

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Jan Niclas Eschner

**Entwicklung einer akustischen
Prozessüberwachung zur Porenbestimmung
im Laserstrahlschmelzen**

Band 243

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Jan Niclas Eschner

**Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung
zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen**

Band 243

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Jan Niclas Eschner

aus Aschaffenburg

Tag der mündlichen Prüfung: 15.01.2021

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer

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.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7966-1
ISSN 0724-4967

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

Vorwort der Herausgeber

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und das mir entgegengebrachte Vertrauen in den vergangenen Jahren sowie die Gelegenheit zur persönlichen, sowie fachlichen Weiterentwicklung. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr. Detmar Zimmer für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr. Kai Furmans für den Prüfungsvorsitz.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk in Karlsruhe, insbesondere im Bereich PRO, danke ich für die Zusammenarbeit und die spannenden fachlichen sowie persönlichen Diskussionen in den vergangenen Jahren. Daneben danke ich auch allen unseren Service-Centern und Sekretariaten für die fortwährende Unterstützung ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Die gemeinsame Zeit und unsere gemeinsamen Projekte bleiben mir lange in Erinnerung. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich Lukas Weiser und Leonard Schild. Mein Dank gilt auch den vielen Studierenden die ich für das Thema begeistern konnte, ihr habt sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Namentlich seien hier Lukas Weiser, Daniel Gauder, Johanna Steiner-Stark und Katja Höger erwähnt, die sich selbst auch für das Arbeiten im akademischen Umfeld entschieden haben.

Auch meinen Eltern und Geschwistern danke ich von ganzem Herzen für die bedingungslose Unterstützung und Vorbereitung auf diese Aufgabe. Meinen Freunden danke ich für die gemeinsame Zeit bei unseren Ausflügen in den letzten Jahren, die eine wertvolle Abwechslung darstellen. Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Sophia, die mich auch bei diesem Vorhaben begleitete und wertvolle Hilfestellungen gegeben hat.

Karlsruhe, im Januar 2021

Jan Niclas Eschner

Abstract

Subject of this thesis is the development of a process-integrated measurement technique for the L-PBF. Process-integrated measurement techniques can make a significant contribution to increase the cost-effectiveness and thus the spread of the L-PBF. However, previous approaches fail to identify pores, a typical process irregularity. The known approaches concentrate on the use of optical sensor principles and overlook other sensor principles like acoustic sensor. Preliminary work from similar processes, such as laser welding, shows promising results for acoustic sensor principles. First few approaches for the implementation of acoustic sensor principles in L-PBF exist, but are limited to airborne acoustic emissions. Structureborne sensor principles promise, in comparison, principle-related advantages in the detection of internal defects. An approach how structureborn acoustic emissions can be recorded and evaluated in the L-PBF process does not exist so far and is the content of this work. For this purpose, a data-driven modelling with methods of machine learning is followed. The aim of the approach is to predict the expected porosity of the component based on the acoustic signal. To train the corresponding models for this prediction, a data set is generated, suitable feature extractions for the processing of the acoustic data are defined and machine learning methods are selected.

With the models found and trained, it is possible to predict the porosity based on the acoustic pattern. It remains to be seen whether the approach of data-driven modelling allows the detection of new unknown mechanisms of porosity formation.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Laserstrahlschmelzen (L-PBF)	4
2.1.1 Allgemeiner Prozessablauf	5
2.1.2 Defekte im L-PBF	7
2.1.3 Priorisierung der Detektion von Poren	9
2.2 Produktionsintegrierte Messtechnik für Poren im L-PBF	11
2.2.1 Off-Shopfloor	13
2.2.2 Pre- und Post-Scan	14
2.2.3 In-Scan	16
2.2.4 Priorisierung der akustischen Sensorprinzipien	19
2.3 Datenanalyse als Teil der Messtechnik	21
2.3.1 Datensammlung	23
2.3.2 Merkmalsextraktion	23
2.3.3 Modellauswahl	24
2.3.4 Anlernen und Bewerten	27
2.4 Grundbegriffe der Messtechnik und Messunsicherheit	30
3 Stand der Technik	34
3.1 Porenentstehung und Prozessverständnis in Laserprozessen	34
3.1.1 Prozessmodi in Laserschweißprozessen	35
3.1.2 Prozessfenster im L-PBF	36
3.1.3 Entstehungsmechanismen für <i>Gas- und Fusionsporen</i>	38

3.2	Akustische Prozessüberwachungen in Laserprozessen	40
3.2.1	Arbeiten aus dem Laserstrahlschweißen	40
3.2.2	Arbeiten aus dem L-PBF	48
3.2.3	Zusammenfassung der Arbeiten	54
4	Forschungsfrage und Lösungsansatz	58
4.1	Defizit und Forschungsfrage	58
4.2	Lösungsansatz	60
5	Versuchsumgebung für Datensammlung	62
5.1	Hardwaretechnischer Aufbau der Versuchsumgebung	62
5.1.1	Sensorsystem	63
5.1.2	Baukammer	66
5.1.3	Inertgassystem	70
5.1.4	Lasersystem	71
5.1.5	Gesamtaufbau	72
5.2	Informationstechnischer Aufbau der Versuchsumgebung	73
5.2.1	Steuerung der Versuchsumgebung	73
5.2.2	Implementierung der Datenanalyse	76
6	Vorgehen für die Modellbildung	78
6.1	Bestimmen der Messgröße	78
6.2	Datensammlung	80
6.2.1	Definition der Versuchskörper	81
6.2.2	Vorgehen zum Einbringen von Poren	84
6.2.3	Beschreibung der Datenbasis	88
6.3	Merkmalsextraktion	89
6.3.1	Merkmalsextraktion aus akustischem Rohsignal	89
6.3.2	Merkmalsextraktion aus Versuchskörpern	92
6.4	Modellauswahl	101
6.4.1	Modellauswahl	101
6.4.2	Modellparameter	102
6.5	Anlernen und Bewerten	106
6.5.1	Trainingsparameter	106
6.5.2	Theoretisch erreichbare Leistungskennwerte	109
6.6	Zusammenfassung Kapitel 6	113

7	Ergebnisse der Modellbildung	116
7.1	Versuch 1: Eignung und Einfluss der Merkmalsextraktion	117
7.1.1	Ergebnisse der Porositätsbestimmung für Experiment 1	118
7.1.2	Klassifikationsergebnisse für verschiedene Merkmalsextraktionen	122
7.1.3	Diskussion	123
7.2	Versuch 2: Einfluss der Teststrategie	123
7.2.1	Klassifikationsergebnisse für Teststrategie je Schicht	124
7.2.2	Klassifikationsergebnisse für Teststrategie je Versuchskörper	125
7.2.3	Diskussion	126
7.3	Versuch 3: Einfluss der Komplexität	127
7.3.1	Klassifikationsergebnisse für Übertragbarkeit	128
7.3.2	Zusatzuntersuchung: Klassifikation der Komplexität	130
7.3.3	Diskussion	130
7.4	Versuch 4: Validierung am zweiten Datensatz	131
7.4.1	Ergebnisse der Porositätsbestimmung für Experiment 2	132
7.4.2	Klassifikationsergebnisse	134
7.4.3	Zusatzuntersuchung: Klassifikation ausgewählter Testdaten	135
7.4.4	Diskussion	136
7.5	Versuch 5: Regression Experiment 1	137
7.5.1	Regressionsergebnisse	138
7.5.2	Diskussion	139
7.6	Versuch 6: Regression Experiment 2	142
7.6.1	Regressionsergebnisse	143
7.6.2	Diskussion	145
8	Fazit und Ausblick	147
8.1	Erkenntnisse	147
8.2	Kritisches Fazit	149
8.3	Ausblick	151
9	Zusammenfassung	155
	Literaturverzeichnis	157
	Abbildungsverzeichnis	172
	Tabellenverzeichnis	175
	Anhang	VI