

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des  IFSW

Claus-Dieter Reiniger

**Fluiddynamische Effekte beim
Remote-Laserstrahlschweißen
von Blechen mit Fügespalt**

Herbert Utz Verlag 

Claus-Dieter Reiniger

**Fluiddynamische Effekte beim Remote-
Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt**

Herbert Utz Verlag · München 2015

Laser in der Materialbearbeitung
Band 79

EBook-Ausgabe:

ISBN 978-3-8316-7182-3 Version: 1 vom 03.12.2015

Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover

ISBN 978-3-8316-4528-2

Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten

Florian Geiger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner

Die Dissertation wurde am 24.02.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.10.2015 angenommen.

Florian Geiger

**System zur wissensbasierten
Maschinenbelegungsplanung auf Basis
produktspezifischer Auftragsdaten**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 311

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4537-4

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Mitglied der Institutsleitung am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) sowie als Abteilungsleiter an der Projektgruppe für Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Augsburg.

Mein besonderer Dank gilt hierbei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern des *iwb*, für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald Günthner, dem Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München (TUM), möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Ein besonderer Dank gilt hier Philipp Engelhardt, Andreas Hees und Tobias Philipp für die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Diskussionen dieses Themenkomplexes.

An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei meiner Familie bedanken. Ohne das entgegengebrachte Verständnis und die Geduld meiner Frau Kerstin, die mir über die gesamte Zeit den Rücken freigehalten und mir somit den notwendigen Freiraum für die Erstellung meiner Doktorarbeit geschaffen hat, hätte ich dieses Ziel nicht erreichen können. Zu guter Letzt danke ich auch meinen Kindern Helena und Karl, die in dieser Zeit häufig auf ihren Papa verzichten mussten, jedoch mir immer gezeigt haben, was das Wichtigste im Leben ist.

München, im November 2015

Florian Geiger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abkürzungen.....	V
Verzeichnis der Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problembeschreibung	2
1.3 Zielstellung der Arbeit.....	5
1.4 Aufbau der Arbeit.....	7
2 Grundlagen	11
2.1 Übersicht.....	11
2.2 Flexibilität in der Produktion.....	11
2.2.1 Allgemeines.....	11
2.2.2 Definition Flexibilität.....	11
2.2.3 Arten der Flexibilität.....	12
2.3 Produktionsplanung und -steuerung.....	13
2.3.1 Allgemeines.....	13
2.3.2 Produktionsplanung.....	15
2.3.3 Produktionssteuerung.....	17
2.3.4 Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung.....	17
2.3.5 Datenverwaltung in der Produktionsplanung und -steuerung.....	21
2.3.6 Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung.....	23
2.4 Daten- und Informationsmanagement in der auftragsbezogenen Produktion.	24
2.4.1 Allgemeines.....	24
2.4.2 Betriebsdatenerfassung	25
2.4.3 Informations- und Kommunikationstechnik	26
2.5 Kennzahlen und Kennzahlensysteme	28

2.6	Technische Wissensverarbeitung.....	29
2.6.1	Allgemeines.....	29
2.6.2	Wissensbasierte Systeme.....	33
2.6.2.1	Allgemeines.....	33
2.6.2.2	Architektur eines wissensbasierten Systems.....	34
2.6.2.3	Wissensrepräsentation.....	36
2.6.3	Knowledge Discovery in Databases.....	39
2.7	Zusammenfassung und Fazit.....	42
3	Stand der Forschung und Technik.....	43
3.1	Übersicht.....	43
3.2	Ansätze zur Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten.....	43
3.3	Ansätze zur Steigerung der Stammdatenqualität.....	47
3.4	Ansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung.....	50
3.5	Fazit und resultierender Handlungsbedarf.....	53
4	Übersicht über das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung.....	57
5	Aufnahme und Verarbeitung produktspezifischer Auftragsdaten.....	61
5.1	Übersicht.....	61
5.2	Datenmodell für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung.....	62
5.2.1	Allgemeines.....	62
5.2.2	Graphenbasierte Modellierung von Arbeitsvorgangsfolgen.....	63
5.2.3	Auftragsmodell.....	66
5.2.4	Ressourcenmodell.....	69
5.2.5	Produktionsmodell.....	71
5.3	Aufnahme produktspezifischer Auftragsdaten.....	73
5.3.1	Allgemeines.....	73
5.3.2	Systemelemente des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems.....	73
5.3.3	Funktionen des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems.....	75
5.3.3.1	Übersicht.....	75
5.3.3.2	Funktion Erfassung Auftragsdaten.....	75

5.3.3.3	Funktion Bewertung Produktionszustand.....	80
5.4	Analyse produktspezifischer Auftragsdaten.....	85
5.4.1	Allgemeines.....	85
5.4.2	Funktionen des Auftragsdaten-Analysesystems	86
5.4.2.1	Übersicht.....	86
5.4.2.2	Funktion Bereitstellung Stammdaten	87
5.4.2.3	Funktion Ableitung Produktionswissen.....	93
5.5	Zusammenfassung und Fazit	106
6	Wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung	109
6.1	Übersicht.....	109
6.2	Systemelemente der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	109
6.3	Ablauf der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	112
6.4	Funktionen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	114
6.4.1	Übersicht	114
6.4.2	Funktion Planung Maschinenbelegung.....	114
6.4.3	Funktion Prädiktion Produktionszustand	118
6.4.4	Funktion Adaption Durchlaufzeit-Anteil	119
6.5	Zusammenfassung und Fazit	126
7	Umsetzung und Bewertung.....	127
7.1	Übersicht.....	127
7.2	Prototypische Umsetzung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	127
7.2.1	Systemübersicht des Hard- und Software-Demonstrators	127
7.2.2	Produktionstechnische Versuchsanlage	129
7.2.3	Simulationsmodell der produktionstechnischen Versuchsanlage	130
7.3	Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	132
7.3.1	Allgemeines.....	132
7.3.2	Modellierungsphase	132
7.3.3	Anwendungsphase.....	136
7.3.3.1	Allgemeines	136

7.3.3.2	Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten	136
7.3.3.3	Generierung der dynamischen Stammdaten	138
7.3.3.4	Generierung des Produktionswissens.....	140
7.3.3.5	Wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung	143
7.4	Simulationstechnische Validierung	151
7.5	Bewertung	153
7.5.1	Allgemeine Bewertung	153
7.5.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	155
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	157
9	Literatur	161
10	Anhang	189
10.1	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	189
10.2	Verwendete Softwareprodukte.....	190

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Auto-ID	Automatische Identifikation
AVO	Arbeitsvorgang
B	Bearbeitungsvorgang
BAZ	Bearbeitungszeit
BDE	Betriebsdatenerfassung
BLZ	Belegungszeit
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CPPS	Cyber-Physische Produktionssysteme
DGIQ	Deutsche Gesellschaft für Informations- und Datenqualität e. V.
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLZ	Durchlaufzeit
EN	Europäische Norm
EPC	Electronic Product Code
EPCIS	Electronic Product Code Information Service
ERP	Enterprise Resource Planning
FLT	Frühester Liefertermin
ggf.	gegebenenfalls
GS1	Global Standard One

GUI	Graphical User Interface
H	Hauptbearbeitungszeit
HNZ	Hauptnutzungszeit
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IQ	Informationsqualität
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Just-in-Sequence
JIT	Just-in-Time
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KI	Künstliche Intelligenz
KNN	k-nächste Nachbarn
KPI	Key Performance Indicators (dt. Kennzahlen)
L	Liegevorgang
LZ	Liegezeit
MES	Manufacturing Execution System
N	Nebenbearbeitungszeit
OCR	Optical Character Recognition
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PBZ	Planbelegungszeit
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
R	Rüstvorgang
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung

RFID	Radio-Frequency Identification
RuleML	Rule Markup Language
SAHN	Sequentielle agglomerative hierarchische nichtüberlappende Clusteranalyse
SFB	Sonderforschungsbereich
sog.	sogenannte
SU	störungsbedingte Unterbrechungen
SZ	Stillstandszeit
T	Transportvorgang
TBE	Bearbeitungsende
TBEV	Bearbeitungsende Vorgänger
TRA	Rüstanfang
TRZ	tatsächliche Rüstzeit
TZ	Transportzeit
u. a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
usw.	und so weiter
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
WB	Komponente der Wissensbasis
WBS	Wissensbasiertes System

WBS-DLZ	Wissensbasiertes System zur Adaption von Durchlaufzeit-Anteilen
WV	Komponente der Wissensverarbeitung
XML	eXtensible Markup Language
z. B.	zum Beispiel
ZDF	Durchführungszeit
ZUE	Übergangszeit

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	Stk./h	Ausbringung
a_i	-	i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut
$a_{P,i}$	-	i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des Planungsfalls f_P
$a_{F_j,i}$	-	i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des j -ten DLZ-Anteil-Falls f_{F_j}
$a_{P,N,i}$	-	normiertes i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des Planungsfalls f_P
$a_{F_j,N,i}$	-	normiertes i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des j -ten DLZ-Anteil-Falls f_{F_j}
$a_{max,i}$	-	Maximalwert aller DLZ-Anteil-Fälle für das i -te produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibende Attribut
$AVO_{eingeplant}$	-	Menge eingeplanter AVOs
$AVO_{einplanbar}$	-	Menge einplanbarer AVOs
$AVO_{einzuplanen}$	-	Menge einzuplanender AVOs
$AVO_{nicht_einplanbar}$	-	Menge nicht einplanbarer AVOs
BG	%	Beleggrad
BNG	%	Belegnutzgrad
BZ	h	Belegungszeit

Verzeichnis der Formelzeichen

C_i	-	i -tes Abweichungscluster
D	Stk./h	Durchsatz
DLZ	h	Durchlaufzeit
e	-	Fehlertoleranz
E	%	Effektivität
f_P	-	Planungsfall
f_F	-	DLZ-Anteil-Fall
$f_{F_adaptiert}$	-	adaptierter ähnlichster DLZ-Anteil-Fall
$G_j(Z)$	-	Informationsgewinn durch das j -te Attribut aus der Menge Z an betrachtetem Knoten
GLZ	h	Gesamtliegezeit
GRZ	h	Gesamtrüstzeit
GSZ	h	Gesamtstillstandszeit
GTZ	h	Gesamttransportzeit
$H(Z)$	-	Information in Menge Z
HNZ	h	Hauptnutzungszeit
k	-	Abweichungsclusterbreite
$k_{\text{Ähnlichkeit}}$	%	ausreichender Übereinstimmungsgrad zwischen Planungs- und Fallbasisfall
k_{max}	-	maximale Abweichungsclusterbreite
$k_{min_Ähnlichkeit}$	%	minimal erforderlicher Übereinstimmungsgrad zwischen Planungs- und Fallbasisfall
LG	%	Liegegrad
μ	-	Erwartungswert

$\mu_{DLZ\text{-Anteil}}$		Erwartungswert des spezifischen DLZ-Anteils
NG	%	Nutzgrad
$n_{min_erforderlich}$	Stk.	Anzahl erforderlicher DLZ-Anteile
$n_{vorhanden}$	Stk.	Anzahl vorhandener DLZ-Anteile in Bewertungsintervall
p	-	Wahrscheinlichkeitswert
$P(t)$	-	Dichtefunktion der Wahrscheinlichkeitsverteilung der DLZ-Anteil Durchführungsdauer
PBZ	h	Planbelegungszeit
PG	%	Prozessgrad
φ	h	Bewertungsintervall
RG	%	Rüstgrad
$sim_{DLZ\text{-Anteil}}$	-	DLZ-Anteil-Ähnlichkeit
SG	%	Stillstandsgrad
SGA	%	Sicherheitsgrad des Auftrags
SGM	%	Sicherheitsgrad der Maschine
σ	-	Standardabweichung
σ_{max}	-	maximal akzeptable Streuung des DLZ-Anteils
T	-	Zufallsvariable
$t_{DLZ\text{-Anteil}}$	min	Durchführungszeit des spezifischen DLZ-Anteils
t_G	min	Grundzeit des DLZ-Anteils
t_{min}	min	minimale Durchführungszeit des DLZ-Anteils

Verzeichnis der Formelzeichen

t_{max}	min	maximale Durchführungszeit des DLZ-Anteils
t_p	min	Planzeit des DLZ-Anteils bei Wahrscheinlichkeitswert p
Δt_S	min	Sicherheitszuschlag des DLZ-Anteils
$t_{signifikanz}$	-	Signifikanzniveau
τ	-	Abweichungsverhältnis der Dauer des spezifischen DLZ-Anteils
V	%	Verfügbarkeit
$V(T)$	-	Varianz
w_i	-	spezifischer Gewichtungsfaktor des i -ten Attributes
WS	Stk.	Warteschlange

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Das produzierende und im Speziellen das verarbeitende Gewerbe sind die wichtigsten Wirtschaftsbereiche in Deutschland und bilden somit den Kern der volkswirtschaftlichen Leistungsfähigkeit (THE BOSTON CONSULTING GROUP 2006, ZÄH ET AL. 2006). So erwirtschaftete das produzierende Gewerbe im Jahr 2013 25,5 % des Bruttoinlandsproduktes der Bundesrepublik (STATISTISCHES BUNDESAMT 2014). Zu den ca. 7,7 Millionen direkt Beschäftigten in diesem Bereich kommen noch ca. 7 Millionen im angrenzenden Dienstleistungssektor sowie etwa in gleicher Anzahl induzierte Beschäftigte hinzu (MCKINSEY & COMPANY 2009). Somit sind über die Hälfte der Arbeitsplätze in Deutschland direkt oder indirekt von der Produktion abhängig. Mit einer Exportquote von ca. 76,7 % im Jahr 2013 der Waren im Bereich des Maschinenbaus unterstreicht Deutschland zudem seine Stärke auf dem Weltmarkt in der Produktionstechnik (STATISTA 2014). Auch im internationalen Vergleich wird deutlich, dass keine andere westliche Industrienation so stark auf die Produktion ausgerichtet ist wie Deutschland (UN DATA 2012).

Mit dem Ziel, die skizzierte Stellung auch an einem Hochlohnstandort wie Deutschland in Zukunft innezuhaben, sind Unternehmen im produzierenden Gewerbe heutzutage mehr denn je besonderen Herausforderungen ausgesetzt. Diese sind u. a. Globalisierung, Dynamisierung der Produktlebenszyklen, Durchdringung mit neuen Technologien, Ressourcenverknappung, Risiko der Instabilität und demografischer Wandel (ABELE & REINHART 2011). Des Weiteren konnte ein kontinuierlicher Anstieg des Anspruchsniveaus der Kunden beobachtet werden (LINDEMANN ET AL. 2006). Dies hat u. a. zu einer deutlichen Steigerung der Variantenzahlen bei sinkendem Mengenvolumen, verkürzten Lieferzeiten, intransparenten Entwicklungs- und Herstellungskosten sowie einer höheren Anfälligkeit der Produkte und Produktionsprozesse gegenüber äußeren Einflüssen (z. B. Nachfrageschwankungen, technische Änderungen) geführt (WESTKÄMPER 2003, LINDEMANN ET AL. 2006, WILDEMANN 2012). Folglich ist das Unternehmensumfeld aufgrund seiner dynamischen Natur und der vielen Einflussgrößen hochkomplex und kann als turbulent bezeichnet werden (WARNECKE 1996, CALANTONE ET AL. 2003, WIENDAHL 2006) und erschwert zunehmend die Erstellung verlässlicher Produktionsprogramme (LÖDDING 2008).