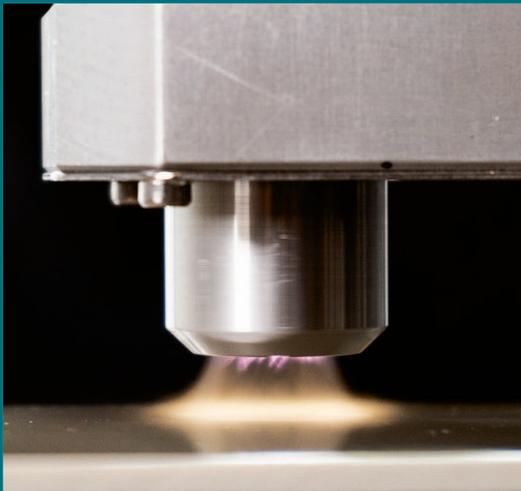
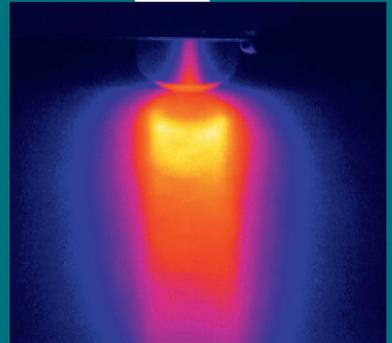


# Thermografische Qualitätskontrolle für Oberflächen- vorbehandlungsprozesse



© SKZ



© SKZ

Inline-Qualitätskontrolle von  
Oberflächen-  
vorbehandlungsprozessen  
auf Kunststoffen mittels Thermografie

Michael Heilig, David Herbig, Eduard Kraus, Thomas Hochrein, Martin Bastian

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Herausgeber)

# **Thermografische Qualitätskontrolle für Oberflächenvorbehand- lungsprozesse**

Inline-Qualitätskontrolle  
von Oberflächenvorbehandlungsprozessen  
auf Kunststoffen mittels Thermografie

1. Auflage



SKZ – Forschung und Entwicklung

**SKZ - Das Kunststoff-Zentrum (Hrsg.)**

**Thermografische Qualitätskontrolle  
für Oberflächenbehandlungen**

Inline-Qualitätskontrolle von Oberflächenvorbehandlungen auf  
Kunststoffen mittels Thermografie

Shaker Verlag  
Düren 2022

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die Autoren:

Michael Heilig  
David Herbig  
Dr. Eduard Kraus  
Dr. Thomas Hochrein  
Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8763-5

ISSN 2364-754X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Das Vorhaben 20320 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## **Kurzfassung**

Für optimale Ergebnisse beim Kleben, Bedrucken, Lackieren, Laminieren und Beschichten von Kunststoffbauteilen ist eine vorbereitete und kontaminationsfreie Oberfläche sowie oftmals eine zusätzliche Oberflächenvorbehandlung notwendig, um die Benetzung, Adhäsion, Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Entsprechend gewinnt auch die Qualitätssicherung (QS) von Oberflächenvorbehandlungen an Bedeutung. Die hierfür prinzipiell geeignete passive Thermografie stellt dabei eine zerstörungsfreie, kontaminationsfreie und flächige QS-Methode für Oberflächenvorbehandlungen dar.

Die Eignung der Thermografie zur QS von Oberflächenvorbehandlungen wurde anhand Atmosphärendruckplasmajets, Beflammen, Coronajet sowie kaltaktives Plasma untersucht. Verschiedene Behandlungsintensitäten - hervorgerufen durch unterschiedliche Prozessparameter - wurden anschließend durch Kontaktwinkelmessungen und die Auswertung nach verschiedenen Modellen sowie Klebungen und deren Zentrifugalzugprüfung referenziert. Anschließend wurden verfahrensabhängige Auswertemethoden entwickelt und die verwendeten Kunststoffe hinsichtlich ihres Emissionsgrades charakterisiert. Es zeigte sich auch, dass die Thermografie zur Unterstützung der Prozessparameterfindung bei Coronajet oder rotierenden Plasmadüsen herangezogen werden kann. Verschiedene Vorbehandlungszustände konnten durch Referenzcharakterisierungen abgeglichen und thermische Prozessfenster definiert werden, um sowohl Unter- und Überbehandlungen zu vermeiden sowie Auffälligkeiten im Behandlungsprozess zu detektieren. Auf Basis der Versuchsergebnisse wurde eine Auswertesoftware für Oberflächenbehandlungen programmiert, welche speziell die Überwachung von Kunststoffbehandlungen in einer Linie ermöglicht.



## **Abstract**

For optimal results in bonding, printing, painting, laminating and coating of plastic components, a prepared and contamination-free surface and often an additional surface pre-treatment are necessary to increase wetting, adhesion, long-term stability and reproducibility. The quality assurance (QA) of surface pre-treatments is also gaining importance. Passive thermography, which is in principle suitable for this purpose, represents a non-destructive, contamination-free and two-dimensional QA method for surface pre-treatments.

The thermography for the QA of surface pre-treatments was investigated using atmospheric pressure plasma jets, flame treatment, corona jet and cold-active plasma. Different treatment intensities - caused by different process parameters - were referenced by contact angle measurements and evaluation according to different models as well as bonding tests (centrifugal tensile testing). Subsequently, process-dependent evaluation methods were developed, and the plastics used were characterized with regard to their emissivity. It was also shown that thermography can be used to support process parameter determination for Coronajet or rotating plasma nozzles. Different pre-treatment conditions could be compared by reference characterization and thermal process windows defined in order to avoid under- and over-treatment as well as to detect abnormalities in the treatment process. Based on the test results, an evaluation software for surface treatments was programmed, which specifically enables the monitoring of plastic treatments in a line.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Projektsteckbrief.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Anlass für Forschungsvorhaben.....	1
1.2 Problemstellung .....	3
1.3 Zielsetzung.....	4
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1 Oberflächenvorbehandlungen .....	5
2.2 Oberflächencharakterisierung nach Vorbehandlungen .....	9
2.2.1 Kontaktwinkelmessungen und freie Oberflächenenergie .....	9
2.2.2 Oberflächentopografie.....	12
2.2.3 Oberflächenchemie.....	13
2.2.4 Klebungen und deren Prüfung.....	14
2.2.5 Sonstige Charakterisierungsverfahren für Oberflächenbehandlungen.....	16
2.3 Thermografie.....	17
<b>3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels .....</b>	<b>20</b>
<b>4 Durchgeführte Arbeiten.....</b>	<b>23</b>
4.1 Materialien und Substratreinigung.....	23
4.2 Oberflächenvorbehandlungen .....	24
4.2.1 Beflammen .....	24
4.2.2 Coronajet .....	25
4.2.3 Atmosphärendruckplasmajet.....	25
4.2.4 Kaltaktives Atmosphärendruckplasma .....	26
4.3 Oberflächencharakterisierung .....	27
4.3.1 Kontaktwinkelmessungen .....	27
4.3.2 Klebungen und Prüfung der Klebsysteme.....	29

4.3.3	Topografie.....	29
4.3.4	Chemische Analytik.....	31
4.4	Thermografie .....	31
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>32</b>
5.1	Automatischer Vorbehandlungsstand.....	32
5.2	Thermografische Aufnahmebedingungen und Auswertung.....	33
5.2.1	Thermografische Einflussgrößen.....	34
5.2.2	Kameraposition .....	36
5.2.3	Auswertemethodik.....	37
5.3	Beflammen .....	41
5.3.1	Referenzcharakterisierungen .....	41
5.3.2	Thermografie .....	45
5.3.3	Korrelationen .....	48
5.4	Coronajet .....	50
5.4.1	Referenzcharakterisierungen .....	51
5.4.2	Thermografie .....	54
5.4.3	Korrelationen .....	55
5.5	Kaltaktives Atmosphärendruckplasma.....	57
5.5.1	Referenzcharakterisierungen .....	57
5.5.2	Thermografie .....	60
5.6	Statischer Atmosphärendruckplasmajet .....	63
5.6.1	Referenzcharakterisierungen .....	63
5.6.2	Thermografie .....	70
5.6.3	Korrelationen .....	73
5.7	Rotierender Atmosphärendruckplasmajet .....	74
5.7.1	Referenzcharakterisierungen .....	74
5.7.2	Thermografie .....	86
5.7.3	Korrelationen .....	94
5.8	Auswertesoftware für Oberflächenbehandlungen .....	98

---

5.9	Industrielle Versuche .....	99
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XIX</b>