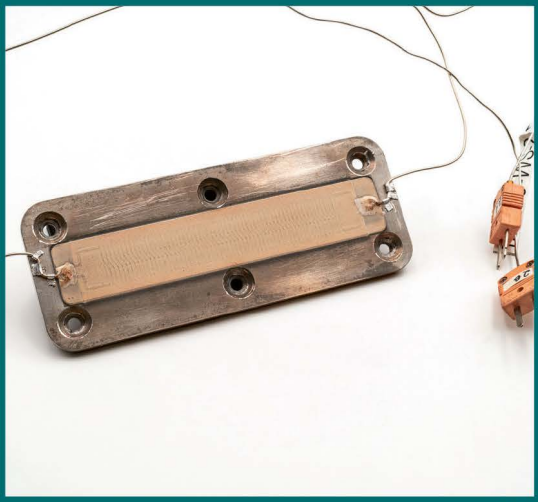
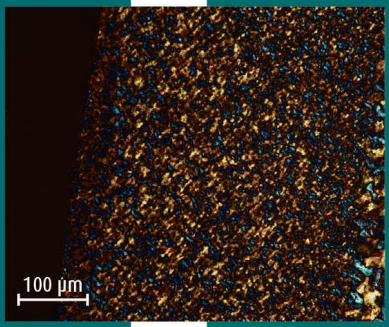
Das Kunststoff-Zentrum
Prüfung · Bildung · Forschung · Zertifizierung · Vernetzung

Wärmeströme beim Heizelementschweißen von Kunststoffen



© SKZ



© SKZ

Messung, Modellierung und Qualitätssicherung

Christian Balzer, Jonathan Lambers, Marian Heller, Benjamin Baudrit, Eduard Kraus, Thomas Hochrein, Martin Bastian

Bildung & Forschung

www.skz.de

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Herausgeber)

Wärmeströme beim Heizelement-schweißen von Kunststoffen

Messung, Modellierung und Qualitätssicherung

1. Auflage

SKZ – Forschung und Entwicklung

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Hrsg.)

Wärmeströme beim Heizelementschweißen von Kunststoffen

Messung, Modellierung und Qualitätssicherung

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:

Dr. Christian Balzer
Jonathan Lambers, M. Sc.
Marian Heller, B. Eng.
Dr. Benjamin Baudrit
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 978-3-8440-8705-5
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 • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Das Vorhaben 20463 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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ-KFE gGmbH dankt dem BMWK und der AiF für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung für die Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens.

Darüber hinaus dankt die Forschungseinrichtung auch den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für ihre Unterstützung bei der Bearbeitung des Projektes und für konstruktive Diskussionen zu diversen Fragestellungen.

Kurzfassung

Im Rahmen des FloWeld-Projekts wurden Wärmestromsensoren in eine Heizelementstumpfschweißanlage für Kunststoffe integriert und für umfassende Versuchsreihen genutzt. Dabei wurden Korrelationen von gemessenen Wärmeströmen, Prozessparametern und den resultierenden Schweißnahtqualitäten untersucht. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Wärmestrommesstechnik komplementär zu bereits genutzter Prozessüberwachung, wie z. B. Druck- und Wegsensoren, in den Heizelementschweißprozess integriert werden kann. In vielen der betrachteten Fälle stimmte der gemessene Wärmeübertrag gut mit theoretischen Modellen aus der Literatur überein. Besonders sensibel reagierte der gemessene Wärmestrom auf Veränderungen der Heizelementtemperatur, der Kontaktzeit von Heizelement und Kunststoff sowie der Beschaffenheit der Kunststoffoberfläche. Der Druck, mit dem der Kunststoff auf das Heizelement gepresst wird, ist im Wärmestromsignal meist nur indirekt zu erkennen. Detektierbare, mit dem Anpressdruck assoziierte Prozessfehler waren ein unvollständiger Kontakt von Heizelement und Kunststoff oder übermäßiger Quetschfluss bzw. Wulstbildung während der Angleichphase. Korrelationen des Wärmestromsignals waren im Falle des teilkristallinen Werkstoffs PP-H auch mit Hinblick auf die Schmelzeschichtdicke am Ende der Anwärmphase feststellbar. Hierbei konnte gezeigt werden, dass theoretische Modellierung, mikroskopische Vermessungen und gemessene Wärmeströme ein insgesamt stimmiges Bild ergeben, das dem bestehenden Prozessverständnis entspricht. Die im Projekt erhobenen Daten wurden außerdem für das Trainieren verschiedener maschineller Lernverfahren genutzt, die anhand automatisch extrahierter Merkmale den Schweißfaktor vorhersagen. Als das Modell mit der höchsten Genauigkeit bzw. dem geringsten Fehler bei der Vorhersage stellte sich dabei der Random Forest heraus, der somit für den Einsatz als Inline-Qualitätsüberwachung geeignet erscheint.

Abstract

Within the FloWeld-project, heat flux sensors were integrated into a hot plate welding system for plastics. In order to investigate correlations between the heat flow from hot plate to plastic, the welding parameters and the resulting weld seam quality comprehensive experiments were performed. The results obtained show that heat flux sensors represent a feasible approach to process monitoring providing complementary information to often used pressure and displacement sensors. In most cases considered, good agreement was found between the measured heat flux und theoretical models from literature. The measured heat flux exhibited high sensitivity to changes of the hot plate temperature, the contact time between hot plate and plastic, and the quality of the respective interface. The welding pressure affected the heat flux signal only in cases of insufficient contact between hot plate and plastic or excessive flash during the matching phase. In the case of the semi-crystalline plastic PP-H, correlations of the measured heat flux were also found with respect to the melt layer thickness at the end of the heating phase. Theoretical modeling, microscopic measurements and measured heat flux provide a consistent understanding of the hot plate welding process that corresponds well to process models found in literature. The data collected during the welding experiments was also used to train various machine learning algorithms that were designed to predict the weld factor based on automatically extracted features. In this regard the random forest model exhibited the highest accuracy and the lowest prediction error, which thus appears to be suitable for use as inline quality monitoring.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungsverzeichnis III

Formelzeichen IV

Projektsteckbrief VIII

1 Einleitung 1

1.1 Anlass für Forschungsvorhaben 1

1.2 Problemstellung 2

1.3 Zielsetzung 4

2 Stand der Technik 5

2.1 Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen 5

2.1.1 Verfahrensvarianten 5

2.1.2 Theoretische Modellierung 11

2.2 Prüfen von Kunststoffschweißnähten 15

2.3 Wärmestromsensoren 16

2.4 Maschinelles Lernen 18

2.4.1 Verfahren 19

2.4.2 Feature Selection 22

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels 23

4 Durchgeführte Arbeiten 25

4.1 Integration der Wärmestromsensorik in den Schweißprozess 25

4.2 Definition von Grundmaterialien und Probekörpern 29

4.3 Heizelementstumpfschweißen 32

4.4 Prüfungen der Schweißverbindungen 39

4.4.1 3-Punkt-Biegeprüfungen 39

4.4.2 Mikroskopie 41

4.5 Theoretische Modellierung des Wärmestromsignals 42

4.5.1 Analytische Betrachtung 42

4.5.2 Numerische Betrachtung 45

4.6 Anwendung von maschinellem Lernen auf die Projektdaten 49
4.6.1 Datenvorverarbeitung 49
4.6.2 Bewertung der Features 52
4.6.3 Modellierung 53
4.7 Anwendung des Projektansatzes auf industrielle Bauteile 54
5 Diskussion der Ergebnisse 55
5.1 Charakterisierung der Grundmaterialien 55
5.1.1 Thermische Eigenschaften 55
5.1.2 Mechanische Eigenschaften 59
5.2 Schweißversuche mit Wärmestrommessung 60
5.2.1 Auswertung des Wärmestrommesssignals 61
5.2.2 Vergleich von Messdaten und Modellen 65
5.3 Korrelationsanalysen 75
5.3.1 Einfluss der Prozessparameter auf den Wärmestrom 75
5.3.2 Einfluss der Prozessparameter auf die Nahtqualität 81
5.3.3 Einfluss des Wärmestroms auf die Nahtqualität 86
5.3.4 Korrelationen der aus Zeitreihen extrahierten Features 89
5.4 Prognosen der Nahtqualität durch Machine-Learning-Algorithmen 91
5.4.1 Auswahl des ML-Verfahrens 91
5.4.2 Feature Variationen 93
6 Zusammenfassung 99
Anhang 101
A.1 Herleitung Wärmestromdichte 101
A.2 Abhängigkeit des Fitparameters γ von der Anwärmzeit 106
A.3 Korrelationsmatrizen 107
Literaturverzeichnis 111