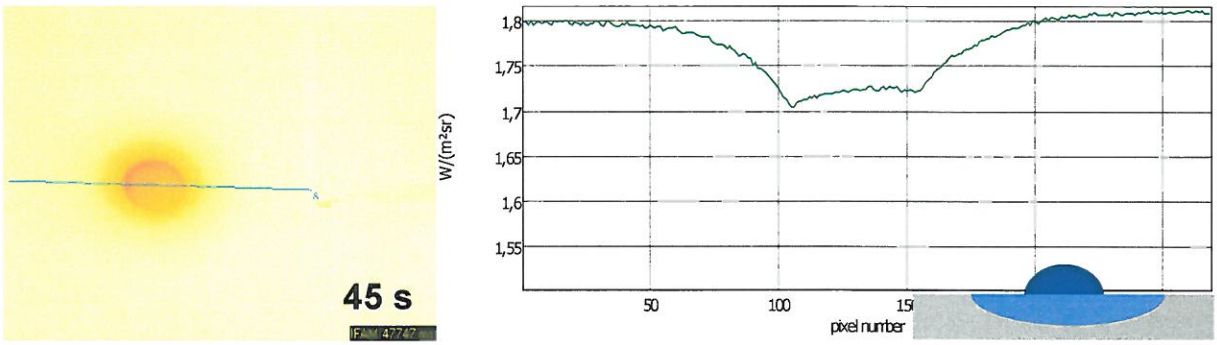

Abbildung 14: Pipettenauftrag von Isopropanol auf Siebdruck; Verdunstung des Tropfens

Schließlich ist das gesamte Lösungsmittel verdunstet. Es kommt zu einer Rückerwärmung der Oberfläche. Die Emission von behandelten und unbehandelten Oberflächenabschnitten gleicht sich allmählich an (s. Abbildung 15).

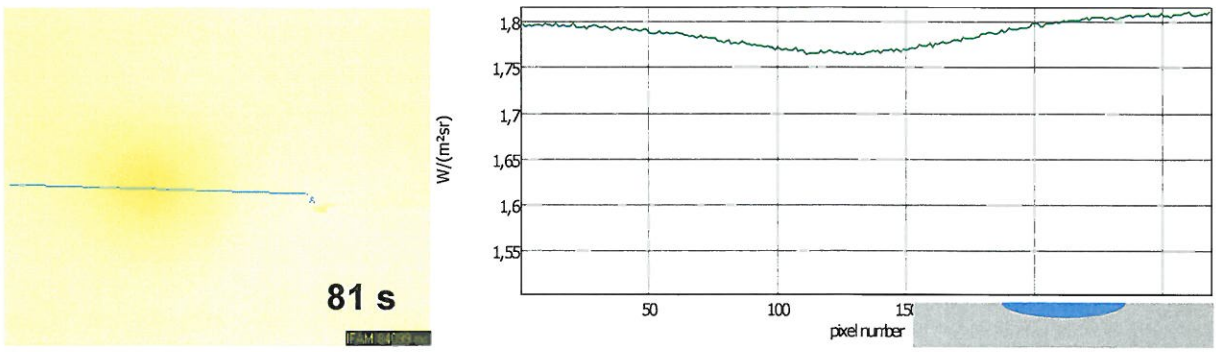

Abbildung 15: Pipettenauftrag von Isopropanol auf Siebdruck; Rückerwärmung des Substrats

Zusätzlich zu den modellhaften Betrachtungen am Beispiel des Lösungsmitteltropfens wurden Untersuchungen der technisch applizierten Aktivator- und Primersysteme durchgeführt. In Abbildung 16 ist die IR-Emission während des Schwammauftrags von Aktivator auf KTL-Blech und in Abbildung 17 die Emissionsprofile der in Abbildung 16 eingezeichneten Profillinien dargestellt.

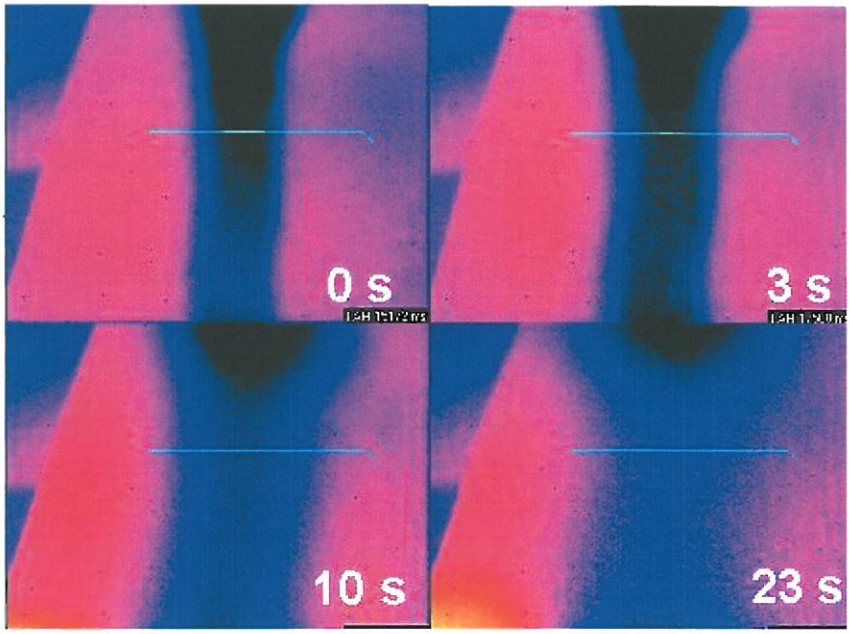

Abbildung 16: IR Emission; händischer Auftrag von Aktivator auf KTL-Blech

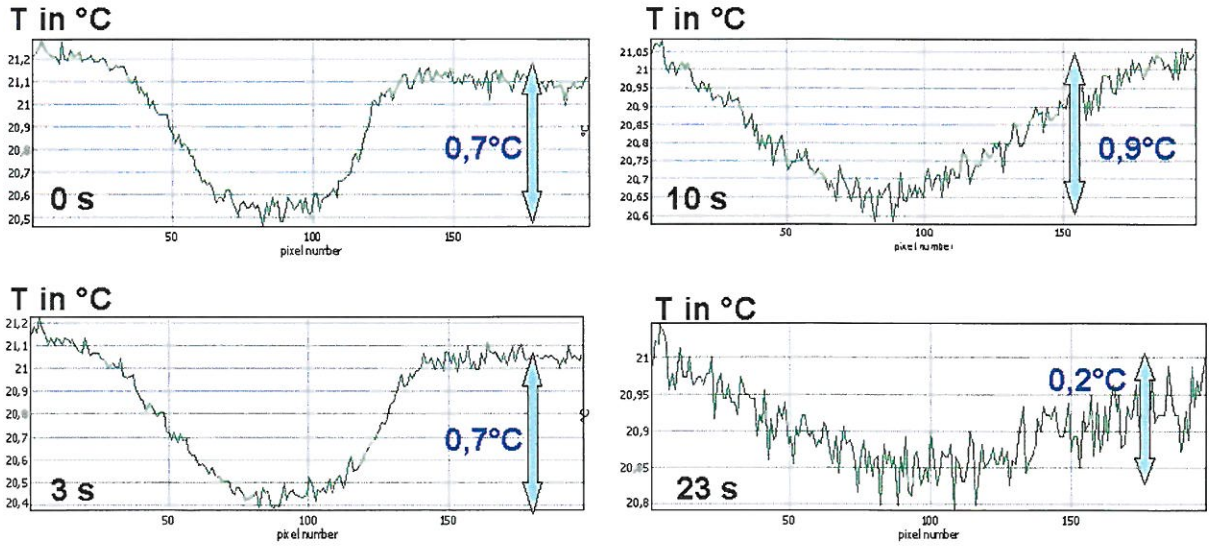

Abbildung 17: IR-Emissionsprofile; händischer Auftrag von Aktivator auf KTL-Blech

Zum Zeitpunkt t = 0 s wurde der Aktivator auf das Substrat aufgebracht. Nach 10 Sekunden wurde mit einem Tuch über die Oberfläche gewischt, um überschüssigen Aktivator zu entfernen (Wipe-on/wipe-off-Verfahren). Zu allen Zeiten lässt sich der Auftrag des Aktivators deutlich detektieren. Auch nach über 20 s ist eine deutliche Abnahme der IR-Emission an den

benetzten Stellen im Vergleich zur unbenetzten Oberfläche zu erkennen. Das händische Abwischen der Oberfläche nach 10 s beeinflusst die IR-Signatur nicht. Wie schon im Fall des Tropfenauftrags, kommt es im Laufe der Zeit zu einer Verbreiterung der IR-Profile. Dies führt zu einer Verringerung der Ortsauflösung.

In Abbildung 18 ist die IR-Emission während des Auftrags von Aktivator auf die Siebdruckoberfläche einer Heckscheibe dargestellt. In Abbildung 19 finden sich die dazugehörigen Emissionsprofile. Das Abwischen des Aktivators erfolgte in diesem Fall nach sechs Sekunden. Im gesamten Zeitraum der Messungen lässt sich der Auftrag des Aktivators deutlich detektieren. Im Vergleich zum Auftrag auf KTL-Blech sind die Emissionsprofile deutlich steiler und sind über einen sehr viel längeren Zeitraum zu erfassen (auch nach über 40 s). Die Ursache hierfür liegt in der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der Substrate. Die Wärmeleitfähigkeit des Glases ist sehr viel geringer als die des KTL-Bleches. Durch die geringere Wärmeleitung, ist der Effekt der Abkühlung länger an der Oberfläche zu detektieren. Zudem findet im Vergleich zum KTL-Blech eine geringere Verbreiterung der IR-Profile statt. Dies führt zu einer verbesserten Ortsauflösung im Hinblick auf die Detektion der Aktivatorspur.

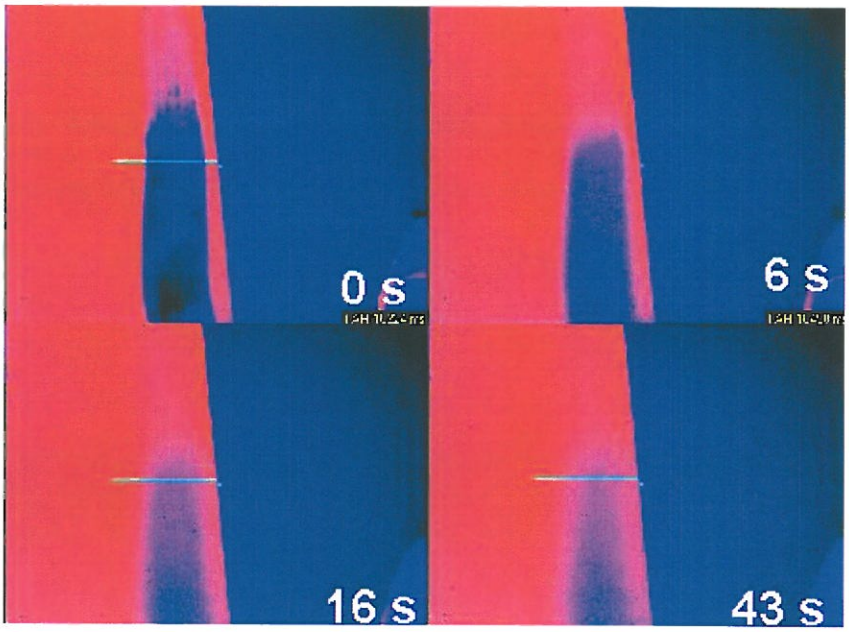

Abbildung 18: IR Emission; händischer Auftrag von Aktivator auf Siebdruck

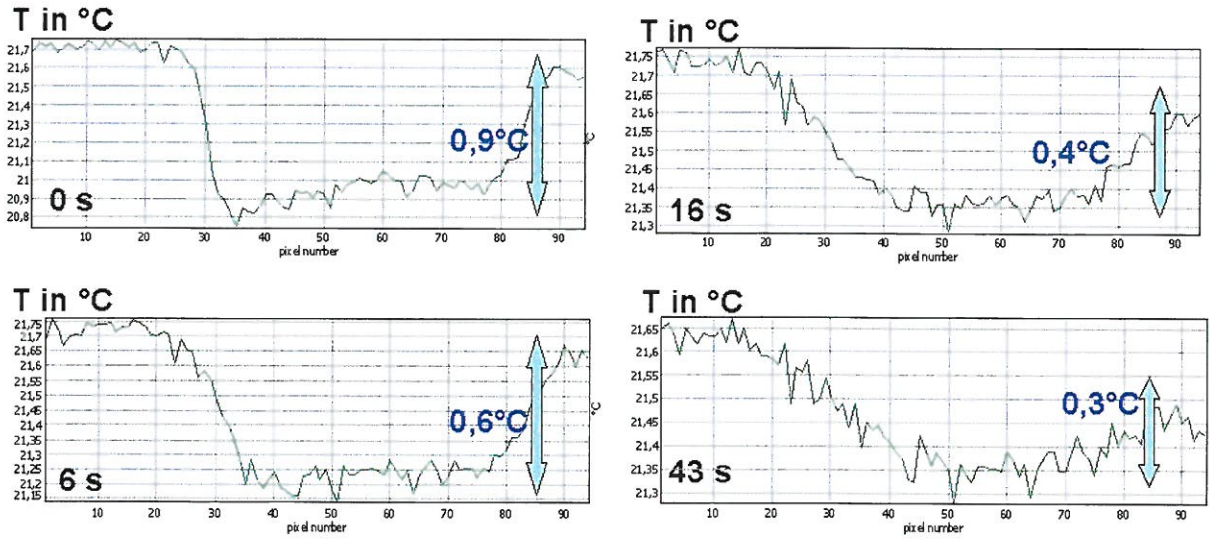

Abbildung 19: IR-Emissionsprofile; händischer Auftrag von Aktivator auf Siebdruck

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist die IR-Emission bzw. sind die Emissionsprofile während des Schwammauftrags des ausgewählten Primers auf die Siebdruckoberfläche einer Heckscheibe dargestellt. Die Emissionsprofile sind ähnlich steil wie beim Aktivatorauftrag auf Siebdruck. Auch in diesem Fall ist der Auftrag des Primers sehr lange nachweisbar.

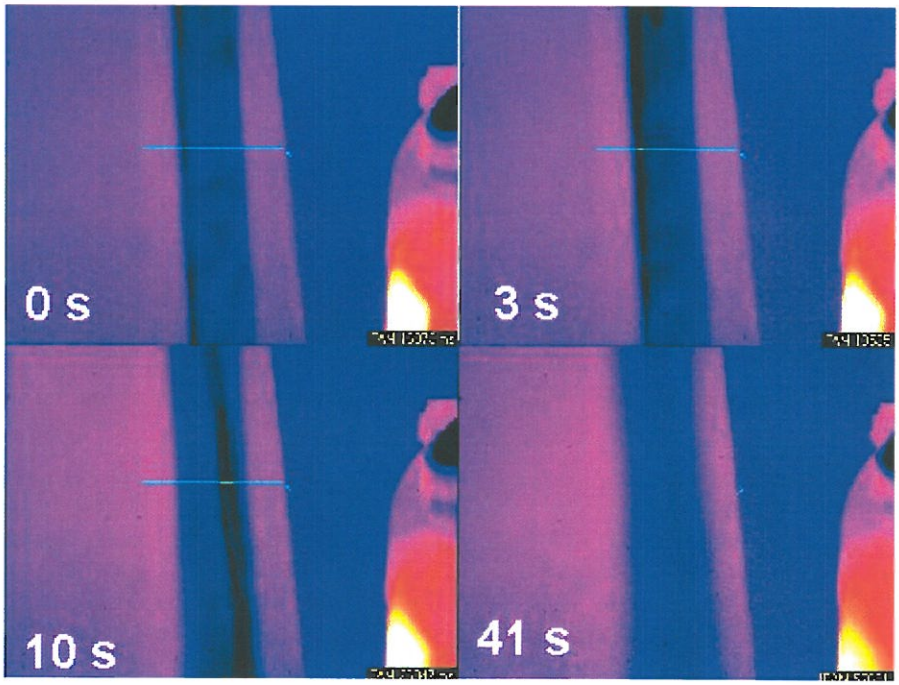

Abbildung 20: IR Emission; händischer Auftrag von Primer auf Siebdruck

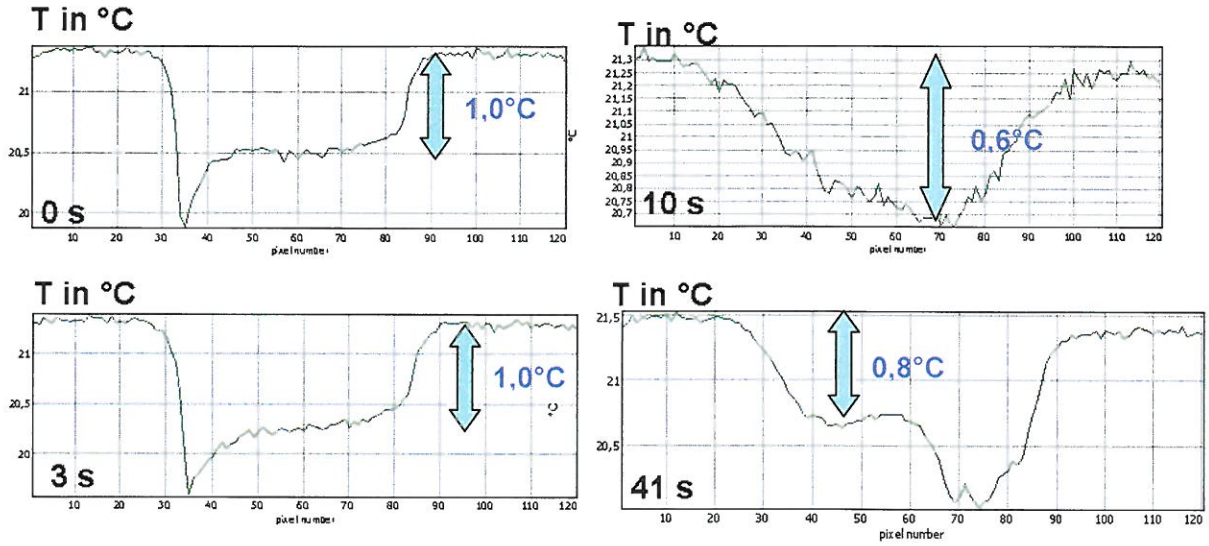

Abbildung 21: IR-Emissionsprofile; händischer Auftrag von Primer auf Siebdruck

Der Auftrag von Aktivator und Primer ist für alle untersuchten Substrate für industrielle Anwendungen hinreichend lange nachzuweisen (zwischen 20 Sekunden und 40 Sekunden). Unterschiedliche Umgebungstemperaturen zwischen 20°C und 30°C führten zu keiner signifikanten Änderung der Emissionsprofile.

Untersuchungen an einer reflektiven, gekrümmten Oberfläche

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts ein geometrisch komplexes Bauteil mit hochreflektiver Oberfläche untersucht. Dies stellt einen komplizierten Sonderfall zur Messung des Systemauftrags dar. Hierbei handelt es sich um ein zylinderförmiges Motorgehäuse aus Aluminium (s. Abbildung 22), das im Inneren des Gehäuses mit Klebstoffraupen überzogen ist. Während des Montageprozesses wird das Innere des Gehäuses vollständig mit einem Aktivatorfilm überzogen.

Abbildung 22: Motorgehäuse aus Aluminium

Generell sind metallische Oberflächen aufgrund ihres hohen Reflexionsgrades für IR-thermografische Methoden bei Raumtemperatur nur schwer zugänglich. Da metallische Oberflächen jedoch eine richtungsabhängige Abstrahlcharakteristik haben, besteht eine Möglichkeit, Änderungen der Emissionswerte von Metalloberflächen zu bestimmen darin, Messungen unter definierten Einfallswinkeln durchzuführen. Zylindrische Bauteile sind dazu besonders geeignet, da bei Aufnahmen senkrecht zur Symmetrieachse automatisch alle Einfallswinkel zwischen 0° und 90° mit einer Aufnahme abgebildet werden.
Zur Messung der IR-Emission wurde nach Auftrag der Klebstoffraupen das Motorgehäuse im Inneren mit Aktivator benetzt und während der Verdampfung des Lösungsmittels die IR-Emission der Bauteilinnenseite mit der Kamera aufgenommen (s. Abbildung 23). Durch Messungen auf dem Klebstoff konnte der Aktivatorauftrag erfolgreich detektiert werden. Innerhalb von 100 s lässt sich ein deutlicher Abfall der Temperatur um 0,2°C nachweisen. Im Bereich der reinen Aluminiumoberfläche war aufgrund der geringen Abkühlung des Motorgehäuses nach Aktivatorauftrag die erhaltene Emissionsänderung nicht detektierbar.

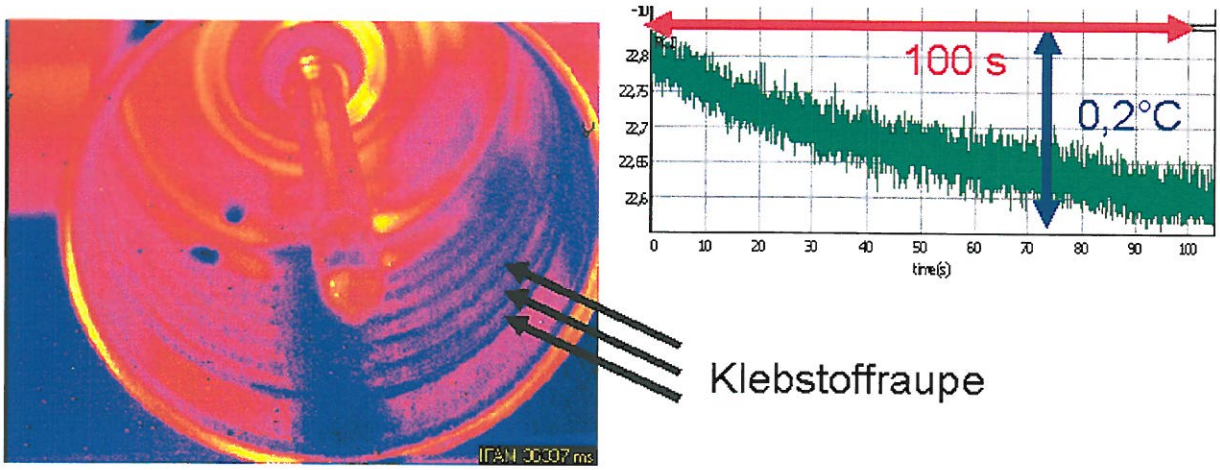

Abbildung 23: IR-Aufnahme im Inneren des Motorgehäuses nach dem Aktivatorauftrag (Links), Emissionsverlauf an einer Stelle auf der Klebstoffraupe (Rechts)

Zudem wurde die IR-Emission im Bereich der zwei Bohrungen im Boden des Motorgehäuses gemessen. Wird die große Öffnung des Motorgehäuses nach dem Aktivatorauftrag abgedeckt, wirken die Motorgehäusebohrungen wie ein schwarzer Strahler. Die Reflexionseigenschaften des Gehäuseinneren spielen dann eine vernachlässigbare Rolle. Die Emission im Bereich der Bohrungen hängt dann im Wesentlichen von der Temperatur des Hohlraumes ab.
Das Motorgehäuse wurde für diese Messungen im Inneren mit Aktivator benetzt. Anschließend wurde die große Öffnung des Motorgehäuses mit Alu-Folie abgedeckt. Während der Verdunstung des Lösungsmittels wurde die IR-Emission im Bereich der Löcher im Gehäuseboden mit der IR-Kamera aufgenommen und somit der Aktivatorauftrag erfolgreich detektiert. Der Abfall der Temperatur beträgt in einem Intervall von 100 s in diesem Fall 0,3°C, und entspricht aufgrund des Emissionsgrades von nahezu eins, annähernd der tatsächlichen Temperaturdifferenz (s. Abbildung 24).

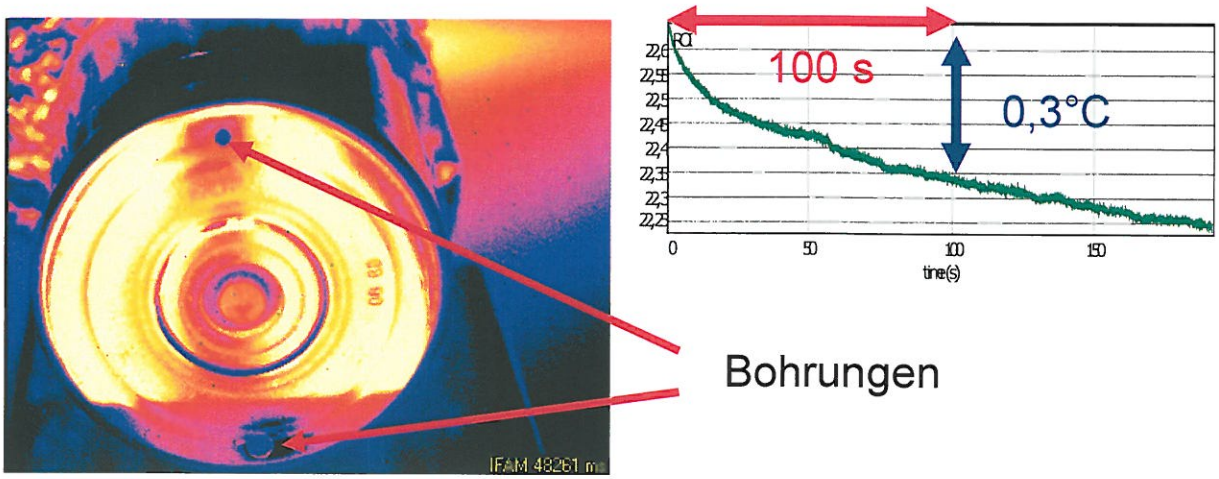

Abbildung 24: IR-Aufnahme des Motorgehäuses nach dem Aktivatorauftrag (Links), Emissionsverlauf in einer Bohrung (Rechts)

Genauigkeit und Auflösungsvermögen des Verfahrens

Wie bereits dargestellt (s. Abbildung 17, Abbildung 19, Abbildung 21) markieren die Flanken im Emissionsprofil den Übergang zwischen behandelten und unbehandelten Oberflächenbereichen. Aufgrund von Wärmeleitungsprozessen nimmt die Steilheit der Flanken jedoch unmittelbar nach dem Auftrag ab. Die Emssionsprofile nähern sich dem Ausgangsniveau an. Im Laufe der Zeit wird damit die Bestimmung der von Primern/Aktivatoren benetzten Bereiche erschwert. Die Ortsauflösung nimmt ab. Dieser Effekt ist für das Beispiel des wipe-on/wipe-off-Auftrags des Aktivators auf Siebdruck in Abbildung 25 dargestellt.

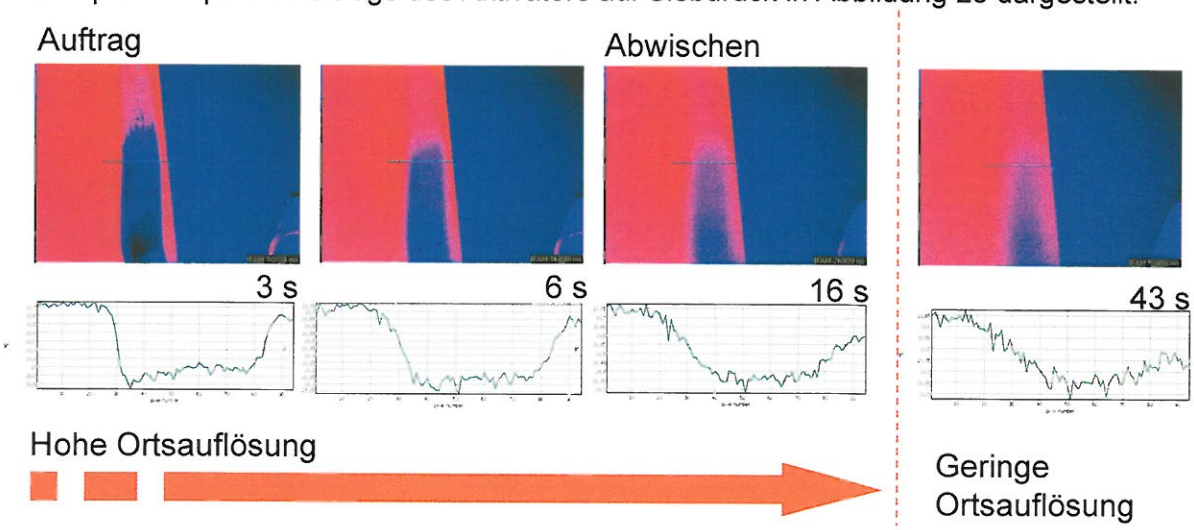

Abbildung 25: Emissionsprofile; Ortsauflösung beim wipe on/wipe off des Aktivators auf Siebdruck

Um eine optimale Ortsauflösung zu erzielen, muss der Verlauf der Emissionsprofile zeitaufgelöst aufgenommen und das Emissionsprofil mit der maximalen Flankensteilheit ausgewertet werden. Im Fall der durchgeführten Versuche lag die Ortsauflösung bei einem Millimeter. Dabei ist natürlich die Anzahl der Pixel des abbildenden Systems ein limitierender Faktor. Eine andere Möglichkeit, eine hohe Ortsauflösung zu erzielen, besteht in der

Auswertung des Wendepunkts der Emissionsprofile. In diesem Fall wurde eine Auflösung im Bereich von ein bis zwei Millimetern erzielt.

3.2.2 Simulationsergebnisse

Zur Validierung des in Abschnitt 3.1.4 vorgestellten numerischen Modells wird zunächst die Veränderung der Substrattemperatur beim idealisierten Tropfenauftrag betrachtet. Dazu wurde die Temperaturverteilung beim Auftrag eines Aktivatortropfens mit definiertem Tropfenvolumen simuliert. In der Simulation wird die zeitliche Veränderung der Temperaturverteilung im Substrat durch numerische Integration der Wärmetransportgleichungen bestimmt. Dazu werden die Temperaturänderungen beim Auftrag eines Aktivatortropfens definierter Menge simuliert, wie Abbildung 26 beispielhaft für eine Glasscheibe mit einer Stärke von 5 mm zeigt. In diesem Beispiel beträgt der Tropfendurchmesser bei einem Tropfenvolumen von 20 µL zu Beginn der Rechnung 15 mm. Abbildung 27 zeigt die analogen Temperaturverläufe für den Auftrag von Aktivator auf KTL-Blech der Stärke 1,5 mm. In der Simulation wurde eine zweidimensional axial-symmetrische Geometrie des Tropfens berücksichtigt. Die Aktivatorsubstanz befindet sich zu Beginn der Simulation auf der linken Seite im Diagramm. Qualitativ ergibt sich in der Simulation im Fall des KTL-Bleches im Vergleich zum Siebdruck auf Glas eine deutlich schnellere Rückerwärmung.

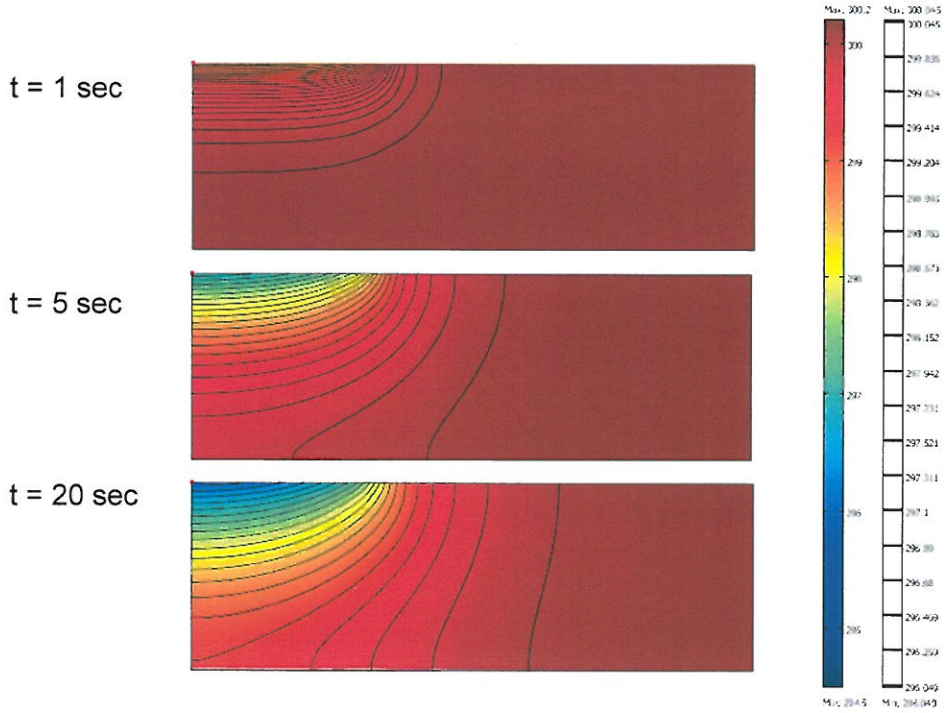

Abbildung 26: Zeitliche Veränderung der Temperatur im Substrat infolge des Aktivatorauftrags auf eine Siebdruckoberfläche auf Glas

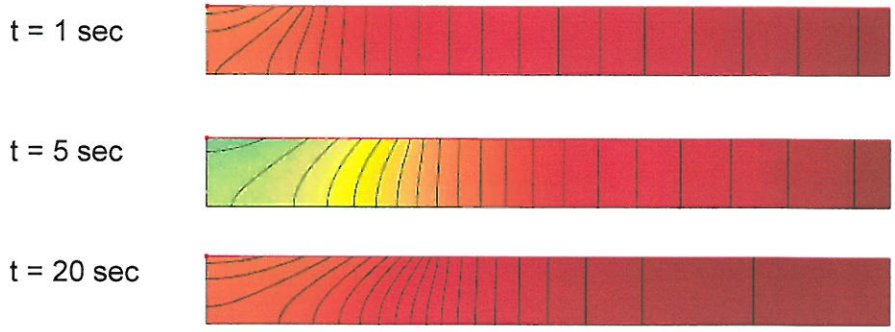

Abbildung 27: Zeitliche Veränderung der Temperatur im Substrat infolge des Aktivatorauftrags auf KTL-Blech; Farbkodierung analog zu Abbildung 26

Die simulierte Veränderung der Substrattemperatur in der Tropfenmitte ist in Abbildung 28 wiedergegeben und kann direkt mit den experimentellen Daten aus Abbildung 29 verglichen werden. Die Unterschiede im Temperaturverlauf zwischen KTL-Blech und Siebdruck auf Glas spiegeln die unterschiedlichen thermischen Leitfähigkeiten und Wärmekapazitäten der Substrate wider.

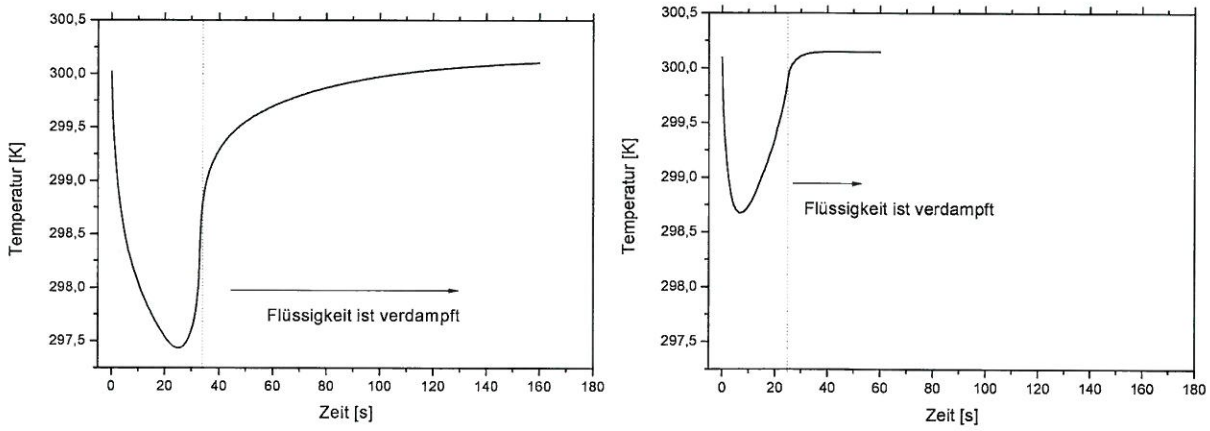

Abbildung 28: Veränderung der Temperatur an der Substratoberfläche (Tropfenmitte); Vergleich zwischen Aktivator auf Siebdruck (Links) und Aktivator auf KTL-Blech (Rechts)

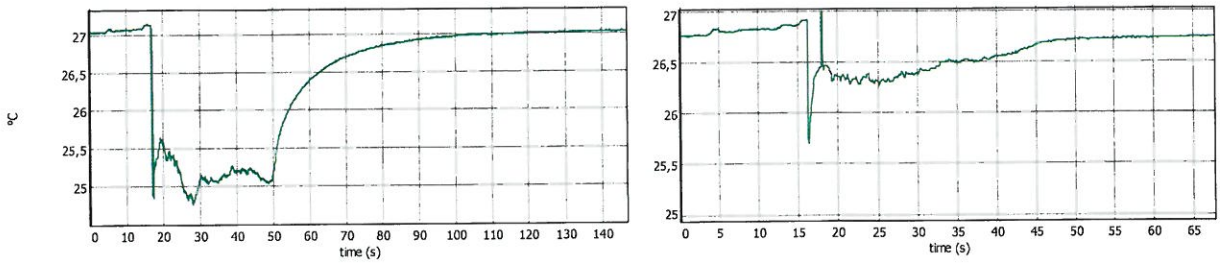

Abbildung 29: Experimentell bestimmter Temperaturverlauf beim Tropfenauftrag (Tropfenmitte); Aktivator auf Siebdruck (Links) sowie Aktivator auf KTL-Blech (Rechts)

Die Simulationsergebnisse für den Tropfenauftrag (Abbildung 28) korrelieren mit den experimentell beobachteten Temperaturänderungen, wobei die größte Diskrepanz für den Zeitraum der eigentlichen Verdunstung des Tropfens gefunden wird. Eine mögliche Erklärung hierfür besteht darin, dass im Experiment die Temperatur an der Oberfläche des Tropfens und nicht wie in der Simulation an der Substratoberfläche gemessen wird. Eine weitere mögliche Erklärung für die Diskrepanz ist die Vernachlässigung der Wärmetransportvorgänge im Aktivatortropfen in der Simulation, da die Flüssigkeit im numerischen Modell idealisiert als Wärmesenke beschrieben wird. Für die Rückerwärmungsphase nach der Verdunstung des Tropfens ergibt sich dagegen sowohl qualitativ, als auch quantitativ eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Im Fall des Aktivatorauftrags auf Siebdruck (Glas-Substrat) ist die Rückerwärmung im Vergleich zum Auftrag auf das KTL-Blech deutlich langsamer. Wie im Experiment wird ein exponentieller Temperaturanstieg gefunden.

Die durchgeführten Rechnungen bestätigen die experimentell beobachteten deutlichen Unterschiede zwischen Siebdruck und KTL-Blech, welche auf unterschiedliche thermischen Eigenschaften der Substrate zurückgeführt werden können (vgl. Abbildung 16 bis Abbildung 19). Im Fall des KTL-Blechs sind die Temperaturänderungen deutlich geringer. Zudem kommt es zu einer sehr viel schnelleren Rückerwärmung der ursprünglich benetzten Oberfläche. Die schnelle Rückerwärung im KTL-Blech führt zu einem raschen lateralen Temperaturausgleich, was in Abbildung 30 dargestellt ist. Der Ort der eigentlichen Benetzung ist im Falle des KTL-Bleches schwieriger mittels der Temperaturänderung bestimmbar, als im Fall des Siebdruckes auf Glas (s. Abbildung 31), da sich das Temperaturprofil auf dem KTL-Blech schnell verbreitert und deutlich über den Bereich der ursprünglichen Benetzung hinausreicht.

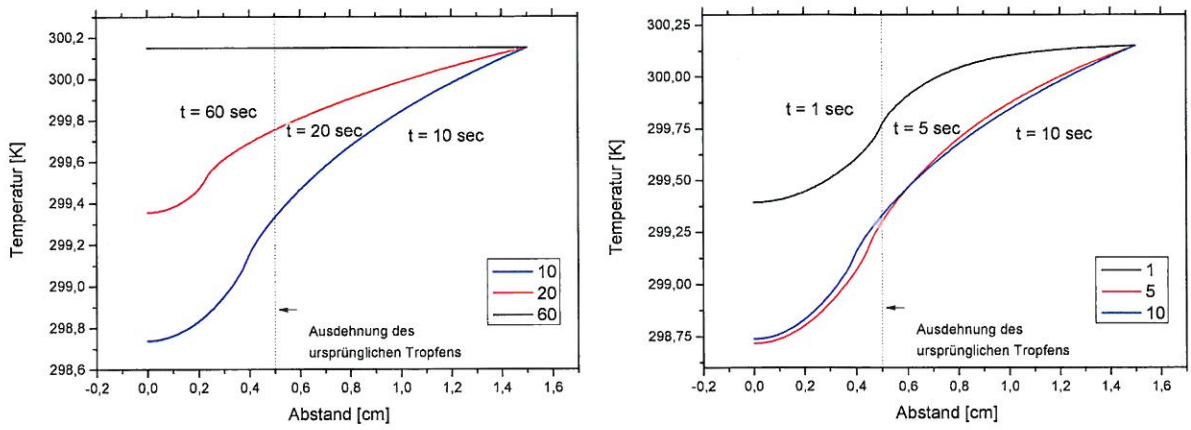

Abbildung 30: Temperaturprofile an der Substratoberfläche infolge der Verdunstung eines Aktivatortropfens (Aktivator auf KTL-Blech)

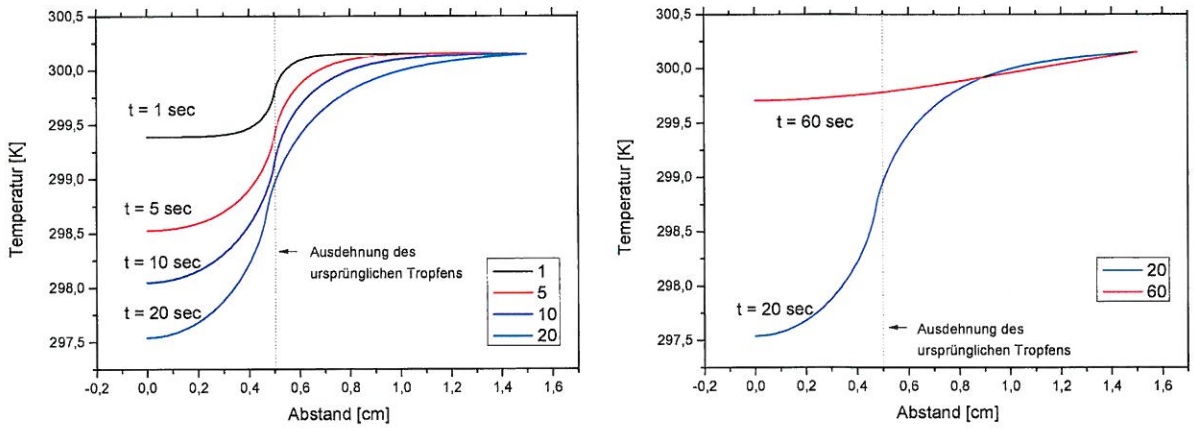

Abbildung 31: Temperaturprofile an der Substratoberfläche infolge der Verdunstung eines Aktivatortropfens (Aktivator auf Siebdruck)

Die Simulationsergebnisse für den Aktivatorauftrag mittels Schwamm sind in Abbildung 32 dargestellt. Die Breite des Schwamms beträgt 20 mm. Im Gegensatz zum Tropfenauftrag wurde die Aktivatorflüssigkeit beim Schwammauftrag nach 3 Sekunden abgewischt, so dass dann bereits eine Rückerwärmung des Substrats eintritt. Deutliche Unterschiede ergeben sich im Vergleich zwischen KTL-Blech und dem Siebdruck auf Glas hinsichtlich der Detektierbarkeit der durch den Schwamm benetzten Fläche.

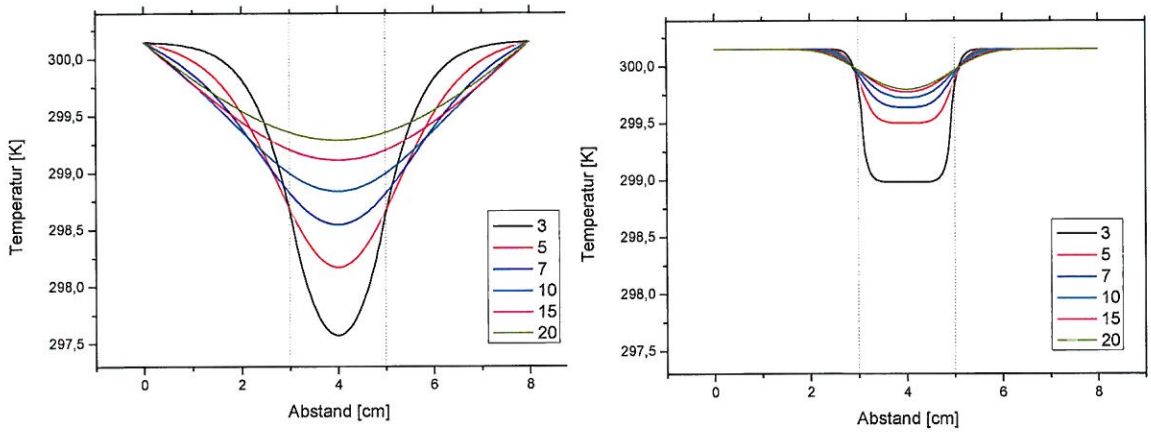

Abbildung 32: Zeitliche Veränderung der Temperaturprofile (in Sekunden) an der Oberfläche des KTL-Blechs (Links) und des Siebdruckes auf Glas (Rechts) beim Aktivatorauftrag mittels Schwamm

Wie im Fall des Tropfenauftrags korrelieren die Simulationsergebnisse gut mit den experimentellen Befunden beim Schwammauftrag auf Siebdruck (Abbildung 33) und auf KTL-Blech (Abbildung 34).

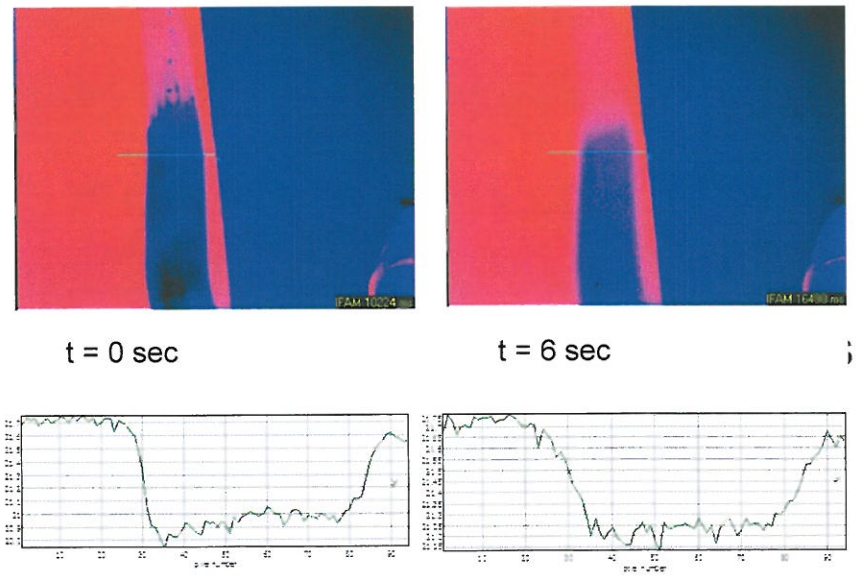

Abbildung 33: Experimentell bestimmter zeitlicher Verlauf der Temperatur-Profile beim Auftrag des Aktivators auf Siebdruck mittels Schwamm

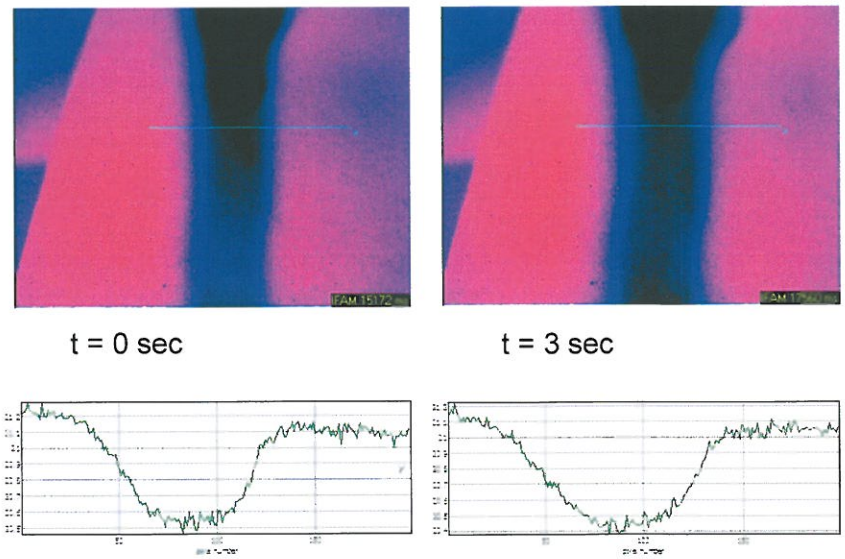

Abbildung 34: Experimentell bestimmter zeitlicher Verlauf der Temperatur-Profile beim Auftrag des Aktivators auf KTL-Blech mittels Schwamm

Im Fall des Schwammauftrags zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Substraten: So ist die Temperaturverteilung beim Aktivator auf Glas sehr viel schärfer definiert, während sich der thermische Einfluss des aufgebrachten Aktivators beim KTL-Blech auf einen Bereich ausdehnt, der deutlich über den ursprünglichen Ort des Auftrags hinausgeht. Mit Hilfe der Simulation ist diese Ortsauflösung direkt quantitativ zugänglich. Zudem kann aus den zeitabhängigen Temperaturprofilen direkt der Ort des ursprünglichen Auftrags bestimmt werden.

3.3 Untersuchung zur Quantifizierung der Auftragsmengen

3.3.1 Thermografieergebnisse

Untersuchungen an Tropfen

Die Quantifizierung des Auftrags von Aktivator und Primer stellt ein sehr viel komplexeres Problem als der reine Nachweis des Auftrags dar.

In Abbildung 35 ist der zeitliche Verlauf der IR-Emission einer Siebdruckoberfläche dargestellt, auf der ein Isopropanoltropfen (Tropfenvolumen 10 µl) appliziert wurde. Der Emissionsabfall bei einem Zeitpunkt von ca. 4 Sekunden (s. Abbildung 35, Phase I) entsteht durch die Benetzung der Oberfläche durch das in der Pipette abgekühlte Lösungsmittel. Die Emission steigt anschließend relativ an und bleibt bis zum Zeitpunkt von ca. 30 Sekunden konstant (s. Abbildung 35, Phase II). In diesem Zeitraum spreitet der Tropfen. In Phase III (zwischen 30 und 50 Sekunden) nimmt die IR-Emission stetig ab. In dieser Zeitspanne verdampft der Tropfen. Schließlich kommt es im Zeitraum nach ca. 52 Sekunden (s. Abbildung 35, Phase IV) zu einem stetigen Anstieg der Emission, bis die ursprüngliche Emission der unbehandelten Probe nahezu erreicht wird. In diesem Bereich ist die Lösungsmittelmenge komplett verdampft.

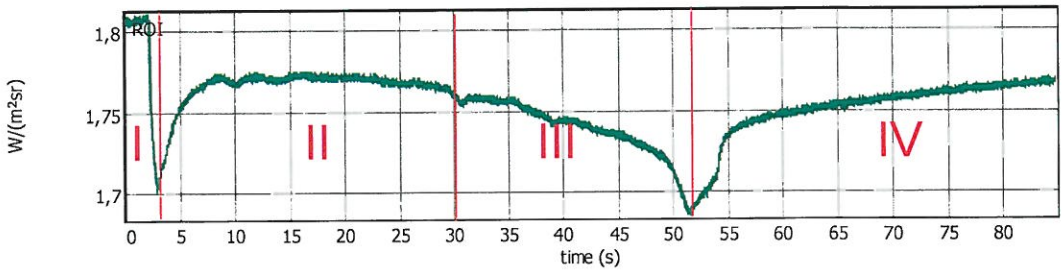

Abbildung 35: IR-Emission; Pipettenauftrag von Isopropanol auf Siebdruck

Die Zeitspannen der Phasen I bis III und die erreichte Minimaltemperatur lassen keine Rückschlüsse auf die aufgetragene Menge des Lösungsmittels zu. Im Gegensatz dazu hängt die Zeitspanne zwischen Emissionseinbruch und stetigem Anstieg der Emission infolge der Rückerwärmung (Phase IV) unmittelbar mit der Auftragsmenge zusammen. Die Auftragsmenge lässt sich demnach aus der Verdunstungsdauer und damit aus dem IR-Emissionsprofil bestimmen. Kritisch ist in diesem Zusammenhang die Bestimmung des Zeitpunktes, an dem die gesamte Lösungsmittelmenge verdunstet ist. Die Genauigkeit mit der dieser Zeitpunkt erfasst wird, bestimmt im Wesentlichen das Auflösungsvermögen der Methode zur Quantifizierung von Aktivator- und Primermengen.

In Abbildung 36 ist die Messung der IR-Emission für einen Aktivatortropfen (Tropfenvolumen: 30 µl) auf einer Siebdruckoberfläche dargestellt. Die Emission verläuft hier im Bereich der Verdunstung und Abkühlung sehr viel komplexer als im Beispiel von Abbildung 35. Bis zum völligen Verdunsten des Lösungsmittels kommt es hier zu einem Oszillieren der Emission (s. Abbildung 36, Phase II) und damit der Temperatur um einen mittleren Wert. Diese Temperatur

lässt sich mit der Seki-Temperatur[2] vergleichen. Für den in Abbildung 36 dargestellten Fall lässt sich der Zeitpunkt der einsetzenden Rückerwärmung einfacher ermitteln als für den idealisierten Fall des reinen Lösungsmittelauftrags (vgl. Abbildung 35).

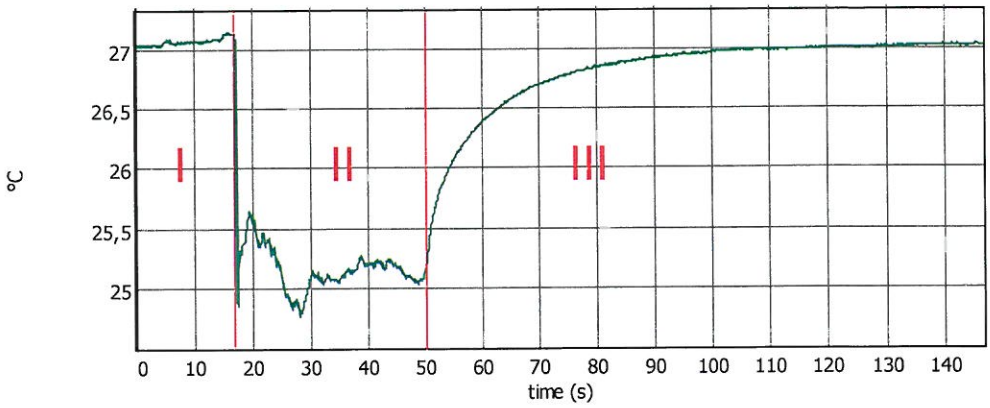

Abbildung 36: IR-Emission; Pipettenauftrag von Aktivator auf Siebdruck

Untersuchungen an anwendungsnah aufgetragenen Systemen

In der industriellen Praxis wird der Aktivator manuell durch feuchte Schwämme aufgetragen und die Oberfläche anschließend trocken nachgewischt. Das führt zu unspezifischen Aktivatorkonzentrationen auf der Oberfläche. Die nachfolgenden Versuche sollten zeigen, dass der Nachweis des Aktivators unabhängig von der Art des Auftrags ist und die bisher erzielten Ergebnisse auf die Anwendung übertragbar sind.

In Abbildung 37 ist die IR-Emission eines KTL-Blechs kurz nach dem manuellen wipe-on/wipe-off-Auftrag des Aktivators dargestellt. Der rote Kreis markiert einen Messpunkt außerhalb der Aktivatorbahn, der blaue Kreis einen Messpunkt innerhalb der Aktivatorbahn. Daneben ist der zeitliche Verlauf der IR-Emission an den beiden Messpunkten dargestellt. Beide Messkurven zeigen kurz nach dem Auftrag Emissionsspitzen; sie sind auf die Wärmequelle (Hand) während des Auftrags beziehungsweise des anschließenden Abwischens zurückzuführen. Die Emission des Referenzpunktes (rot) ist danach annähernd konstant. Dagegen zeigt die

---

[2] Eine gute Abschätzung für die Temperatur der Grenzfläche zwischen Tropfen und Substratoberfläche stellt die Seki Temperatur dar [Sek78]:

$$T_{SEKI} = \frac{T_P\sqrt{\rho_P c_P k_P} + T_F\sqrt{\rho_F c_F k_F}}{\sqrt{\rho_P c_P k_P} + \sqrt{\rho_F c_F k_F}}$$

ρ_P, k_P, c_P, T_P: Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Temperatur der Probenoberfläche

ρ_F, k_F, c_F, T_F: Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Temperatur des Lösungsmittels

Das tatsächliche Temperaturverhalten ist komplizierter als die Seki Temperatur. Die Temperaturverteilung der Fläche zwischen Oberfläche und Tropfen ist auch bei einphasigen Systemen weder zeitlich konstant noch räumlich homogen [Mar96a], Mar96b], [Tar09], [Tar07].

Emission an der mit Aktivator behandelten Stelle (blau) den gleichen charakteristischen Verlauf wie beim Tropfenauftrag. Nach dem Auftrag (nach ca. 3 Sekunden) verdampft der Lösungsmittelanteil. Danach (nach 13 Sekunden) erhält man die charakteristische Rückerwärmungskurve.
Auch im Fall des industriell realisierten Auftrags lässt sich aus der Emissionskurve die Verdunstungszeit ermitteln und darüber die Auftragsmenge bestimmen.

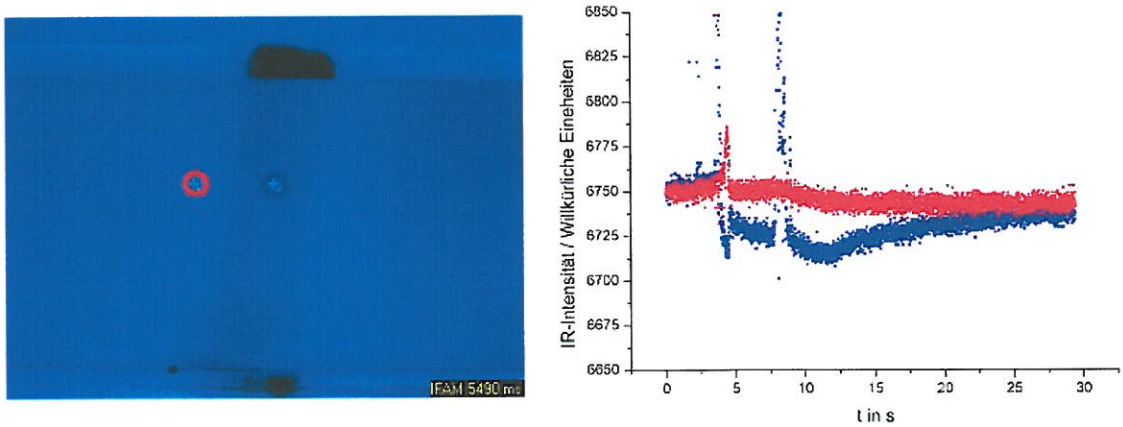

Abbildung 37: IR-Emission; händischer wipe-on/wipe-off Auftrag von Aktivator auf KTL-Blech

Der definierte Auftrag von lösungsmittelhaltigen Systemen erfolgt in der Anwendung mit Hilfe des automatisierten Sprühauftrags. In Abbildung 38 sind der zeitliche Verlauf der IR-Emission des Sprühauftrags von Aktivator auf KTL-Blech und die Lage der dazugehörigen Messpunkte dargestellt. Während die Emission am Referenzpunkt (rote Markierung) nur allmählich abnimmt, folgt die IR-Emission der charakteristischen Emissionskurve, die schon beim Tropfenauftrag beobachtet wurde.
Im Bereich von 0 Sekunden bis 45 Sekunden kann die Verdunstungsphase identifiziert werden, danach kommt es zur Rückerwärmung der Probe. Prinzipiell kann auch im Fall des Sprühauftrags die Verdunstungszeit zur Bestimmung der Auftragsmenge herangezogen werden.

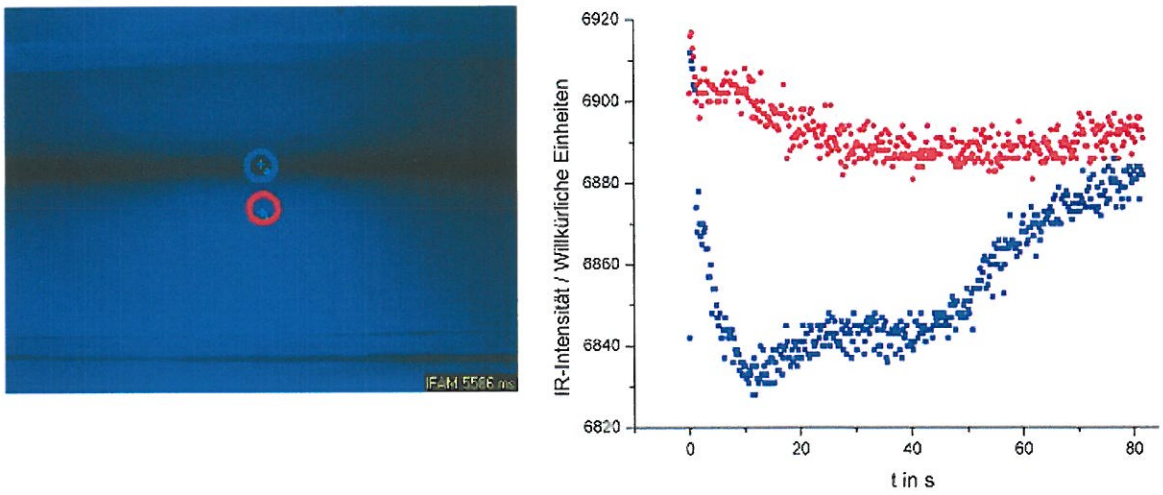

Abbildung 38: IR-Emission; automatischer Sprühauftrag von Aktivator auf KTL-Blech

Zur Korrelation der experimentellen Ergebnisse mit gemessenen Schichtdicken wurde ein mit Aktivator getränkter Schwamm robotergestützt über ein KTL-Blech geführt. Dabei nahm die Auftragsmenge stetig ab. Somit gelang der Auftrag von Aktivatorbahnen mit unterschiedlichen Schichtdicken. In Abbildung 39 ist das dreidimensionale Intensitätsprofil der IR-Emission dargestellt. Die drei Aktivatorbahnen sind als Riefen im Intensitätsprofil zu erkennen.

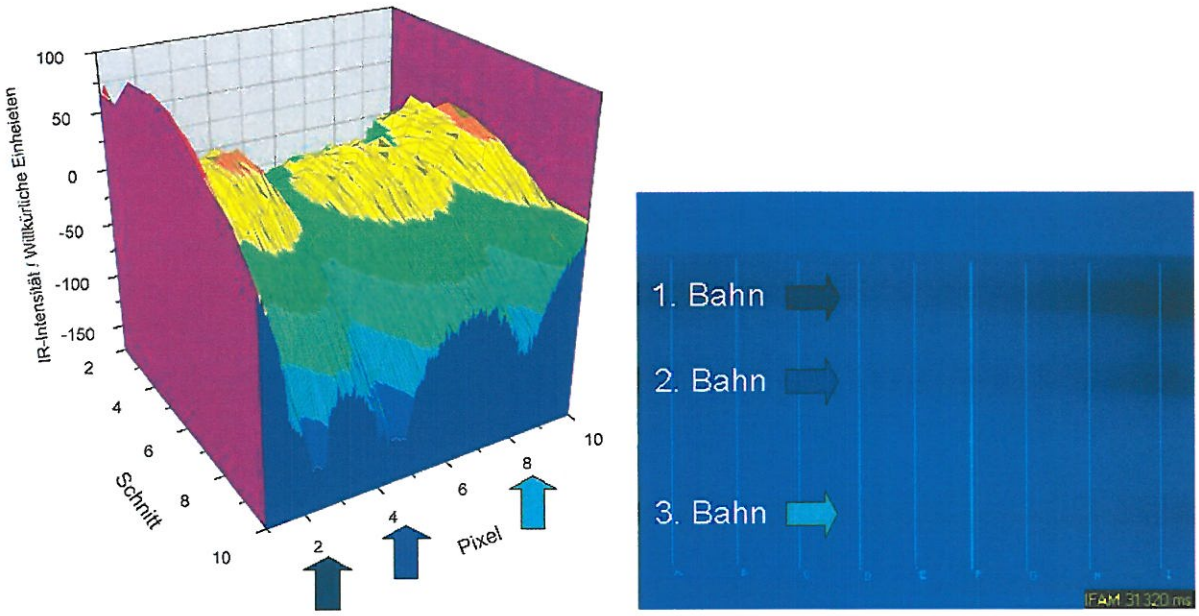

Abbildung 39: IR-Intensitätsprofil; automatischer Schwammauftrag von Aktivator auf KTL-Blech

Die aufgetragenen Aktivatorbahnen wurden mit der Laserkonfokalmikroskopie untersucht. Abbildung 40 zeigt die konfokalmikroskopische Aufnahme des Randbereichs einer 2,5 µm dicken Aktivatorschicht auf KTL-Blech.

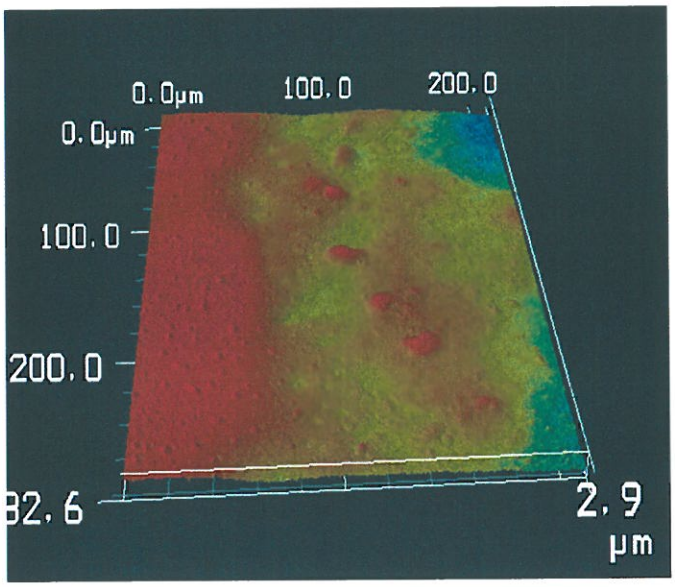

Abbildung 40: Laserkonfokalmikroskopische Aufnahme: 2,5 µm dicke Aktivatorschicht auf KTL-Blech

Die Ergebnisse der Charakterisierung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Während sich im Anschluss an den Auftrag der ersten Aktivatorbahn ein geschlossener Aktivatorfilm mit einer maximalen Dicke von 2,5 µm gebildet hat, fand im Fall der nachfolgenden Bahnen eine Inselbildung statt. Die Inseln hatten dabei eine maximale Höhe von 1,5 bzw. 2 µm.

Tabelle 1: Charakterisierung der Aktivatorbahnen mit Hilfe der Laserkonfokalmikroskopie

Bahn Nr.	Ergebnis der Laserkonfokalmikroskopie
Bahn 1	Geschlossener Film; Maximum ca. 2,5 µm
Bahn 2	Inselbildung; Maxima ca. 2 µm
Bahn 3	Inselbildung, Maxima ca. 1,5 µm

In Abbildung 41 ist der zeitliche Verlauf der IR-Emission an ausgewählten Stellen des behandelten Blechs dargestellt. Die Referenzstelle (rote Markierung) befindet sich wieder an einer unbehandelten Stelle. Die blau gekennzeichneten Positionen befinden sich im Bereich der aufgetragenen Aktivatorbahnen. Die Emissionsverläufe sind den verschiedenen Bahnen farblich zugeordnet.

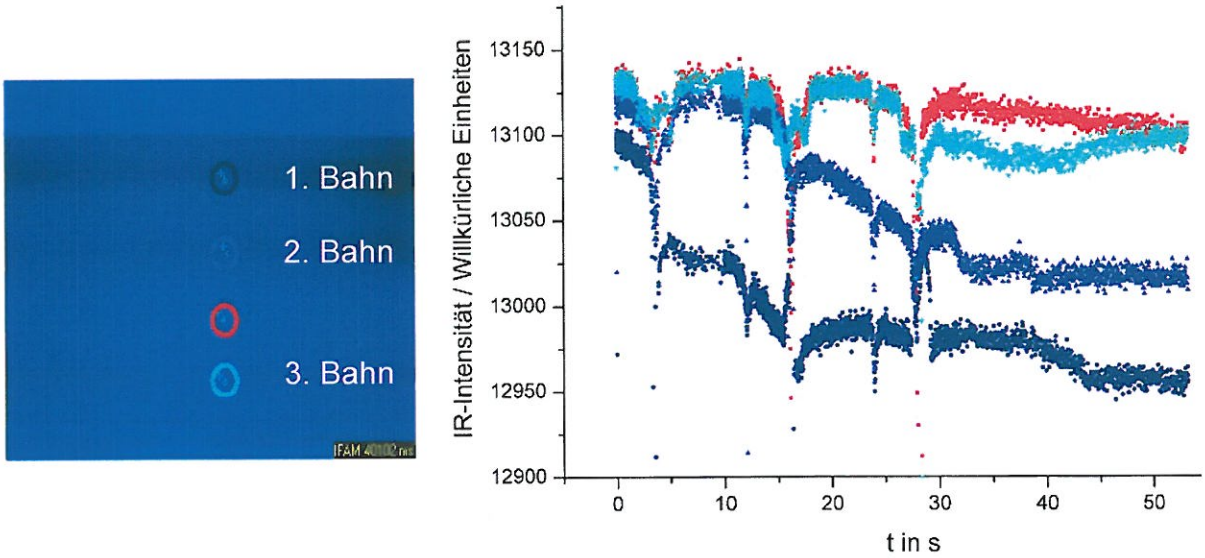

Abbildung 41: IR-Emissionsprofile; automatischer Schwammauftrag von Aktivator auf KTL-Blech

Deutlich ist zu erkennen, dass ein von der Auftragsmenge anhängiger Kontrast im IR detektierbar ist. Die kurzzeitigen Einbrüche der Emissionsverläufe hängen mit dem Durchfahren des beobachteten Bereiches mit dem Dosierkopf (Kältequelle) zusammen. Trotz dieser Störeffekte sind die Unterschiede über einen langen Zeitraum detektierbar. Die langen Verdunstungszeiten sind darauf zurückzuführen, dass das gesamte Blech durch den Auftrag mehrerer Bahnen des Aktivators stark abgekühlt wurde.
Die Auswertung der IR-Emissionsverläufe ist zur Quantifizierung des Auftrags geeignet.

Sek78	M. Seki, H. Kawamura, K. Sanokawa, Transient temperature profile of a hot wall due to an impinging liquid droplet, ASME J. Heat Transf. 100 (1978) 167–169, 1978
Mar96a	M. di Marzo, S. Tinker, Evaporative Cooling Due to a Sparse Spray, Fire Safety Journal 27, 2089-2303, 1996
Mar96b	S. Chandra, M. di Marzo, Y. M. Qiao, P. Tartarici, Effect of Liquid-Solid Contact Angle on Droplet Evaporation, Fire Safety Journal 27, 141-158, 1996
Tar09	P. Tartarini, M.A. Corticelli, L.Tarozzi, Dropwise Cooling, Experimental Tests by Infrared Thermography and Numerical Simulations, Applied Thermal Engineering, 29, 1391 – 1397, 2009
Tar07	L. Tarozzi, A. Muscio, P. Tartaini, Experimental Tests of Dropwise Cooling on Infrared-Transparent Media, Experimental Thermal and Fluid Science 31, 857-865, 2007

3.3.2 Simulationsergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen zur Quantifizierung der Auftragsmengen wurden durch die Simulation basierend auf den Erkenntnissen aus den Abschnitten 3.1.4 und 3.2.2 unterstützt. Dabei war von Interesse, inwieweit die aufgetragene Substanzmenge an der Oberfläche durch entsprechende Auswertungen der Signalintensitäten des Kamerabildes quantitativ erfasst werden kann. In der Simulation erfolgte analog zum Experiment eine Variation der Menge des aufgetragenen Aktivators/Primers. In Abbildung 42 sind beispielhaft die Simulationsergebnisse für den Tropfenauftrag des Aktivators auf KTL-Blech gezeigt.

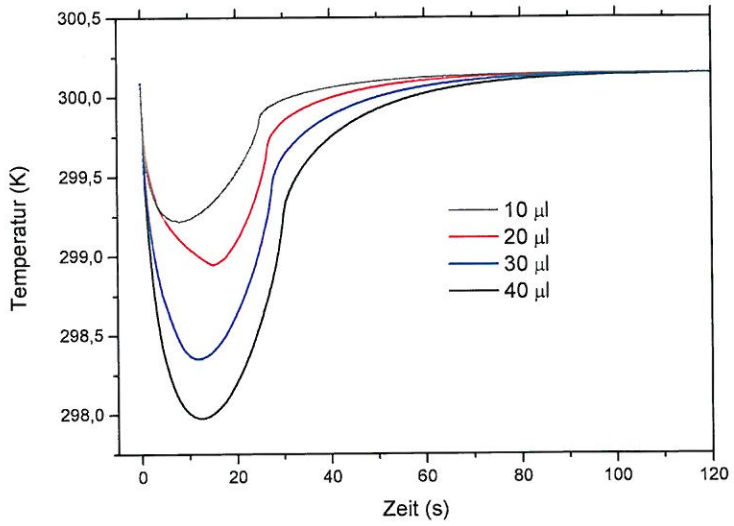

Abbildung 42: Simulierte Veränderung des Temperaturverlaufes eines Aktivatortropfens (Aktivator auf KTL-Blech, Tropfenmitte)

Im Fall des Tropfenauftrags konnten durch Variation der Auftragsmengen in der Simulation Hinweise auf eine Quantifizierung der Auftragsmengen aus dem mit der IR-Kamera aufgenommenen Wärmebild abgeleitet werden. So zeigt sich, dass der zeitliche Temperaturverlauf an der Substratoberfläche sowie letztlich die Geschwindigkeit der Rückerwärmung explizit von der Menge des Aktivators abhängt. Wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt wird die Phase der eigentlichen Tropfenverdunstung in der Simulation nicht korrekt wiedergegeben, wohingegen der Vergleich von Experiment und Simulation hinsichtlich der Rückerwärmungsphase eine gute Übereinstimmung liefert.

Bei der Analyse der Rückerwärmungsphase in Abhängigkeit von der aufgetragenen Aktivatormenge zeigt sich, dass der Beginn der Rückerwärmung des Substrats nach dem Verdunsten des Lösemittels für eine Quantifizierung der Auftragsmengen herangezogen werden kann (s. Abbildung 43).

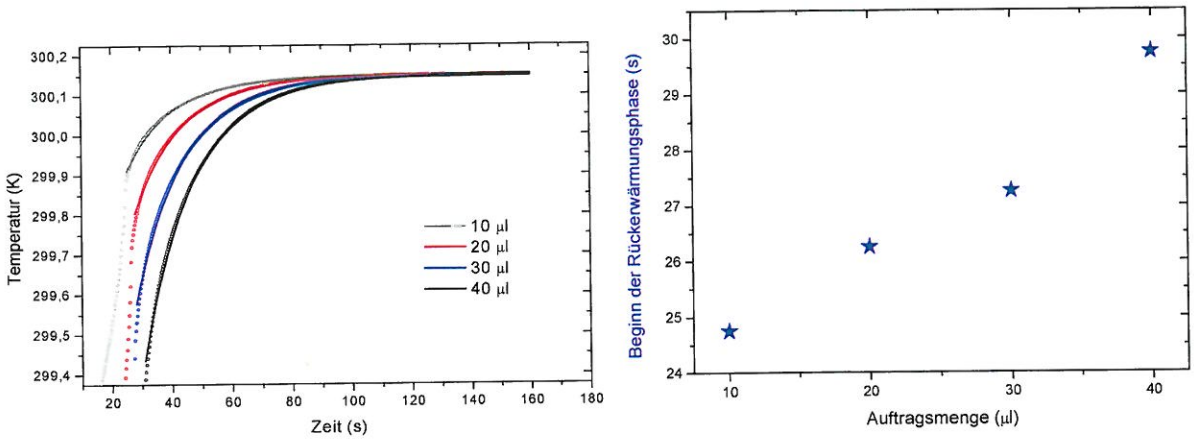

Abbildung 43: Verlauf der exponentiellen Rückerwärmungsphase bei unterschiedlichen Auftragsvolumina (Links), Quantifizierung der Auftragsmengen anhand der Lage des Wendepunktes der Temperaturkurve (Beginn der Rückerwärmung)

Darüber hinaus kann der Temperaturanstieg in der Rückerwärmungsphase mit hoher Genauigkeit durch eine Exponentialfunktion (7) in der Form beschrieben werden.

$$T(t) \sim \exp\left(-\frac{t}{A}\right) + B \qquad (7)$$

Der aus der Regression bestimmte Parameter A korreliert dabei mit der Auftragsmenge, wie in Abbildung 44 dargestellt ist.

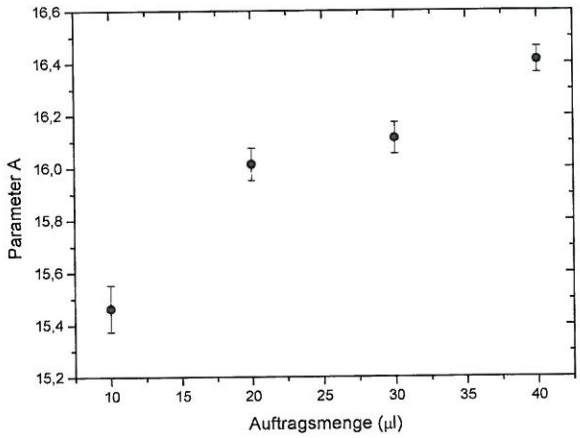

Abbildung 44: Korrelation der Auftragsmenge mit der Geschwindigkeit der Rückerwärmung

Für die Anwendung liefert die Simulation Hinweise auf Auswertungsmöglichkeiten der Temperaturverläufe hinsichtlich einer Korrelation von Auftragsmenge und IR-Signalintensität bzw. dem im IR-Bild detektierbaren Kontrast. Im Fall des robotergestützten Schwammauftrags wurden zur Quantifizierung der Auftragsmengen IR-Untersuchungen der Temperaturverteilung

auf KTL-Blechen durchgeführt (Kapitel 3.3.1). Bei diesem Experiment wurde der Schwamm mit einer definierten Menge an Aktivatorsubstanz getränkt und mit einem Roboterarm bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit über das Substrat geführt. Die resultierende Temperaturverteilung auf dem KTL-Blech wurde ausgehend von den bei den Tropfenuntersuchungen validierten numerischen Parametern simuliert. In Abbildung 45 ist die simulierte Temperaturverteilung auf dem KTL-Blech (Größe 30 cm x 21 cm) bei einer Schwammbreite von 3 cm wiedergegeben. In der Simulation wird die Temperaturverteilung aus Symmetriegründen nur für die linke Seite des Bleches berechnet.
Dadurch dass der Schwamm im unteren Bereich des KTL-Blechs aufgesetzt wird, kommt es dort zu einer stärkeren Temperaturerniedrigung als im oberen Bereich des Blechs, weil die Menge an aufgetragenem Aktivator durch Austrocknung des Schwamms kontinuierlich über die Auftragsstrecke abnimmt. Zur Quantifizierung der Auftragsmengen beim robotergeführten Schwammauftrag kann die aus der Simulation resultierende Temperaturverteilung herangezogen werden.

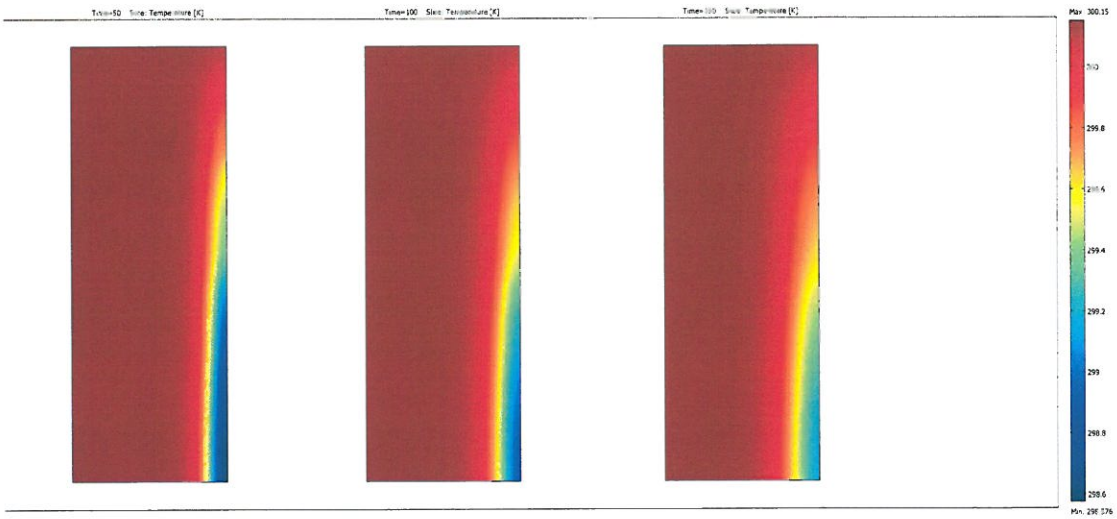

Abbildung 45: Simulierte Temperaturverteilung beim robotergeführten Schwammauftrag auf einem KTL-Blech nach verschiedenen Zeiten (50, 100, und 150 Sekunden)

3.4 Aspekte zur fertigungstechnischen Integration und bedarfsgerechten Anpassung der Prozessüberwachung

3.4.1 Fertigungstechnische Integration der IR-Überwachung

Im Folgenden werden die Möglichkeiten der fertigungstechnischen Integration der Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags exemplarisch für die LKW-Produktionslinie im MAN-Werk München beschrieben.
Innerhalb der Fertigungsstrasse erfolgt das Kleben von Seiten- und Frontscheiben des Führerhauses. Vor dem Klebprozess werden sowohl die Seiten- und Frontscheiben als auch die für die Klebung am Führerhaus vorgesehenen Bereiche mit dem Aktivator- und Primersystem benetzt. Aus fertigungstechnischen Gründen erfolgt der Primer- und Aktivatorauftrag teilweise automatisiert bzw. wird manuell durchgeführt. Eine Übersicht über die Auftragsverfahren von Aktivator- und Primersystemen für den dargestellten Anwendungsfall ist in Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Auftragsverfahren für den Aktivator-/ Primerauftrag im MAN-Werk München

Ort des Auftrags	Auftragssystem	Auftragsverfahren
Seitenscheibe	Aktivator	Automatisierter Schwammauftrag
	Primer	Automatisierter Sprühauftrag
Fronscheibe	Aktivator	Manueller Schwammauftrag
	Primer	Manueller Schwammauftrag
LKW-Führerhaus	Aktivator	Manueller Schwammauftrag

Der automatisierte Auftrag des Primer- und Aktivatorsystems auf den Seitenscheiben erfolgt innerhalb einer Roboterzelle. Die Seitenscheiben sind dabei am Roboter fixiert und werden an einem Aktivator-getränkten Schwamm entlang geführt. Danach erfolgt der Sprühauftrag des Primersystems. Im Anschluss daran werden die Seitenscheiben zum Ablüften auf einen Scheibentisch abgelegt (s. Abbildung 46).

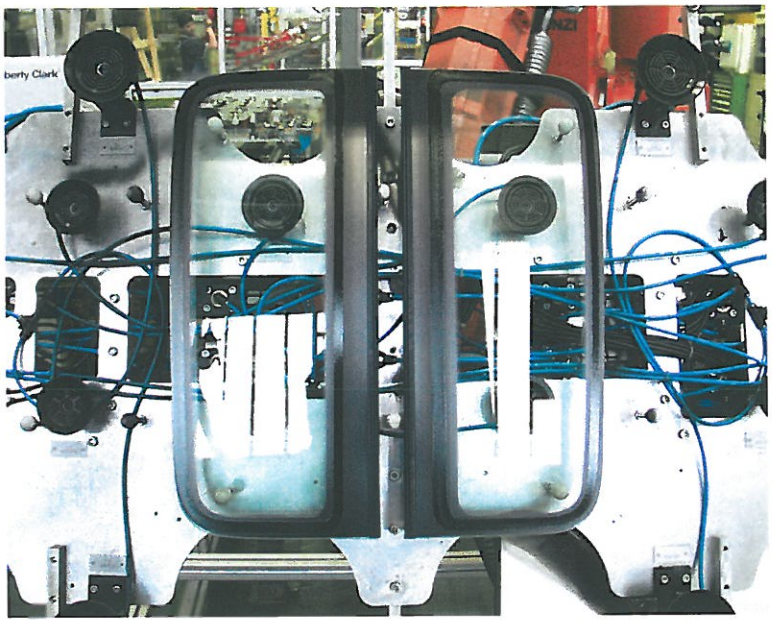

Abbildung 46: Seitenscheiben nach dem Auftrag des Aktivator- und Primersystems [MAN Nutzfahrzeuge AG]

Für den manuellen Auftrag des Aktivator- und Primersystems auf der Frontscheibe ist diese in einem flexiblen Ablagesystem positioniert. Die Fixierung der Scheibe wird durch die Verwendung von Saugnäpfen innerhalb des Ablagesystems realisiert (Abbildung 47, Links). Der manuelle Auftrag des Aktivator- und Primersystems auf den für die Klebung relevanten Bereichen des Führerhauses erfolgt direkt innerhalb der Fertigungsstraße (Abbildung 47, Rechts, markierter Bereich).

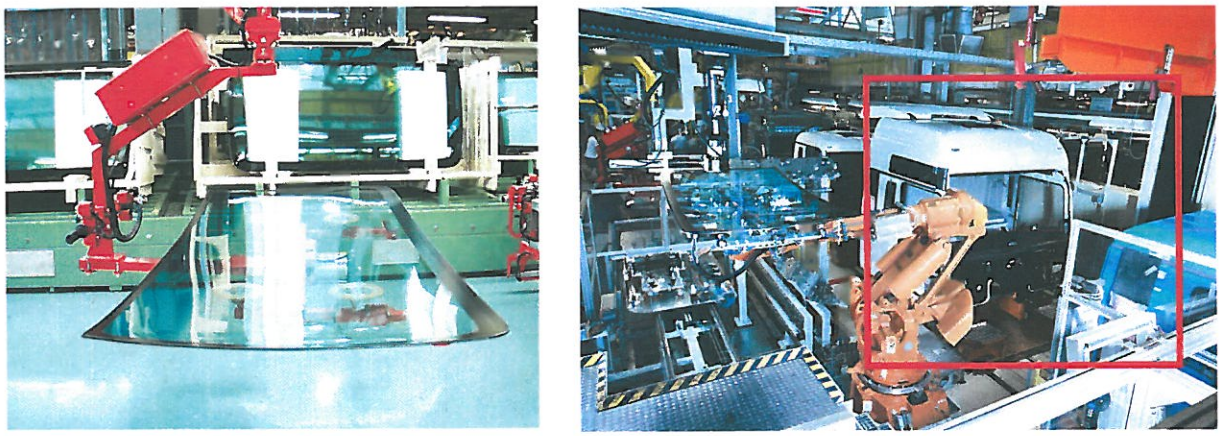

Abbildung 47: Frontscheibe in Halterung (Links) und Klebung von Front- und Seitenscheiben am LKW-Führerhaus (Rechts) [MAN Nutzfahrzeuge AG]

Das IR-Überwachungssystem soll die korrekte Auftragung von Aktivator- und Primersysteme überwachen und bei unkorrektem Auftrag eine Warnung generieren. Entsprechend diesen Anforderungen sind bei der Einrichtung der IR-Kamera verschiedene Punkte zu beachten. Ein wesentlicher Faktor hinsichtlich der funktionalen Anforderungen ist die Kamerapositionierung im zu überwachenden Arbeitsbereich. Diese hängt Abstand und Einfallswinkel zu der zu

überwachenden Oberfläche ab. Im vorliegenden Anwendungsfall und unter Einsatz eines industrietauglichen Kamerasystems mit einer geometrischen Auflösung von 640 x 512 Pixel liegt der Abstand von Aufnahmeeinheit zur Oberfläche für ein optimales Auflösungsvermögen und einer guten Bildqualität im Bereich 1 bis 2 m. Der optimale Einfallswinkel des IR-Kamerasystems liegt in einem Winkelbereich größer 45° (s. Abbildung 48).

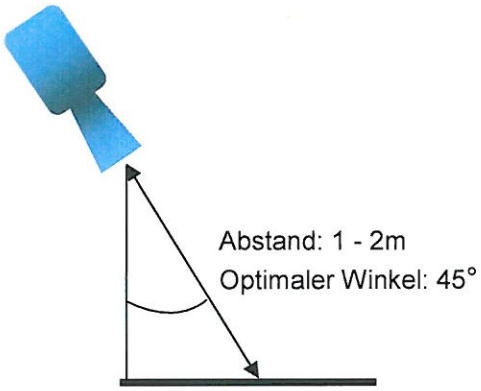

Abbildung 48: Optimaler Winkel und Abstand der Überwachungskamera

Die Kameraeinheit kann sowohl fest als auch beweglich installiert werden. Eine bewegliche Installation bietet im Hinblick auf den beschriebenen Anwendungsfall mehr Flexibilität und sollte aus praktischen Gründen vorgezogen werden. Im Fall von Wartungsarbeiten kann z.B. die Kamera ausgeschwenkt werden und muss nicht demontiert werden. Zudem bietet eine bewegliche Aufnahmeeinheit die Möglichkeit, den gesamten Bereich mit einer hohen Auflösung zu erfassen. Für die Überwachung der genannten Komponenten, der Seitenscheiben, Frontscheibe und dem Führerhaus, sollte ggf. ein PC-basiertes Mehrkamerasystem zum Einsatz kommen. Die Integration einer oder mehrerer Überwachungseinheiten in ein zentrales Netzwerk ist für Fertigungsumgebungen im Automobilbau sinnvoll und bietet eine praktikable Lösung hinsichtlich der zentralen Steuerung und Überwachung.

Die Datenübertragung von Aufnahmeeinheit sowie Auswerte- und Bedieneinheit ist in der Regel von der Wahl des Bildverarbeitungssystems und vom Hersteller der Komponenten vorgegeben. Zum Einsatz kommen u.a. GPIB-, LAN-, RS-232 insbesondere aber auch Fire-Wire-Schnittstellen, die die Vorteile einer schnellen Videoaufzeichnung ohne Einbußen an die Signaldynamik vereinen. Des Weiteren bieten LAN gestützte Kamerasysteme völlig neue Perspektiven hinsichtlich Intra- und Internetnutzung. Für die Übertragung eines Signals z.B. bei unkorrektem Auftrag oder Störung des Überwachungssystems bieten sich unterschiedliche Lösungen an. Diese sind sowohl von der Hardwarekonfiguration der Bedieneinheit und damit von der Auswertesoftware als auch von den Komponenten (z.B. Roboter) der Fertigungsumgebung abhängig. Für die Anwendung der automatisierten Aktivator- und Primerüberwachung in einer Fertigungsumgebung wie z.B. der MAN Nutzfahrzeuge AG sollte das Auswertesystem idealerweise mit einem digitalen Ausgang ausgestattet sein, da die entsprechenden Schnittstellen bei Industrierobotern in der Regel bereits als Standardkommunkationsschnittstelle vorhanden sind. Eine Anbindung an bestehende Bussysteme wie z.B. Profibus sind über entsprechende Peripheriekomponenten möglich.

Da Aktivator- und Primersysteme sich im laufenden Produktionsprozess auf dem Kamerafenster absetzen und die Funktionalität des IR-Überwachungssystems einschränken können, muss vor dem Einsatz in der industriellen Fertigung die Aufnahmeeinheit vor Schmutz oder Beschädigung geschützt werden. Ein IR-transparenter Schutz (z.B. Polymerfolie) bietet geeigneten Schutz.
Neben den funktionalen Anforderungen sollten auch einige nichtfunktionale Anforderungen wie z.B. die Zuverlässigkeit oder Wartbarkeit der Detektionseinheit berücksichtigt werden. Eine hohe Zuverlässigkeit lässt sich z.B. durch die Auswahl von robusten und gegen Störungen (z.B. Störstrahlung) resistenten Aufnahme- und Auswerteeinheiten erzielen.

3.4.2 Demonstration der Umsetzbarkeit des Verfahrens

Die Umsetzbarkeit des Verfahrens wurde anhand des automatisierten, robotergestützten Aktivatorauftrags demonstriert. Eine konstante Dosierung der Substratmenge erfolgte durch ein vollautomatisches Dosiersystem der Firma Hilger & Kern. Die Dosieranlage arbeitet über eine Druckluftsteuerung und wird über ein 3/2-Wege-Magnetventil angesteuert. Die Steuerung des Magnetventils erfolgte über den digitalen E/A des verwendeten KUKA-Roboters (s. Abbildung 49).

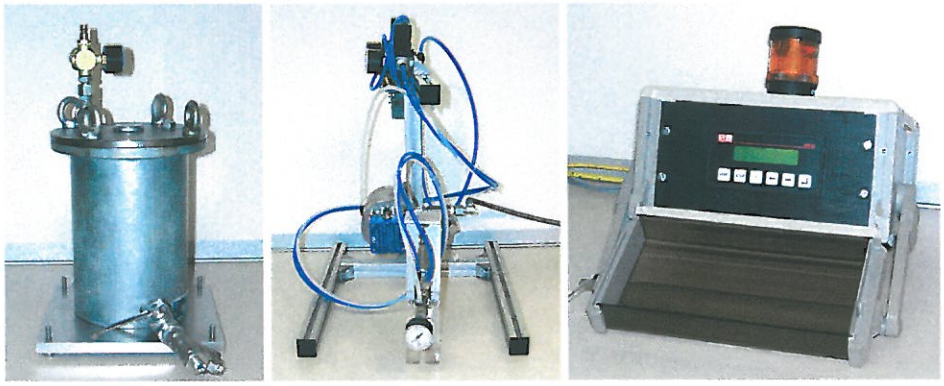

Abbildung 49: Komponenten der Dosieranlage; Links: Substratbehälter, Mitte: Spritzpistole mit Zuleitungen, Rechts: Steuermodul

Der automatisierte Aktivatorauftrag erfolgte sowohl als Sprüh- und Schwammauftrag (s. Abbildung 50, links u. rechts). Zur Fixierung von Dosierpistole und Schwamm ist eine Halterung konstruiert und an den Roboterflansch montiert worden (s. Abbildung 50, rechts).

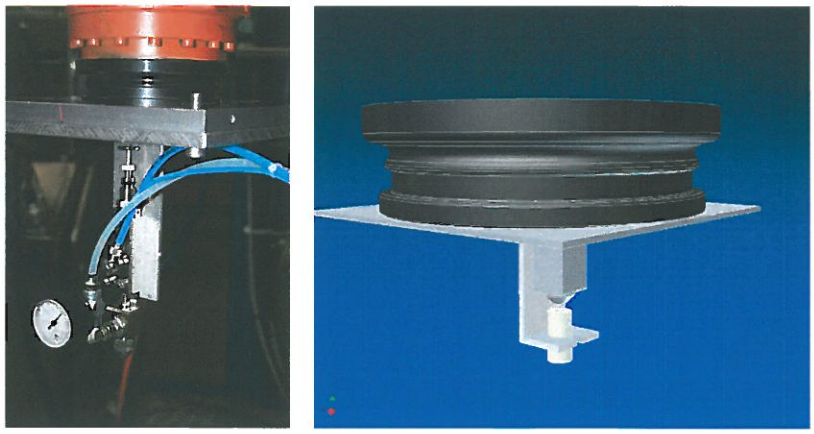

Abbildung 50: Spritzpistole am Roboterflansch (Links) und CAD-Zeichnung des Schwammhalters am Roboterflansch (Rechts)

Für den automatisierten Aktivatorauftrag wurde eine kontinuierliche Bildauswertung umgesetzt. Zur Auswertung und Visualisierung der von der Kamera erfassten Daten wurde ein Auswertealgorithmus entwickelt. In Abbildung 51 ist das Programmfenster zur Darstellung und Auswertung der Kamerabilder dargestellt. Das Livebild der Kamera und die entsprechende Auswertung werden jeweils in einem eigenen Fensterfeld visualisiert.
Zudem können Einstellungen zur Festlegung der Detektionsgrenzen und des Analysebereichs vorgenommen werden. Ein entsprechend den eingestellten Parametern korrekter Auftrag ist im Auswertefenster grün gekennzeichnet.

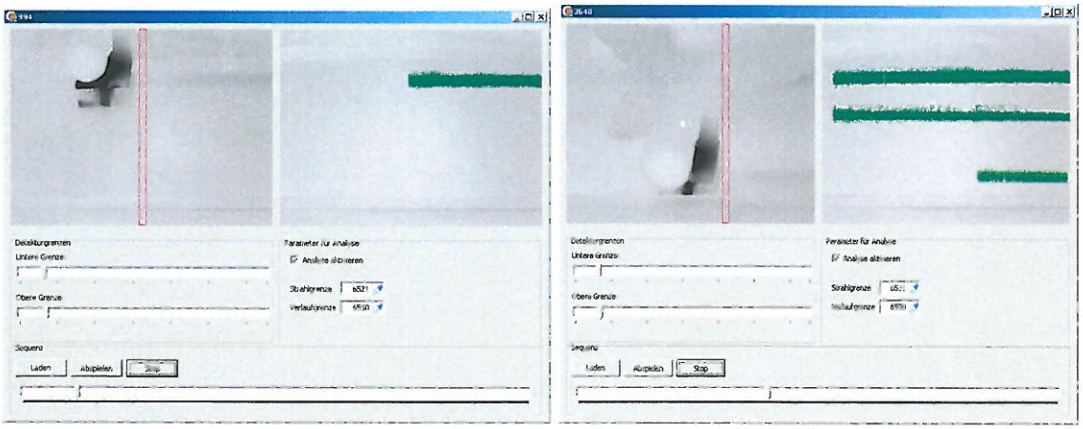

Abbildung 51: Auswertung des Aktivatorauftrags

Entsprechend den ermittelten Anforderungen bezüglich der Anordnung und Ansteuerung der Hardwarekomponenten wurde die Kamera positioniert und mit der Bedien- und Auswerteeinheit verbunden (s. Abbildung 52). Die von der Kamera gelieferten Daten wurden zeitgleich mit dem Aktivatorauftrag aufgezeichnet und ausgewertet.

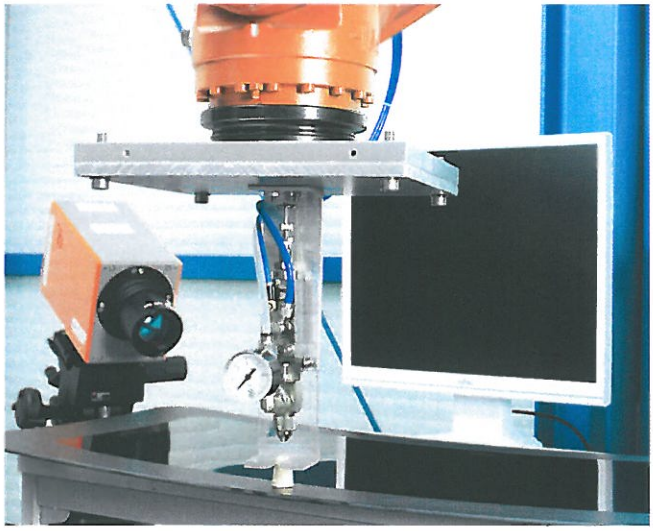

Abbildung 52: Abbildung Aktivatorauftrag im Technikum

3.4.3 Bedarfsgerechte Anpassung der Prozessüberwachung

Aus der Diskussion mit den im Projekt-begleitenden Ausschuss vertretenen Industriepartnern ergab sich, dass für die meisten industriellen Anwendungen der generelle Nachweis, dass Aktivator bzw. Primer auf die Bauteiloberfläche aufgetragen wurde, ausreichend ist. Eine genaue, geometrische Erfassung der Auftragsbereiche oder sogar eine Quantifizierung der Aktivatormenge spielen für die meisten Anwendungen eine untergeordnete Rolle. Für solche Einsatzzwecke lassen sich die im vorliegenden Forschungsvorhaben ermittelten Erkenntnisse auf einfache Detektorsysteme übertragen, die aufgrund ihres geringen Preises besonders auch für KMU von großem Interesse sind. Im Folgenden wird auf einige Anforderungen und entsprechende Lösungsansätze eingegangen (s. Tabelle 3).

Beschränkt sich die Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags nur auf die Erfassung des Auftrags an einer bestimmten Position der Auftragsspur, so kann auf den Einsatz einer teurer IR-Kamerasysteme verzichtet werden. Die IR-Emission lässt sich punktuell mit einem kostengünstigen IR-Einzeldetektor erfassen und mit den in einer einfachen Auswerteeinheit hinterlegten Referenzdaten vergleichen. Kommen dabei einfache Auswerteelektroniken zur Anwendung, sind Systempreise unter 5.000 € realisierbar.

Soll zusätzlich die Auftragsgeometrie erfasst werden, so ist abhängig vom geforderten örtlichen Auflösungsvermögen eine kostengünstige Lösung durch Verwendung von in Reihen angeordneten IR-Detektoren möglich. Der finanzielle Aufwand für Detektoren und die Auswerteinheit liegt in diesem Fall unter 10.000 €.

Steigen die Anforderungen an die geometrische Auflösung, muss eine IR-Kamera zum Nachweis des Aktivator-/Primerauftrags eingesetzt werden. Die Empfindlichkeit preiswerter, ungekühlter Bolometerkameras reicht für den Einsatz zur Geometrieerfassung des Auftrags aus. In diesem Fall sind Systempreise von weniger als 10.000 € realisierbar.

Für die Quantifizierung des Auftrags ist der Einsatz von IR-Kamerasystemen sinnvoll. Durch Auswertung der Kamerabilder lassen sich Auftragsgeometrien und Auftragsmengen gleichzeitig erfassen. Bei geringen Anforderungen an die Messgenauigkeit reichen ungekühlte Bolometerkameras für die Quantifizierung aus. Für eine präzise Bestimmung der

Auftragsmenge sollten Detektorkameras verwendet werden. Bei der Verwendung von Detektorkameras ist von Systempreisen von mehr als 50.000 € auszugehen.
Unkritisch im Hinblick auf die Auswahl eines Kamera- oder Detektorsystems zur Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags ist das zeitliche Auflösungsvermögen. In der Regel können mit den genannten Detektionssystemen Prozesse im Millisekundenbereich diskretisiert werden, während die bei der Aktivator-/Primerbehandlung auftretenden Effekte sich mit einer Auflösung im Zehntelsekundenbereich hinreichend genau darstellen lassen.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Detektorsysteme

Anforderung	Geometrie	Umsetzung der Überwachung	Kosten
Erfassung des Auftrags	Punktuell	IR-Einzeldetektor mit einfacher Auswerteelektronik	< 5 k€
	Ortsaufgelöst	Je nach Anforderungen: • Zeilendetektoren • ungekühlte Bolometer-IR-Kameras jeweils mit Rechner und Auswertesoftware	 < 5 k€ < 10 k€
Quantifizierung	Punktuell	IR-Einzeldetektor mit Rechner und Auswertesoftware	< 5 k€
	Ortsaufgelöst	Je nach Anforderungen: • Ungekühlte Bolometer-IR-Kameras • Quantendetektor IR-Kameras jeweils mit Rechner und Auswertesoftware	 < 10 k€ > 50 k€

4 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrags

Innerhalb des Projektes ist die Eignung von IR-Kamerasystemen zur Erfassung des Aktivator-/ Primerauftrags auf zu klebenden Bauteiloberflächen zu untersucht und die Breite der Einsatzmöglichkeiten der Methode für die betrachtete Anwendung dargestellt worden. Neben grundlegenden Untersuchungen an Tropfen und Flüssigkeitsfilmen, wurde dargestellt, inwiefern die Thermografie zur Quantifizierung der aufgetragenen Substanzmengen geeignet ist. Zudem wurden Konzepte zur fertigungstechnischen Umsetzung der Methode erstellt und Hinweise zur bedarfsgerechten Anpassung einer Systemlösung gegeben. Dabei wurden sowohl die Anforderungen des automatisierten als auch des manuellen Auftrags der Primer-/Aktivatorsysteme zu berücksichtigt.

Damit sind alle Forschungsziele des Projektes erreicht worden.

5 Verwendung der Zuwendung, Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten bestanden im Wesentlichen in der

- Bestimmung der optimaler Messparameter mit Hilfe der Thermografie
- Durchführung von Thermografieuntersuchungen an definierten Materialien unter vereinbarten Prozessbedingungen
- Durchführung von Thermografieuntersuchungen zur Beurteilung der Quantifizierbarkeit von Aktivatormengen mit Hilfe der Thermografie
- Charakterisierung von Substraten nach Auftrag des Aktivatorsystems mit Hilfe von Referenzmethoden
- FEM-Simulation der Wärmetransportvorgänge
- Validierung der Simulationsergebnisse anhand experimentell detektierter Kontraste der IR-Kamera
- Erstellung von Konzepten zur fertigungstechnischen Integration der Untersuchungsmethode und bedarfsgerechten Anpassung der Methode

Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten lag im Bereich der wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter. Grundlagen für die Auswertung der Thermografiedaten sowie für die Simulation der Wärmetransportvorgänge wurden von wissenschaftlichen Mitarbeitern erarbeitet. Die Vorbereitung und Durchführung der experimentellen Arbeiten erfolgte durch die technischen Mitarbeiter. Die studentischen Hilfskräfte wirkten bei der Vorbereitung und Durchführung der experimentellen Arbeiten mit.

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um den Projekterfolg sicherzustellen.

6 Wirtschaftliche Bedeutung des Themas für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

6.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Vor allem Unternehmen des Wirtschaftszweigs Fahrzeugbau, aber auch andere Unternehmen, in deren Produktionsprozesse haftvermittelnde Systeme eingesetzt werden, profitieren von den Forschungsergebnissen im Hinblick auf eine Verbesserung der Qualitätssicherung ihrer klebtechnischen Fertigung. Zudem können Unternehmen, die Dienstleistungen im Hinblick auf die Erarbeitung von Software oder Anlagentechnik erbringen, die Ergebnisse aus dem beschriebenen Forschungsvorhaben nutzen.

Eine intensive Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse besteht voraussichtlich im Bereich der Mess-, Regel-, und Automatisierungstechnik. Zudem können auch Fachgebiete wie der Bereich Werkstoffe Materialien, aber auch die Fachgebiete Konstruktion und Produktion die Forschungsergebnisse nutzen.

6.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Von der Entwicklung einer IR-Kamera zur Überwachung des Aktivator- bzw. Primerauftrags mit vorgegebener Auswertesoftware profitieren Unternehmen, die Aktivatoren bzw. Primer innerhalb ihrer klebtechnischen Prozesse verwenden. Mit der Umsetzung einer solchen Systemlösung sind diese in der Lage, die Prozesssicherheit ihrer Fertigungsschritte zu erhöhen und mögliche Schadensfälle durch fehlenden oder falschen Auftrag der entsprechenden Substanzen zu vermeiden. Zudem verbessern sie ihr bestehendes Qualitätssicherungssystem um einen weiteren qualitätssichernden Schritt und werden in die Lage versetzt, den korrekten Auftrag ihrer Primersysteme nachzuweisen und zu dokumentieren. Das Projekt sollte die Entwicklung einer apparativ und damit kostenmäßig angepassten Kameraversion fördern. Zudem bestand eine Anforderung an die Überwachung darin, dass sie entsprechend den KMU-Anforderungen auch für den manuellen Auftrag der Aktivator-/ Primersysteme einsetzbar sein sollte. Damit wird auch kleineren Unternehmen die Möglichkeit eröffnet, konkurrenzfähig zu bleiben und hohen Qualitätsanforderungen zu entsprechen.

Anbieter von IR-Kamerasystemen (KMU) können auf Basis der Projektergebnisse Systeme zur Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags entwickeln und anbieten. Durch die Erweiterung ihrer Produktpalette wird der bisherige Kundenkreis der Kamerahersteller z.B. durch Firmen aus dem Bereich der Automobil- oder Schienenfahrzeugindustrie erweitert. Damit können sie ihre Marktstellung behaupten und ausbauen.

Kleine und mittelständische Firmen aus dem Bereich der Systemintegration und Softwareentwicklung können zudem an der Erarbeitung einer Systemlösung teilhaben. Über den Vertrieb der Systemlösung hinaus können sie die Integration der Kamerasysteme in bestehende Fertigungsumgebungen umsetzen und damit ebenfalls ihren Kundenkreis erweitern.

7 Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse/ Transfer der Forschungsergebnisse

Der Kenntnistransfer von der Forschungsstelle in die Industrie erfolgte über die Treffen des Projekt-begleitenden Ausschusses. Vier Projekttreffen haben im Laufe des Projektes stattgefunden. Durch die Mitwirkung von Anwendern aus dem Fahrzeugbau, Herstellern von Applikationssystemen, IR-Kameraherstellern und Dienstleistern aus dem Bereich Systemintegration im Projekt-begleitenden Ausschuss ist die Anwendung der Projektergebnisse in der Praxis sichergestellt.

Zudem wurden Projektergebnisse in Form eines Posters auf dem Termografie-Kolloquium 2009 in Stuttgart (U. Meyer, S. Markus, P. Schiffels, M. Sieben, S. Dieckhoff, *Untersuchung des Einsatzes von IR-Kamerasystemen für die Qualitätssicherung bei der Überwachung des Aktivator-/ Primerauftrags in der Klebtechnik*, Termografie-Kolloquium 2009, 8.-9. Oktober 2009, Stuttgart) sowie dem 10. Klebtechnischen Kolloquium in Frankfurt (Susanne Markus, Udo Meyer, Marcel Sieben, Peter Schiffels, Stefan Dieckhoff, *Der Einsatz von IR-Kamerasystemen für die Qualitätssicherung im Fertigungsprozess Kleben am Beispiel der Überwachung des Aktivator-/Primerauftrags,* 10. Kolloquium „Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik", Franfurt a. M, 23.-24.Februar 2010) präsentiert. Nach Beendigung des Projektes sind Veröffentlichungen in praxisrelevanten Fachzeitschriften wie z.B. der Adhäsion vorgesehen. Zudem werden die Ergebnisse durch Vorträge oder weitere Poster auf Fachveranstaltungen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Weitere Anwendungen ergeben sich aus der umfangreichen Beratungstätigkeit des Antragstellers insbesondere für KMU.

Es wird beabsichtigt, Ergebnisse aus dem Projekt in Teilbereiche einer gewerblichen Schutzrechtsanmeldung einfließen zu lassen.

8 Förderhinweis

Das Forschungsvorhaben wurde über die AIF durch das BMWI gefördert.

9 Durchführende Forschungsstelle

Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Bereich Klebtechnik und Oberflächen, Wiener Straße 12, 28359 Bremen

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer
Projektleiter: Dr.-Ing. Susanne Markus

Bremen, den 03.08.2010
Ort, Datum