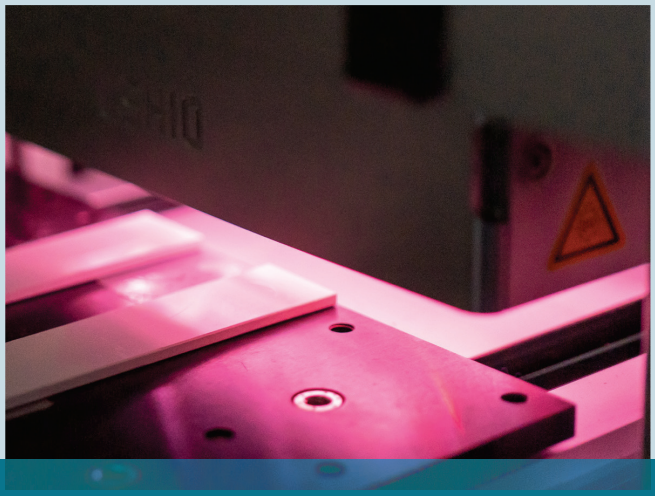
Das Kunststoff-Zentrum

FORSCHUNGSBERICHT



VUV-Bonding

Entwicklung einer innovativen Fügemethode zum klebstofffreien Verbinden von Kunststoffen mittels VUV-Strahlung

Christian Eck, Michael Heilig, Eduard Kraus, Benjamin Baudrit, Thomas Hochrein, Martin Bastian

SKZ – Forschung und Entwicklung

SKZ - Das Kunststoff-Zentrum (Hrsg.)

VUV-Bonding

Entwicklung einer innovativen Fügemethode zum klebstofffreien Verbinden von Kunststoffen mittels VUV-Strahlung

Shaker Verlag
Düren 2023

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:

Christian Eck
Michael Heilig
Eduard Kraus
Benjamin Baudrit
Thomas Hochrein
Martin Bastian

Copyright Shaker Verlag 2023
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9169-4
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 • E-Mail: info@shaker.de

Förderhinweis

Das Vorhaben 20525 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:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Fügeverfahren (Schweißen, Kleben, mechanisches Verbinden) stellt der Einsatz von vakuumultravioletter Strahlung (VUV) dar. Durch die gezielte Modifikation der Oberflächen der polymeren Fügepartner mithilfe von VUV wurde es möglich, Verbindungen bei Temperaturen weit unterhalb der Fließgrenze des Bulk-Materials zu realisieren, ohne den Einsatz von Klebstoffen oder mechanischen Verbindungselementen. Dieser Effekt basiert auf einer Feinstreinigung und der Erhöhung der Polarität der Materialien sowie einem lokal herabgesetzten Erweichungsbereich, der Verschlaufungen von Polymerketten auf molekularer Ebene ermöglicht und somit eine Lastübertragung über die Fügeebene hinweg unterstützt.

Im Hinblick auf eine praxisnahe Umsetzung konnte gezeigt werden, dass bestehende Fügeanlagen um die VUV-Technologie erweitert werden können und deutlich niedrigere Prozesstemperaturen im Vergleich zu Schweißverfahren möglich sind. VUV-unterstützte Fügeprozesse weisen ein großes Potenzial zur Energie- und CO_2-Einsparung auf. Durch die Anwendung der VUV-Technologie wurden feste Verbindungen mit hoher Zugscherfestigkeit bei niedrigen Temperaturen erreicht, ohne dass es zu Materialversagen kam. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in der Kunststoff-Fügetechnik und trägt zur Weiterentwicklung und Verbreitung dieser Technologie bei.

Abstract

A promising alternative to conventional joining methods (such as welding, adhesive bonding, and mechanical fastening) is the use of vacuum ultraviolet radiation (VUV). By selectively modifying the surfaces of the polymer joining partners using VUV, it has become possible to achieve connections at temperatures well below the bulk material's flow limit, without the need for adhesives or mechanical connectors. This effect is based on surface cleaning and increased material polarity, as well as a localized reduction in the softening range, which allows for entanglement of polymer chains at the molecular level, enabling load transfer across the joining interface.

In terms of practical implementation, it has been demonstrated that existing joining systems can be expanded to incorporate VUV technology, enabling significantly lower process temperatures compared to welding methods. VUV-assisted joining processes have significant potential for energy and CO_2 savings. By applying VUV technology, strong connections with high tensile shear strength have been achieved at low temperatures without material failure. This opens up new possibilities in the field of plastic joining technology and contributes to the advancement and dissemination of this technology.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **I**

Abkürzungsverzeichnis ..... **III**

Projektsteckbrief ..... **IV**

1 Einleitung **1**

1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben 1

1.2 Problemstellung 2

1.3 Zielsetzung 3

2 Stand der Technik **4**

2.1 Vakuumultraviolett-Strahlung 4

2.2 Wechselwirkung von VUV-Strahlung mit Oberflächen 5

2.2.1 Chemische Modifikation 6

2.2.2 Morphologische Änderungen 8

2.2.3 Auswirkungen auf die Glasübergangstemperatur 10

2.3 Fügen mithilfe von VUV-Strahlung 12

2.3.1 Anorganische Verbindungen 13

2.3.2 Hybridverbindungen 14

2.3.3 Homogene Polymerverbindungen 15

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels **17**

4 Experimentelles **18**

4.1 Materialien 18

4.2 Methoden 19

4.2.1 VUV-Aktivierung 19

4.2.2 Kontaktwinkelmessungen 19

4.2.3 Röntgenphotoelektronenspektroskopie 19

4.2.4 Weißlichtinterferometrie 20

4.2.5 Eindringprüfungen mittels Universal-Surface-Tester 20

4.2.6 Thermische Analysen 21

4.2.7 Mechanische Prüfungen 22
4.2.8 Abwaschversuche mit polaren Lösemitteln 24
4.2.9 Alterungsprüfungen 24

5 Ergebnisse und Diskussion 26

5.1 Oberflächenmodifikation und -charakterisierung 26
5.1.1 Vorbehandlung mit VUV-Strahlung 26
5.1.2 Rauheit 28
5.1.3 Zeitstabilität der Aktivierung 30
5.1.4 Chemische Zusammensetzung der Oberflächen 31
5.1.5 Freie Oberflächenenergie 33
5.1.6 Adhäsionsprüfungen mittels Klebungen 34
5.1.7 Abwaschversuche mit polaren Lösemitteln 35
5.2 VUV-unterstützte Fügeversuche 37
5.2.1 Entwicklung des Fügeaufbaus 37
5.2.2 Eingrenzung des Versuchsraums 39
5.2.3 Mechanische Eigenschaften 41
5.2.4 Bewertung der Alterungsstabilität 50
5.2.5 Fügeverhalten von Polypropylen 54
5.3 Prozesstechnische Bewertung des Fügeverhaltens 54
5.3.1 Strukturintegrität von low-T-Verbindungen 55
5.3.2 Ressourcen- und Energieeinsparpotenziale 56

6 Zusammenfassung 58

7 Summary 61

8 Anhang 63

9 Abbildungsverzeichnis 65

10 Tabellenverzeichnis 68

11 Literaturverzeichnis 69

Abkürzungsverzeichnis

ABS *Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer*

AFM *Atomic Force Microscopy*

CAT *Centrifugal Adhesion Testing*

COC *Cycloolefin-Copolymer*

CPO *cyclisches Polyolefin*

DMA *dynamisch-mechanische Analyse*

DSC *dynamische Wärmestromdifferenz-Kalorimetrie*

IPA *Isopropanol*

LMWOM *Low Molecular Weight Oxidized Materials*

MFC *Mass Flow Controller*

MVR *Melt Volume-flow Rate*

OWRK *Owens-Wendt-Rabel-Kaelble*

PEEK *Polyetheretherketon*

PMMA *Polymethylmethacrylat*

PP *Polypropylen*

PS *Polystyrol*

SFE *Surface Free Energie*

T_g *Glasübergangstemperatur*

UST *Universal-Surface-Tester*

VUV *Vakuumultraviolett*

WLI *Weißlichtinterferometrie*

XPS *Röntgenphotoelektronenspektroskopie*

Projektsteckbrief

In der Kunststofftechnik etablierte Fügeverfahren wie Kleben, mechanisches Verbinden oder Schweißen sind häufig problembehaftet, wenn spezielle Anforderungen an die resultierenden Verbindungen hinsichtlich Transparenz, Morphologie, Dichtigkeit oder Alterungsbeständigkeit gestellt werden.

Der Einsatz vakuumultravioletter Strahlung stellt eine vielversprechende Alternative zu den klassischen Fügeverfahren dar. Die Oberflächen der polymeren Fügepartner konnten mittels VUV so modifiziert werden, dass Verbindungen bei Temperaturen deutlich unterhalb der jeweiligen Fließgrenze des Bulk-Materials realisiert werden konnten, ohne Klebstoffe oder mechanische Verbindungselemente einzusetzen. Neben einer Feinstreinigung sowie der Erhöhung der Polarität der Materialien beruht der Effekt insbesondere auf einem lokalen Herabsetzen der Erweichungstemperatur, was auf molekularer Ebene Verschlaufungen von Polymerketten und damit eine Lastübertragung über die Fügeebene hinweg ermöglicht. Mit Blick auf eine praxisnahe Umsetzbarkeit bzw. Prozessintegration der VUV-Technologie konnte zudem demonstriert werden, dass bestehende Fügeanlagen um die VUV-Technologie erweiterbar und deutlich geringere Prozesstemperaturen im Vergleich zu Schweißprozessen möglich sind. VUV-unterstützte Fügeprozesse bieten damit ein hohes Potenzial für Energie- und CO_2-Einsparungen.

AiF/IGF-Projekt *20525 N*:

„*Entwicklung einer innovativen Fügemethode zum klebstofffreien Verbinden von Kunststoffen mittels VUV-Strahlung*“

Dauer: *01.12.2019 bis 31.05.2022*

Unterstützt durch den projektbegleitenden Ausschuss:

- Albis Distribution GmbH & Co. KG
- bielomatik Leuze GmbH + Co. KG
- BSH Hausgeräte GmbH
- Celanese Europe B.V.
- COATEMA Coating Machinery GmbH
- Continental Automotive GmbH
- Data Modul AG
- Dreve Otoplastik GmbH
- KRAIBURG TPE GmbH & Co. KG
- KraussMaffei Technologies GmbH
- LUM GmbH
- NORMA Group Holding GmbH
- Polymaterials AG
- Pöppelmann GmbH & Co. KG
- RENOLIT SE
- Roche Diagnostics GmbH
- Röhm GmbH

- DuPont International Operations Sàrl
- Frank GmbH
- Freudenberg Technology Innovation SE
- Gerresheimer Regensburg GmbH
- GLENPRO Ingenieurgesellschaft mbH
- Haldex Brake Products Ltd.
- Hella GmbH & Co. KGaA
- Innowep GmbH
- J&M Analytik AG
- Schnick Systemtechnik GmbH & Co. KG
- Seuffer GmbH & Co. KG
- tesa SE
- USHIO DEUTSCHLAND GmbH
- Visteon Electronics Germany GmbH
- Wegener International GmbH
- WIDOS W. Dommer Söhne GmbH
- z-werkzeugbau GmbH