





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
FAKULTÄT FÜR MASCHINENWESEN

Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Methode zur rechnergestützten  
Prozessgestaltung des Schleifhärtens**

**Tobias Föckerer**

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

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Heinzl,  
Universität Bremen

Die Dissertation wurde am 16.10.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.02.2014 angenommen.



Tobias Föckerer

**Methode zur rechnergestützten  
Prozessgestaltung des Schleifhärtens**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 295

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

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 978-3-8316-4448-3

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://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.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Heinzl, dem Leiter des Fachgebiets Werkstofforientierte Fertigung an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik der Universität Bremen, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts bedanken, die mich während meiner Zeit am Institut begleitet und bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Besonders danke ich Saskia Reinhardt, Matthias Baur sowie Fabian Distel für die vielen fachlichen Anregungen und die spannenden Diskussionen. Ihnen, Heidrun Bock und meiner Mutter Theresia Föckerer gilt mein Dank für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die vielen konstruktiven Ratschläge. Bei Jens-Walter Huntemann und Benjamin Kolkwitz, beide wissenschaftliche Mitarbeiter an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik der Universität Bremen, möchte ich mich herzlich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit im Rahmen des gemeinsamen DFG-Projekts zum Thema Schleifhärten bedanken. Außerdem danke ich allen Studierenden, insbesondere Fabian Distel und Oliver Bichi Zhang, die mich im Rahmen ihrer Studienarbeiten bei der Ausarbeitung und Umsetzung meiner Methode unterstützt haben.

Schließlich gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern und Saskia Reinhardt, die durch ihre Geduld und ihre liebevolle Unterstützung wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

München, im Januar 2015

*Tobias Föckerer*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Verzeichnis der Zeichen, Kennzahlen und Konstanten</b>	<b>vii</b>
Lateinische Formelzeichen .....	vii
Griechische Formelzeichen .....	viii
Dimensionslose Kennzahlen.....	ix
Mathematische Zeichen und Konstanten .....	ix
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung und methodisches Vorgehen .....	3
1.3 Aufbau der publikationsbasierten Arbeit .....	4
<b>2 Stand der Erkenntnisse</b>	<b>9</b>
2.1 Allgemeines .....	9
2.2 Grundlagen des Umfangsschleifens und des Schleifhärtens .....	9
2.2.1 Kinematik und Spanbildungsmechanismen beim Schleifen ...	9
2.2.2 Energieumsetzung bei Schleifprozessen .....	12
2.2.3 Randzonenbeeinflussung durch Schleifprozesse .....	13
2.3 Modelle zur Beschreibung von Schleifprozessen .....	18
2.3.1 Eingrenzung relevanter Modellansätze .....	18
2.3.2 Analytische Modelle .....	20
2.3.3 Finite-Elemente-Modelle .....	23
2.4 Fazit und Handlungsbedarf .....	25
<b>3 Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung</b>	<b>27</b>
3.1 Allgemeines .....	27
3.2 Bedeutung und Aufgaben der Prozessgestaltung.....	27
3.3 Anforderungen an das Konzept .....	30
3.4 Simulationskonzept zur Prozessgestaltung.....	32
3.5 Fazit .....	35
<b>4 Systemmodell des Schleifhärteprozesses</b>	<b>37</b>
4.1 Allgemeines .....	37
4.2 Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systemmodells.....	38
4.2.1 System- und Stellgrößen.....	38
4.2.2 Ziel- und Ergebnisgrößen.....	39

4.3 Formales Systemmodell .....	40
4.3.1 Systemelementbasierte Kopplung der Wirkmechanismen ....	40
4.3.2 Systemelementbasierte Beschreibung der Wirkmechanismen	43
4.4 Fazit .....	48
<b>5 Simulationsmodelle des Schleifhärteprozesses</b>	<b>49</b>
5.1 Allgemeines .....	49
5.2 Konzeptionelle Einordnung der Publikationen .....	49
5.3 Zusammenfassungen der Publikationen.....	51
5.3.1 Publikation (P1) – „Experimental and Numerical Identification of Process Parameters of Grind-Hardening and Resulting Part Distortions“ .....	51
5.3.2 Publikation (P2) – „Experimental and Numerical Analysis of Transient Behavior During Grind-Hardening of AISI 52100“ .....	52
5.3.3 Publikation (P3) – „A Three-Dimensional Analytical Model to Predict the Thermo-Metallurgical Effects within the Surface Layer During Grinding and Grind-Hardening“ ..	53
5.3.4 Publikation (P4) – „Experimental and Numerical Analysis of the Influences on Part Distortion as a Result of the Grind-Hardening Process“ .....	54
5.3.5 Publikation (P5) – „Identification and Analysis of Part Distortion Resulting from Grind-Hardening Process Using Computer-Based Methods“ .....	55
5.3.6 Publikation (P6) – „Experimental and Numerical Analysis of the Surface Integrity Resulting from Outer-Diameter Grind-Hardening“ .....	56
5.3.7 Publikation (P7) – „Complete Machining of Cylindrical Steel Parts on a Mill Turn Center Including Heat Treatment Using Grind-Hardening“ .....	57
5.4 Individuelle Leistungsbeiträge des Autors .....	58
5.5 Fazit .....	59
<b>6 Bewertung der rechnergestützten Prozessgestaltung</b>	<b>61</b>
6.1 Allgemeines .....	61
6.2 Bewertung des Erfüllungsgrads der Anforderungen.....	61
6.3 Wirtschaftlichkeitsbewertung .....	63
6.3.1 Szenarios der Prozessgestaltung und Fertigung .....	63
6.3.2 Stundensatzrechnung und Aufstellung der Zeitaufwände ....	65
6.3.3 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbewertung .....	69
6.4 Fazit .....	70

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>71</b>
7.1 Zusammenfassung .....	71
7.2 Ausblick .....	73
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>
<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>97</b>
<b>Verzeichnis eingesetzter Softwareprodukte</b>	<b>99</b>



## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
d. h.	das heißt
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
et al.	et alii (lateinisch für „und andere“)
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
i. d. R.	in der Regel
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München
IWT	Stiftung Institut für Werkstofftechnik
KSS	Kühlschmierstoff
o. Nr.	ohne Nummer
OTP	operative(r) Technologieplanung(sprozess)
PEP	Produktentstehungsprozess
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
S.	Seite
u. a.	unter anderem
v. a.	vor allem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
vgl.	vergleiche
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
ZTA-Schaubild	Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild
ZTU-Schaubild	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild



# Verzeichnis der Zeichen, Kennzahlen und Konstanten

## Lateinische Formelzeichen

Größe	Einheit	Bezeichnung
$a$	$\text{mm}^2/\text{s}$	Temperaturleitfähigkeit
$a_e$	mm	Zustellung
$a_p$	mm	Eingriffsbreite
$b_s$	mm	Schleifscheibenbreite
$c$	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmekapazität
$d_{eq}$	mm	äquivalenter Schleifscheibendurchmesser
$d_s$	mm	Schleifscheibendurchmesser
$d_w$	mm	Werkstückdurchmesser
$E$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Elastizitätsmodul
$F_n$	N	Schleifnormalkraft
$F'_n$	$\text{N}/\text{mm}$	bezogene Schleifnormalkraft
$F_t$	N	Schleiftangentialkraft
$h$	$\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
$h_{cu}$	mm	unverformte Spanungsdicke
$h_{cu,max}$	mm	maximale unverformte Spanungsdicke
$k$	$\text{W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
$l_g$	mm	geometrische Kontaktlänge
$P_c$	W	Schleifleistung
$P'_c$	$\text{W}/\text{mm}^2$	kontaktflächenbezogene Schleifleistung
$\dot{q}_0$	$\text{W}/\text{mm}^2$	gemittelte Wärmestromdichte
$Q_w$	$\text{mm}^3/\text{s}$	Zeitspanvolumen
$Q'_w$	$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$	kontaktbreitenbezogenes Zeitspanvolumen
$\dot{Q}_{ch}$	W	Wärmestrom in die Späne
$\dot{Q}_f$	W	Wärmestrom in den Kühlschmierstoff
$\dot{Q}_{total}$	W	Gesamtwärmestrom beim Schleifen
$\dot{Q}_s$	W	Wärmestrom in die Schleifscheibe
$\dot{Q}_w$	W	Wärmestrom in das Werkstück

Größe	Einheit	Bezeichnung
$\dot{Q}_\infty$	W	Wärmestrom über Strahlung an die Umgebung
$t$	s	Zeit
$T$	°C bzw. K	Temperatur
$T_\mu$	mm	Schnitteinsatztiefe
$T_\infty$	°C bzw. K	Umgebungstemperatur
$v_c$	m/s	Schnittgeschwindigkeit
$v_s$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe
$v_{ft}$	mm/s	Werkstück- bzw. tangentielle Vorschubgeschwindigkeit
$x$	mm	kartesische Koordinate
$x_0$	mm	Verschiebung in x-Richtung
$z$	mm	kartesische Koordinate

### Griechische Formelzeichen

Größe	Einheit	Bezeichnung
$\alpha$	1/K	thermischer Längenausdehnungskoeffizient
$\mu$	–	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)
$\nu$	mm <sup>3</sup> /kg	spezifisches Volumen
$\rho$	kg/mm <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Eigenspannung
$\sigma_{mech}$	N/mm <sup>2</sup>	mechanisch induzierte Eigenspannung
$\sigma_{res}$	N/mm <sup>2</sup>	resultierende Eigenspannung
$\sigma_{therm}$	N/mm <sup>2</sup>	thermisch induzierte Eigenspannung
$\sigma_{\parallel}$	N/mm <sup>2</sup>	Eigenspannung parallel zur Schleifrichtung
$\sigma_{\perp}$	N/mm <sup>2</sup>	Eigenspannung senkrecht zur Schleifrichtung

## Dimensionslose Kennzahlen

Größe	Definition	Bezeichnung
$H$	$\frac{2ah}{kv_{ft}}$	dimensionslose Wärmeübergangskennzahl
$L$	$\frac{v_{ft}l_g}{4a}$	dimensionslose halbe Länge der Wärmequelle
$m$	$\frac{v_{ft}(x - x_0)}{2a}$	dimensionslose Integrationsvariable für den Ort
$q$	$\frac{v_s}{v_{ft}}$	Geschwindigkeitsverhältnis
$X$	$\frac{v_{ft}x}{2a}$	dimensionsloser Abstand zur Mitte der Wärmequelle
$Z$	$\frac{v_{ft}z}{2a}$	dimensionslose Tiefe unter der Werkstückoberfläche
$\tau$	$\frac{v_{ft}\sqrt{at}}{2a}$	dimensionslose Integrationsvariable für die Zeit

## Mathematische Zeichen und Konstanten

Zeichen	Bezeichnung
$e$	Euler'sche Zahl
$\operatorname{erf}$	Fehlerfunktion
$\operatorname{erfc}$	komplementäre Fehlerfunktion
$K_0$	modifizierte Besselfunktion zweiter Art und nullter Ordnung
$\pi$	Kreiszahl
$\downarrow$	fallend
$\infty$	Unendlichkeit



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Standort Deutschland nimmt auf dem Gebiet der Güterproduktion seit jeher eine weltweit führende Rolle ein. Knapp ein Viertel der gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung und jeder dritte Arbeitsplatz in Deutschland lässt sich auf das verarbeitende Gewerbe zurückführen. Zum langfristigen Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit müssen produzierende Unternehmen nationale wie internationale Entwicklungstrends antizipieren (ABELE & REINHART 2011). Getrieben durch eine zunehmende Ressourcenverknappung sowie den Klima- und den gesellschaftlichen Wertewandel, bestimmt in zunehmendem Maß das Thema Nachhaltigkeit das Denken und Handeln deutscher Unternehmen (REITHOFER 2010). Ansatzpunkte zur ökonomischen und ökologischen Produkt- und Produktionsoptimierung finden sich entlang des gesamten Produktlebenszyklus (WEGNER ET AL. 2010). Neben der Entwicklung von umweltfreundlichen Produkten bieten vor allem innovative Ansätze und Technologien in der Produktionstechnik die Möglichkeit, bei deren Herstellung Zeit, Kosten und Ressourcen zu sparen. Besondere Potentiale besitzen dabei die Verkürzung von Prozessketten durch Substitution und Elimination (NEUGEBAUER ET AL. 2008) sowie der Einsatz von hybriden Fertigungsverfahren (ABELE & REINHART 2011).

Einen vielversprechenden, nachhaltigen Ansatz stellt der hybride Prozess Schleifhärten dar (ECKEBRECHT 2000, BRINKSMEIER ET AL. 2005, VELDE 2006, SALONITIS ET AL. 2006, REINHART ET AL. 2011). Der Schleifhärteprozess ist ein Verfahren zur Nutzung der beim Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide entstehenden Prozesswärme zur fertigungsintegrierten martensitischen Randschichthärtung von Stahlbauteilen. Die in der Trenn- sowie in den Reibzonen auftretenden Wärmemengen bewirken dabei eine gezielte Kurzzeitaustenitisierung der Werkstückrandschicht (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1994, 1996b). Anschließend führen Selbstabschreckeffekte, bedingt durch den kalten Werkstückkern (BROCKHOFF 1999b), und der Einsatz von Kühlschmierstoffen (KSS) zu einer martensitischen Randschichthärtung (BRINKSMEIER ET AL. 2005, SALONITIS & CHRYSOLOURIS 2007).

Zur Verdeutlichung der Nachhaltigkeitspotentiale stellt Abbildung 1 eine konventionelle Fertigungsprozesskette zur Herstellung einer randschichtgehärteten Welle einer integrierten Fertigungsprozesskette unter Verwendung des Schleifhärteprozesses gegenüber (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1996a, BROCKHOFF 1999a). Beim konventionellen Vorgehen wird die Bauteilgeometrie mittels Weichbearbeitung (Drehen) aus einem Halbzeug hergestellt. Die geforderten Eigen-

schaften der Funktionsflächen werden durch eine martensitische Randschichthärtung durch Induktion und die abschließende Hartbearbeitung (Schlichtschleifen) eingestellt. Dabei wirkt die Wärmebehandlung als eine Störung des Materialflusses innerhalb der Prozesskette (WILKE 2008). Dies äußert sich, bedingt durch den Wechsel der Betriebsmittel, durch einen hohen Aufwand bei Transport und Zwischenlagerung.

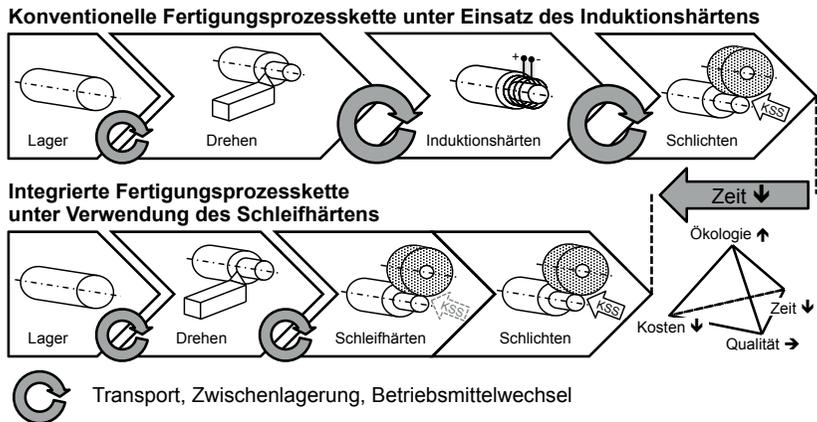


Abbildung 1: Vergleich von zwei Prozessketten zur Fertigung einer randschichtgehärteten Welle unter Einsatz des konventionellen Induktionshärtens sowie des hybriden Schleifhärteprozesses (in Anlehnung an BRINKSMEIER & BROCKHOFF (1996a), BROCKHOFF (1999a) und ZÄH ET AL. (2007))

Der Schleifhärteprozess ermöglicht die Integration der Randschichthärtung in die spanende Fertigung und damit die Substitution des der Schlichtbearbeitung vorangestellten Härteverfahrens bei gleichbleibender Bauteilqualität. Durch die Verkürzung und die Elimination von Betriebsmittelwechslern sowie durch die gezielte Verwendung der beim Schleifen entstehenden Prozesswärme lassen sich die Fertigungszeit, die entstehenden Kosten sowie der Ressourceneinsatz reduzieren (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1996a, REINHART ET AL. 2011). Diese Potentiale bleiben aktuell allerdings ungenutzt, da der flächendeckende industrielle Einsatz des Schleifhärteprozesses durch das fehlende Prozessverständnis und den hohen experimentellen Aufwand zur Prozessfensteridentifikation und zur Parameterauslegung behindert wird. Insbesondere bei komplexen Bauteilstrukturen führen die prozessinduzierten thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte in der Bauteilrandzone zu nicht prognostizierbaren Bauteilverzügen (KESSLER ET AL. 1998). Eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Erweiterung des Prozess-Know-hows, zur effizienten Prozessgestaltung und damit zur Erschließung der Nachhaltigkeitspotentiale bietet der Einsatz von Simulationsmethoden.

## 1.2 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung, Umsetzung und Bewertung einer Methode zur effizienten rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärstens. Der vorrangige Betrachtungsrahmen ist die Analyse und die Beschreibung der komplexen physikalischen Effekte des Schleifhärteprozesses auf dreidimensionale Werkstückstrukturen sowie deren Vorhersage mittels rechnergestützter Verfahren. Diesbezüglich lassen sich als resultierende werkstückspezifische Eigenschaften insbesondere die Einhärtetiefe in der Randschicht sowie die entstehenden Werkstückverzüge nennen, welche sich in Abhängigkeit der prozessspezifischen Einflussgrößen einstellen.

Das zur Zielerreichung verfolgte methodische Vorgehen ist in Abbildung 2 dargestellt. Basierend auf der Analyse des realen Systemverhaltens lässt sich mithilfe der Modellbildung ein formales Systemmodell entwickeln, welches, bezogen auf eine konkrete Aufgabenstellung, das reale System hinreichend genau beschreibt. Dabei sind insbesondere die Grenzen und Bestandteile des realen Systems sowie die Wirkzusammenhänge innerhalb des Systems und gegenüber der Umwelt zu analysieren und abzubilden. Die Qualität des umgesetzten Systemmodells wird durch eine Eignungsprüfung abgesichert. Anschließend wird das Systemmodell im Rahmen der Modellimplementierung in ein am Rechner ausführbares Simulationsmodell überführt. Dabei stellt die Modellverifikation sicher, dass alle Systemeigenschaften korrekt umgesetzt werden. Bevor das Simulationsmodell zur Prognose der Realität herangezogen werden kann, muss dessen Tauglichkeit validiert werden (SCHMIDT 1980, SAUERBIER 1999).

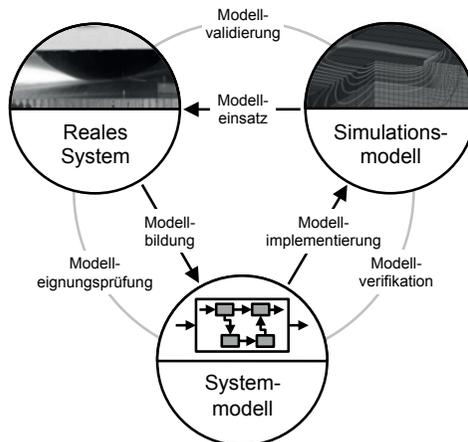


Abbildung 2: Allgemeines Vorgehen zur Durchführung einer Simulationsstudie (in Anlehnung an SCHMIDT (1980) und SAUERBIER (1999))

Bezüglich der hier gestellten Zielsetzung lassen sich die folgenden drei Hauptschritte ableiten:

- Im Rahmen einer systematischen, durchgängigen Modellbildung sind die grundlegenden physikalischen Phänomene des realen Systems *Schleifhärten* über allgemeingültige, werkstückbezogene Modelle zu beschreiben und unter Berücksichtigung der Kopplungen in einem formalen Systemmodell zusammenzufassen, wobei dieses die prozessspezifischen System- und Stellgrößen<sup>1</sup> mit den Ziel- und Ergebnisgrößen<sup>2</sup> verknüpfen soll.
- Basierend auf dem allgemeinen Systemmodell sind praxisgerechte, anforderungsspezifische Simulationsmodelle zu implementieren, welche die effiziente rechnergestützte Prozessgestaltung entlang des operativen Technologieplanungsprozesses<sup>3 4</sup> ermöglichen.
- Der industrielle Nutzen des Modelleinsatzes ist durch eine funktionale Erprobung und eine wirtschaftliche Bewertung zu bestätigen.

Die umgesetzte Methode zur effizienten rechnergestützten Prozessgestaltung soll die Basis für die breite wirtschaftliche Anwendung des Schleifhärteprozesses im industriellen Umfeld und für die Nutzung der damit verbundenen Nachhaltigkeitspotentiale bilden.

### 1.3 Aufbau der publikationsbasierten Arbeit

Die vorliegende Arbeit versteht sich als publikationsbasierte Dissertation und untergliedert sich in sieben Kapitel. Einen Überblick über die Struktur und die inhaltlichen Schwerpunkte der Arbeit gibt Abbildung 3. Dieses erste Kapitel umfasst eine kurze Einführung in die Thematik des Schleifhärtens und präsentiert die Zielsetzung der Arbeit. Darauf aufbauend wird im folgenden Kapitel 2 der Stand der Erkenntnisse erläutert, wobei die Prozessgrundlagen des Umfangsschleifens und des Schleifhärtens sowie die bestehenden Modellierungsansätze zu deren Beschreibung fokussiert werden. Mit diesen prozessspezifischen

---

<sup>1</sup> Die System- und Stellgrößen umfassen sämtliche betriebsmittel- und prozessspezifischen Eingangsgrößen des Schleifhärteprozesses. Eine detaillierte Beschreibung der System- und Stellgrößen erfolgt im Zuge der systematischen Modellbildung in Abschnitt 4.2.1.

<sup>2</sup> Die Ziel- und Ergebnisgrößen repräsentieren alle relevanten Ausgangsgrößen des Schleifhärteprozesses, wie z. B. die resultierende Einhärtetiefe. Eine ausführliche Spezifikation der Ziel- und Ergebnisgrößen findet in Abschnitt 4.2.2 statt.

<sup>3</sup> Nach EVERSHEIM (1996) wird unter einer Technologie bzw. einem Fertigungsverfahren ein generisches, vom Betriebsmittel unabhängiges Wirkprinzip verstanden.

<sup>4</sup> Der operative Technologieplanungsprozess beschäftigt sich im Rahmen des Produktentstehungsprozesses mit der Analyse von Technologiealternativen sowie mit der Planung und Optimierung von Technologieketten. Eine eingehende Erläuterung der phasenspezifischen Aufgaben des operativen Technologieplanungsprozesses kann Abschnitt 3.2 entnommen werden.

Grundlagen sowie dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf bildet Kapitel 2 den thematischen Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit.

Kapitel 3 beschreibt das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung entlang des operativen Technologieplanungsprozesses. Hierfür werden zunächst die Bedeutung und die Aufgaben der Prozessgestaltung dargelegt. Darauf basierend werden allgemeine Anforderungen an das Konzept abgeleitet. Das resultierende Simulationskonzept zur Prozessgestaltung ordnet die identifizierten phasen-spezifischen und -gerechten Methoden und Modelle entlang des operativen Technologieplanungsprozesses ein.



Abbildung 3: Aufbau der vorliegenden publikationsbasierten Arbeit

Kapitel 4 und Kapitel 5 orientieren sich am im Abschnitt 1.2 vorgestellten methodischen Vorgehen und bilden gemeinsam den publikationsbasierten Teil der vorliegenden Arbeit. Kapitel 4 erläutert das entwickelte Systemmodell des Schleifhärteprozesses. Dabei wird, unter Berücksichtigung einer allgemeinen Systembetrachtung des Schleifhärrens, die Modellierung der prozessspezifischen Wirkmechanismen sowie die Kopplung der System- und Stellgrößen mit den Ziel- und Ergebnisgrößen thematisiert. Zudem werden die implementierten

Wirkmechanismen bzw. Teilmodelle den in die Arbeit eingebundenen Publikationen zugeordnet. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5 die umgesetzten phasenspezifischen und -gerechten Simulationsmodelle des Schleifhärteprozesses beschrieben. Dies geschieht anhand der konzeptionellen Einordnung sowie der Zusammenfassung der integrierten Publikationen.

Die Bewertung der rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärteprozesses erfolgt in Kapitel 6 einerseits auf Basis des Erfüllungsgrads der in Kapitel 3 gestellten Anforderungen und andererseits im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbewertung. Abschließend fasst Kapitel 7 die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und erörtert zukünftige Forschungsbedarfe.

Wie bereits oben erwähnt, handelt es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine publikationsbasierte Dissertation, deren Grundlage die folgenden sieben Veröffentlichungen bilden: ZÄH ET AL. (2009a), FÖCKERER ET AL. (2012, 2013, 2010), KOLKWITZ ET AL. (2011b, a) und HYATT ET AL. (2013)<sup>5</sup>. Im Rahmen der weiteren Ausführungen erscheinen diese sieben Publikationen analog zur nachfolgenden Übersicht mit den Bezeichnungen (P1) bis (P7), was insbesondere deren Bedeutung herausstellen und die Abgrenzung zu den übrigen Literaturquellen erleichtern soll.

- (P1) Zäh, M. F.; Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Huntemann, J.-W.; **Föckerer, T.**: Experimental and Numerical Identification of Process Parameters of Grind-Hardening and Resulting Part Distortions. *Production Engineering – Research and Development (WGP Annals)* 3 (2009) 3, S. 271–279.
- (P2) **Föckerer, T.**; Kolkwitz, B.; Heinzl, C.; Zaeh, M. F.: Experimental and Numerical Analysis of Transient Behavior During Grind-Hardening of AISI 52100. *Production Engineering – Research and Development (WGP Annals)* 6 (2012) 6, S. 559–568.
- (P3) **Föckerer, T.**; Zaeh, M. F.; Zhang, O. B.: A Three-Dimensional Analytical Model to Predict the Thermo-Metallurgical Effects within the Surface Layer During Grinding and Grind-Hardening. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 56 (2013) 1/2, S. 223–237.
- (P4) **Föckerer, T.**; Huntemann, J.-W.; Heinzl, C.; Brinksmeier, E.; Zaeh, M. F.: Experimental and Numerical Analysis of the Influences on Part Distortion as a Result of the Grind-Hardening Process. In: Teti, R. (Hrsg.): 7<sup>th</sup> CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2010): Innovative and Cognitive Production

---

<sup>5</sup> Darüber hinaus war der Autor, z. T. federführend, an folgenden ergänzenden Publikationen zum Thema Schleifhärten beteiligt: ZÄH & FÖCKERER (2007), FÖCKERER ET AL. (2009), ZÄH ET AL. (2009b), FÖCKERER ET AL. (2009) und REINHART ET AL. (2011).

Technology and Systems. Neapel: University of Naples 2010. 4-seitige elektronische Publikation.

- (P5) Kolkwitz, B.; **Foekerer, T.**; Huntemann, J.-W.; Heinzel, C.; Zaeh, M. F.; Brinksmeier, E.: Identification and Analysis of Part Distortion Resulting from Grind-Hardening Process Using Computer-Based Methods. In: Zoch, H.-W.; Lübben, T. (Hrsg.): Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Distortion Engineering (IDE 2011). Bremen: Universität Bremen 2011. S. 499–506.
- (P6) Kolkwitz, B.; **Foekerer, T.**; Heinzel, C.; Zaeh, M. F.; Brinksmeier, E.: Experimental and Numerical Analysis of the Surface Integrity Resulting from Outer-Diameter Grind-Hardening. Procedia Engineering 19 (2011), S. 222–227. (zugleich Beitrag zur 1<sup>st</sup> CIRP Conference on Surface Integrity (CSI 2012)).
- (P7) Hyatt, G.; Mori, M.; **Foekerer, T.**; Zaeh, M. F.; Niemeyer, N.; Duscha, M.: Integration of Heat Treatment into the Process Chain of a Mill Turn Center by Enabling External Cylindrical Grind-Hardening. Production Engineering – Research and Development (WGP Annals) 7 (2013) 6, S. 571–584.

Die Publikationen (P1) und (P2) sowie (P4) bis (P6) gingen aus dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekt „Untersuchungen zur numerischen Simulation des Schleifhärteprozesses zur Berechnung von Temperaturverteilung, Gefügeumwandlung und Bauteilverzug“ hervor. Soweit nicht anderweitig vermerkt, stammen die experimentellen Ergebnisse von der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT), Bremen, mit welcher das oben genannte Forschungsprojekt in Kooperation bearbeitet wurde. Das hierzu eingesetzte Versuchsumfeld der IWT, inklusive der zugehörigen Mess- und Analysetechnik, wurde in den projektspezifischen Schriftstücken beschrieben und publiziert.

Die in der Publikation (P3) veröffentlichten Ergebnisse wurden projektunabhängig und federführend durch den Autor der vorliegenden Dissertation am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) entwickelt. Ein Kooperationsprojekt mit der Firma DMG / Mori Seiki USA Technical Center Chicago zum industriellen Einsatz des Schleifhärteprozesses auf Dreh-Fräszentren resultierte in der Publikation (P7), welche gemeinsam mit eben diesem Unternehmen und dem Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen verfasst wurde.



## 2 Stand der Erkenntnisse

### 2.1 Allgemeines

Die vorliegende Arbeit behandelt die Thematik der rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens als integriertes Verfahren der Randschichtwärmebehandlung beim Umfangs-Querschleifen von Stahlbauteilen. In diesem Zusammenhang gibt dieses Kapitel einen Überblick über die werkstückbezogenen Phänomene beim Umfangs-Querschleifen und beim Schleifhärten (vgl. Abschnitt 2.2). Basierend auf den technologischen Verfahrensgrundlagen werden bekannte Modelle und Methoden zur Beschreibung von Schleifprozessen sowie zur Simulation des Schleifhärtens vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.3) und hinsichtlich ihrer Eignung zur effizienten Auslegung des Schleifhärteprozesses beurteilt (vgl. Abschnitt 2.4). Eine detaillierte Analyse und Diskussion der technologischen und physikalischen Wirkzusammenhänge bei der Randzonenbeeinflussung durch den Schleifhärteprozess findet im Rahmen der systematischen Modellbildung in Kapitel 4 sowie in den integrierten Publikationen (P1) bis (P7) statt.

### 2.2 Grundlagen des Umfangsschleifens und des Schleifhärtens

#### 2.2.1 Kinematik und Spanbildungsmechanismen beim Schleifen

Im Rahmen dieser Dissertation wurde die rechnergestützte Prozessgestaltung des Schleifhärtens sowie die damit verbundene Modellbildung und Simulation an Verfahrensvarianten des Umfangs-Querschleifens im Gegenlauf untersucht<sup>6</sup>. Bei diesem Fertigungsverfahren werden mit, im Vergleich zu konventionellen Schleifprozessen, geringen tangentialen Vorschubgeschwindigkeiten  $v_{ft}$  und hohen Zustellungen  $a_e$  in einem einzigen Überlauf Nuten oder Profile in das Werkstück eingestochen (BROCKHOFF 1999b). Eine schematische Darstellung eines Plan-Umfangs-Querschleifprozesses zeigt Abbildung 4 in Anlehnung an DIN 8589-11 (2003). Die abgebildete Schleifscheibe, mit dem Durchmesser  $d_s$  und der Umfangsgeschwindigkeit  $v_s$ , steht zu einem überwiegenden Anteil mit ihrem Umfang in Kontakt mit dem Werkstück. Durch den Volleingriff können die Schleifscheibenbreite  $b_s$  und die Eingriffsbreite  $a_p$  gleichgesetzt werden und bilden die Nut- bzw. Spurbreite. Durch den einmaligen Überlauf resultiert die Zustellung  $a_e$  direkt in der Nut- bzw. Spurtiefe. In den betrachteten

---

<sup>6</sup> Aufgrund der hier eingeführten Einschränkung auf Verfahrensvarianten des Umfangs-Querschleifens im Gegenlauf wird aus Gründen der Lesbarkeit im weiteren Verlauf der Arbeit auf die detaillierte Verfahrensspezifikation nach DIN 8589-11 (2003) verzichtet und lediglich zwischen Plan-, Profil-, Außenrund- und Innenrundscheifen bzw. -schleifhärten unterschieden.

Verfahrensvarianten ergibt sich die tangentiale Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$  durch die Bewegung der Werkstückoberfläche am Eingriff der Schleifscheibe relativ zu deren stillstehender Rotationsachse.

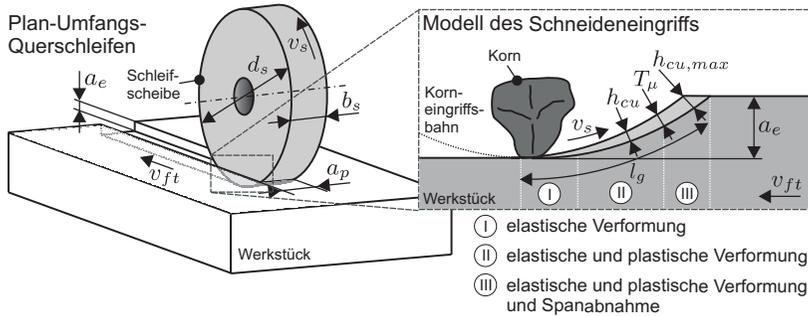


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Plan-Umfangs-Querschleifens und Modell des Schneideneingriffs beim Gegenlaufscheifen (in Anlehnung an CHEN & ROWE (1996), DIN 8589-11 (2003), KLOCKE & KÖNIG (2005) und KLOCKE ET AL. (2006))

Während der Schleifbearbeitung wird der Spanabhub in der Kontaktzone durch die geometrisch unbestimmten Schneiden der in der Schleifscheibe gebundenen Körner aus Hartstoffen bewerkstelligt (KLOCKE & KÖNIG 2005). Die im Korneingriff wirkende Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  ergibt sich dabei aus der Überlagerung der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe  $v_s$  und der tangentialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$ , welche durch das Gegenlaufscheifen in entgegengesetzte Richtungen weisen und sich damit in ihrer Wirkung addieren (DIN 8589-11 2003). Da die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe  $v_s$  i. d. R. sehr viel größer als die Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$  ist, wird in den meisten Fällen und in guter Näherung als Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe  $v_s$  herangezogen (MALKIN & GUO 2008, FRITZ & SCHULZE 2010).

Zur Visualisierung der Spanbildungsprozesse zeigt Abbildung 4 ein zweidimensionales Modell des Schneideneingriffs (CHEN & ROWE 1996, KLOCKE & KÖNIG 2005, KLOCKE ET AL. 2006). Dabei treten die Körner auf der dargestellten Korneingriffsbahn in das Werkstück ein, wobei die unverformte Spannungsdicke  $h_{cu}$  entlang der geometrischen Kontaktlänge  $l_g$  kontinuierlich zunimmt, bis die maximale ungerollte Spannungsdicke  $h_{cu,max}$  erreicht wird. Die geometrische Kontaktlänge  $l_g$  beschreibt in guter Näherung die Länge des Eingriffsbogens zwischen Werkstück und Schleifscheibe und lässt sich mithilfe der Zustellung  $a_e$  und mit dem äquivalenten Schleifscheibendurchmesser  $d_{eq}$  berechnen:

$$l_g \approx \sqrt{a_e \cdot d_{eq}}$$

Für das Planschleifen gilt dabei:  $d_{eq} = d_s$  (vgl. Abbildung 4). Beim Außen- und Innenrundsleifen ergibt sich der äquivalente Schleifscheibendurchmesser zu

$$d_{eq} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w \pm d_s} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} + & \text{für Außenrundsleifen} \\ - & \text{für Innenrundsleifen} \end{cases}$$

(KLOCKE & KÖNIG 2005, FRITZ & SCHULZE 2010). Der Durchmesser der Schleifscheibe  $d_s$  und der des Werkstücks  $d_w$  sind in Abbildung 5 dargestellt.

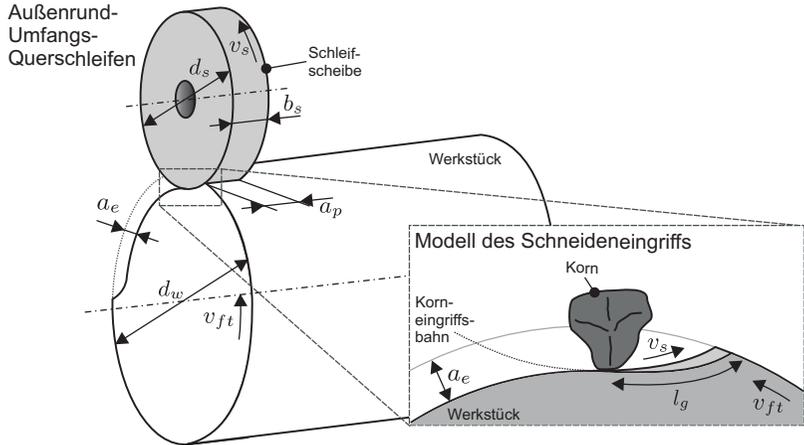


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Außenrund-Umfangs-Querschleifens und Modell des Schneideneingriffs beim Außenrundsleifen (in Anlehnung an DIN 8589-11 (2003) und KLOCKE & KÖNIG (2005))

Da die Spannungsdicken bei Schleifprozessen im Vergleich zu Trennverfahren mit geometrisch definierter Schneide sehr klein sind, können bei der Betrachtung der Spanbildungsprozesse die elastischen und plastischen Vorgänge in der Kontaktzone nicht vernachlässigt werden (DENKENA & TÖNSHOFF 2011). Daher werden bei der Diskussion der Spanbildungsmechanismen entlang der Kontaktzone einzelne Phasen unterschieden (vgl. Abbildung 4), welche sich auf Basis der unterschiedlichen mikroskopischen Effekte während des bahngelassenen Schneideneingriffs ergeben (MASSLOW 1952, LORTZ 1975, GROF 1977, KLOCKE & KÖNIG 2005, KLOCKE ET AL. 2006, DENKENA & TÖNSHOFF 2011). Der flache Eintrittswinkel der Schleifkörner bewirkt in Phase ① des Korneingriffs, dass der Werkstoff in der Werkstückrandzone lediglich elastisch verformt wird. In Phase ② treten mit zunehmenden Spannungsdicken neben den elastischen zudem plastische Verformungen auf, die zu einem Werkstofffluss unterhalb der Schneiden hin zu deren Freiflächen und zu seitlichen Werkstoffverdrängungen führen, wodurch u. a. seitliche Aufwürfe (vgl. Abbildung 6)

entstehen. Die eigentliche Spanbildung beginnt in Phase (III) mit dem Erreichen der Schnitteinsatztiefe  $T_\mu$ , weiterhin begleitet von den elastisch-plastischen Werkstoffverformungen (MASSLOW 1952, LORTZ 1975, KLOCKE & KÖNIG 2005, NACHMANI 2008).

### 2.2.2 Energieumsetzung bei Schleifprozessen

Die prozessspezifischen Reib-, Verformungs-, Trenn- und Schermechanismen während der Spanbildung in Phase (III) sind in Abbildung 6 dargestellt (MALKIN & ANDERSON 1974, BRINKSMEIER 1982, BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1994, KLOCKE & KÖNIG 2005, WILKE 2008, DENKENA & TÖNSHOFF 2011). Die Interaktion des Schleifkorns mit dem Werkstück resultiert in der Trennung (6) und Scherung (7) des Werkstoffs, wodurch sich ein Span bildet. Dieser wird über die Spanfläche (2) abgeführt, wobei dort und an den Bindungen der Schleifscheibe (1) Reibung auftritt. Dabei kommt es im Span (4) durch dessen Verdrängung aus der Scherzone zu elastisch-plastischen Verformungen. Der Teil des Werkstoffs, welcher unterhalb der Trennzone liegt und damit nicht abgespannt wird, erfährt, wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erläutert, durch den Korneingriff eine seitliche Verdrängung oder fließt unter dem Korn hindurch zu dessen Freifläche, wodurch an der Verschleißfläche (3) Reibung entsteht. Zudem verursacht die Werkstoffverdrängung elastisch-plastische Verformungen in der Verformungszone (5). Die elastischen Verformungsanteile führen nach dem Kornkontakt zu einer elastischen Rückfederung des Werkstoffs (KLOCKE & KÖNIG 2005).

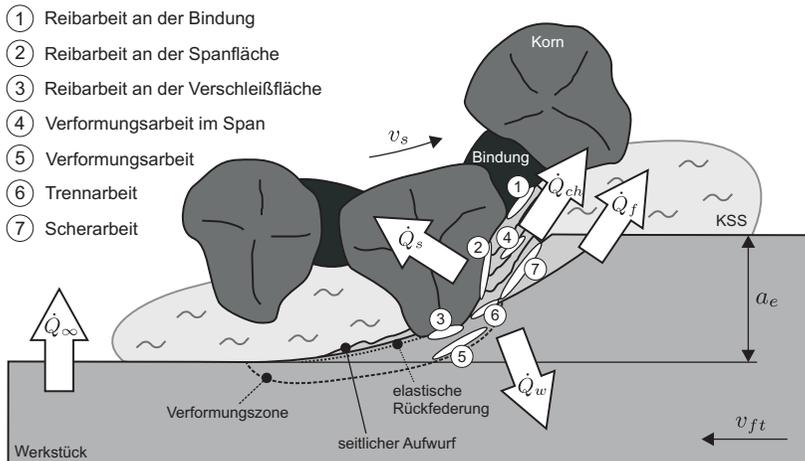


Abbildung 6: Mechanismen der Energieumsetzung und Wärmeverteilung in die Komponenten beim Schleifen (in Anlehnung an BRINKSMEIER (1982), BRINKSMEIER & BROCKHOFF (1994), KLOCKE & KÖNIG (2005) und WILKE (2008))

Die für die Zerspanung erforderlichen mechanischen Reib-, Verformungs-, Trenn- und Scherarbeiten werden durch die kinetische Energie der Schleifscheibe bereitgestellt und während der Spanbildung in guter Näherung vollständig in thermische Energie umgewandelt (BRANDIN 1978, LOWIN 1980). Damit ergibt sich der gesamte in die Kontaktzone eingebrachte Wärmestrom  $\dot{Q}_{total}$  aus der an der Schleifscheibe anliegenden Leistung  $P_c$ , welche sich aus der tangentialen Schleifkraft  $F_t$  und der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  berechnet:

$$\dot{Q}_{total} = P_c = F_t \cdot v_c$$

Wie in Abbildung 6 gezeigt, verteilt sich der Gesamtwärmestrom  $\dot{Q}_{total}$  auf Wärmeströme in das Werkstück  $\dot{Q}_w$ , die Schleifscheibe  $\dot{Q}_s$ , den Kühlschmierstoff  $\dot{Q}_f$  und die Späne  $\dot{Q}_{ch}$  sowie in die Wärmestromanteile, welche über Strahlung und Konvektion an die Umgebung ( $\dot{Q}_\infty$ ) abgegeben werden (LOWIN 1980, BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1994, GUO & MALKIN 1995, ROWE 2001, KLOCKE & KÖNIG 2005):

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_w + \dot{Q}_s + \dot{Q}_f + \dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_\infty$$

Neben den kinematischen Eingriffsverhältnissen, den prozessspezifischen Spanbildungsmechanismen und dem Werkstoffverhalten hängt die resultierende Aufteilung der Wärmestromanteile von der Art und der Beschaffenheit der Schleifscheibe sowie der Kühlschmierung ab, wobei i. d. R. ein Großteil der entstehenden Wärme in das Werkstück fließt (MALKIN & ANDERSON 1974, GROF 1977, LOWIN 1980, BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1994, WILKE 2008).

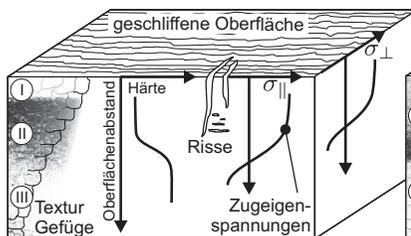
### 2.2.3 Randzonenbeeinflussung durch Schleifprozesse

Der in das Werkstück geleitete Wärmestrom  $\dot{Q}_w$  resultiert in einer Erwärmung der Werkstückrandzone und damit in vielen Fällen in einer thermischen Beanspruchung der Randschicht (ROWE 2001, MALKIN & GUO 2007). Darüber hinaus kommt es aufgrund der Korneingriffe und der in der Kontaktzone wirkenden normalen Schleifkraft  $F_n$  zu einer mechanischen Belastung der Gefügestruktur (BROCKHOFF 1999a, KLOCKE & KÖNIG 2005). Abhängig von den Prozessgrößen kann dieses thermomechanische Belastungskollektiv zu Gefügeumwandlungen und Gefügeveränderungen sowie zur Entstehung von Eigenspannungen<sup>7</sup> in der Werkstückrandschicht führen (vgl. Abbildung 7) und dadurch deren Eigenschaften beeinflussen (LOWIN 1980, BRINKSMEIER 1991).

<sup>7</sup> Als Eigenspannungen werden mechanische Spannungen bezeichnet, welche in Körpern ohne äußere mechanische oder thermische Belastung vorliegen (GROTE & FELDHUSEN 2007).

**Kurzzeitmetallurgie beim konventionellen Schleifen.** Wie in Abbildung 7 links dargestellt, kommt es bei der konventionellen Schleifbearbeitung von gehärteten Stahlwerkstoffen (III) durch die kurzzeitigen, hohen thermomechanischen Belastungen in der Randzone zum Anlassen des martensitischen Grundgefüges (II) und zur Bildung einer Neuhärtungszone (I) (SHAW & VYAS 1994, BROCKHOFF 1999b, NACHMANI 2008)<sup>8</sup>. Neben der Sprödigkeit der sich bildenden Neuhärtungszone reduziert insbesondere die mit der entstehenden Anlasszone verbundene Härteminderung die Bauteilqualität (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1997, DENKENA ET AL. 2003, KLOCKE ET AL. 2005). Damit begrenzen diese thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte innerhalb der Werkstückrandzone die realisierbaren Zeitspanvolumina  $Q_w$  und dadurch die Leistungsfähigkeit konventioneller Schleifprozesse (MALKIN 1974, SNOEYS ET AL. 1978, ROWE ET AL. 1996).

#### Beeinflussung der Randzone gehärteter Stahlwerkstoffe

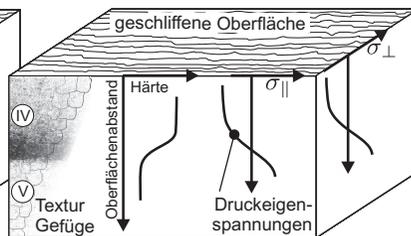


Ⓚ Neuhärtungszone

Ⓚ Anlasszone

Ⓚ Härtings- und Übergangszone

#### Beeinflussung der Randzone weichgeglühter Stahlwerkstoffe



Ⓚ schleifgehärtete Randschicht

Ⓚ ferritisch-perlitische Kerngefüge

Abbildung 7: Thermometallurgische und thermomechanische Randzonenbeeinflussung beim Schleifen von gehärteten und weichgeglühten Stahlwerkstoffen, u. a. dargestellt anhand von über dem Abstand zur bearbeiteten Werkstückoberfläche aufgetragenen qualitativen Kurvenverläufen (in Anlehnung an BRINKSMEIER (1991) und BRINKSMEIER ET AL. (2005))

#### Randschichtwärmebehandlung durch Schleifhärten.

In Anlehnung an Abschnitt 1.1 und wie in Abbildung 7 rechts illustriert, ermöglicht es der Prozess *Schleifhärten*, die in der Kontaktzone entstehende Prozesswärme gezielt für eine kurzzeitmetallurgische Randschichthärtung zu nutzen (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1994, 1996b). Das auftretende thermomechanische Belastungskollektiv führt zu einem kurzzeitigen Temperaturanstieg in der Werkstückrandzone und

<sup>8</sup> Zur Vertiefung der metallurgischen Grundlagen zu den Themen Gefügeumwandlung, Kurzzeitmetallurgie und Randschichtwärmebehandlung wird auf die werkstoffkundliche Standardliteratur verwiesen (u. a. HAASEN (1994), LÄPPLÉ (2003), LIEDTKE & JÖNSSON (2004), BARGEL ET AL. (2005), HORNBÖGEN ET AL. (2008) und WEISSBACH (2010)).

verursacht dort eine Austenitisierung des vorliegenden ferritisch-perlitischen Ausgangsgefüges (V). Getrieben von Selbstabschreckeffekten, aufgrund der hohen Temperaturgradienten zwischen der Randschicht und dem kalten Werkstückkern, und unterstützt von der Kühlschmierstoffwirkung bildet sich anschließend eine feinkörnige, martensitische Randschicht (IV) aus (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1996a). Die positiven funktionalen Eigenschaften der schleifgehärteten Randschichten, wie z. B. die erreichbaren Einhärtetiefen und die Verschleißfestigkeiten, sowie die Prozessreproduzierbarkeit und -fähigkeit konnten von BROCKHOFF (1999a, b) für die Verfahrensvarianten Plan-, Profil- und Außenrundscheifhärten experimentell nachgewiesen werden.

Basierend auf diesen grundlegenden Arbeiten von BRINKSMEIER und BROCKHOFF (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1994, 1996a, b, BROCKHOFF 1999a, b) hatten zahlreiche Forschungsprojekte die Erweiterung des Prozess-Know-hows sowie die Klärung der technologischen Potentiale und Grenzen des Schleifhärteprozesses zum Inhalt. Ein Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen lag dabei auf der Analyse und Bewertung der verfahrensspezifischen Zusammenhänge zwischen den eingesetzten Prozessparametern, den beobachteten Effekten während des Schleifhärtens, wie z. B. den Temperaturfeldern im Werkstück, sowie den resultierenden Einhärtetiefen und Gefügestrukturen in der Randschicht (ZARUDI & ZHANG 2002a, PREKEL ET AL. 2003, VENKATACHALAPATHY & RAJMOHAN 2003, BRINKSMEIER ET AL. 2005, LIU ET AL. 2006, YOUSSEF & AL-MAKKY 2006, HAN ET AL. 2007).

Neben den Prozessstellgrößen, wie z. B. der Zustellung  $a_e$ , haben die Eigenschaften der Schleifscheibe (BRINKSMEIER ET AL. 2005, SALONITIS ET AL. 2008, STÖHR 2008, WILKE 2008), die Legierungszusammensetzung des Werkstückstahls (BROCKHOFF 1999b, LIU ET AL. 2006, YOUSSEF & AL-MAKKY 2006, NGUYEN ET AL. 2007, LI ET AL. 2008, ZHANG ET AL. 2009a) und der Kühlschmierstoff einen signifikanten Einfluss auf das Prozessergebnis. Während der überwiegende Anteil der publizierten Forschungsarbeiten die Selbstabschreckung mithilfe von konventionellen Kühlschmierstoffen betrachtete (BRINKSMEIER ET AL. 2005, LIU ET AL. 2007, SALONITIS & CHRYSOULOURIS 2007, ZHANG 2007), analysierten NGUYEN ET AL. (2007) und NGUYEN & ZHANG (2010) die Auswirkungen von in die Kontaktzone eingebrachtem flüssigem Stickstoff auf die resultierende Gefügestruktur in der Randzone.

Im Hinblick auf eine industrielle Einsetzbarkeit des Schleifhärteprozesses wurden die anhand des Planscheifhärtens (BROCKHOFF 1999b, ZARUDI & ZHANG 2002a, BRINKSMEIER ET AL. 2005, LIU ET AL. 2006, YOUSSEF & AL-MAKKY 2006, NGUYEN ET AL. 2007, LI ET AL. 2008, WILKE 2008, ZHANG ET AL. 2009a) gewonnenen prozessspezifischen Erkenntnisse auf unterschiedliche Verfahrensvarianten übertragen. Das umgesetzte Profilscheifhärten bietet u. a. die Möglichkeit, die Randschicht unter den Laufflächen von linearen Führungen

und von homokinetischen Gelenken durch eine spanende Bearbeitung zu härten (BRINKSMEIER ET AL. 2005, VELDE 2006, SALONITIS ET AL. 2007, WILKE 2008). Aufbauend auf den Arbeiten von BROCKHOFF (1999b) analysierten VENKATACHALAPATHY & RAJMOHAN (2003), CHRYSOLOURIS ET AL. (2005), WILKE (2008) und NGUYEN & ZHANG (2011) das Prozessverhalten des Außenrundschleifhärtens und entwickelten u. a. Prozessführungsstrategien zur Minimierung des Härteschlupfs<sup>9</sup> in der Einstechzone. STÖHR (2008) nutzte diese Erkenntnisse zur Umsetzung des Innenrundschleifhärteprozesses, wobei insbesondere die gegenüber dem Außenrundschleifhärten abweichenden Eingriffsbedingungen im Fokus der Betrachtungen standen.

**Eigenspannungsentstehung in der Werkstückrandschicht.** Das thermomechanische Belastungskollektiv beim Schleifen und die damit verbundene metallurgische Beeinflussung der Werkstückrandschicht resultieren in einer plastischen Verformung und/oder Volumenänderung des Werkstoffs in der Randzone (BRINKSMEIER 1990, MAHDI & ZHANG 1999, CHEN ET AL. 2000). Dies äußert sich in einem neu ausgebildeten Eigenspannungszustand und in Maß- und Formänderungen<sup>10</sup> am bearbeiteten Werkstück (BRINKSMEIER 1991, ZHANG ET AL. 1992, BROCKHOFF 1999b, HEES 2003). Wie in Abbildung 8 dargestellt, kann die in der Werkstückrandzone resultierende Eigenspannung  $\sigma_{res}$  in Abhängigkeit von der kontaktfächenbezogenen Schleifleistung  $P_c''$  durch Superposition der thermisch ( $\sigma_{therm}$ ), mechanisch ( $\sigma_{mech}$ ) und durch Gefügewandlung induzierten Eigenspannungen beschrieben werden (BRINKSMEIER 1990, 1991). Aufgrund der geringen kontaktfächenbezogenen Schleifleistungen  $P_c''$  treten im Bereich ① lediglich thermisch bedingte Eigenspannungen durch äußere Reibung auf (BRINKSMEIER 1990). Durch die Erwärmung der Randzone kommt es zu deren Ausdehnung, wobei der kalte, nicht an Volumen zunehmende Werkstückkern dieser Bewegung entgegenwirkt. Dadurch entstehen Druckspannungen in der Randschicht, welche zu einer plastischen Stauchung des Werkstoffs und nach dem Abkühlen zur Ausbildung von thermisch induzierten Zugeigenspannungen  $\sigma_{therm}$  führen (CHEN ET AL. 2000, DENKENA & TÖNSHOFF 2011).

---

<sup>9</sup> Der Härteschlupf tritt bei verschiedenen Verfahren zum Randschichthärten von Wellen, u. a. auch beim Flamm- und Induktionshärten, auf und stellt einen lokalen Abfall der Randschichthärte in der Überlappungszone dar (LIEDTKE & JÖNSSON 2004). Beim Außenrundsleifhärten entsteht der Härteschlupf abhängig von der Einstechstrategie entweder durch die Abnahme der Zustellung  $a_e$ , und damit des bezogenen Zeitspanvolumens  $Q_w' = a_e \cdot v_{ft}$ , zum Prozessende oder durch das erneute Anlassen der bereits gehärteten Randschicht (BROCKHOFF 1999b, STÖHR 2008, WILKE 2008).

<sup>10</sup> Da Maß- und Formänderungen an Werkstücken in vielen Fällen überlagert auftreten, werden diese häufig unter dem Begriff *Verzug* zusammengefasst (HEES 2003).

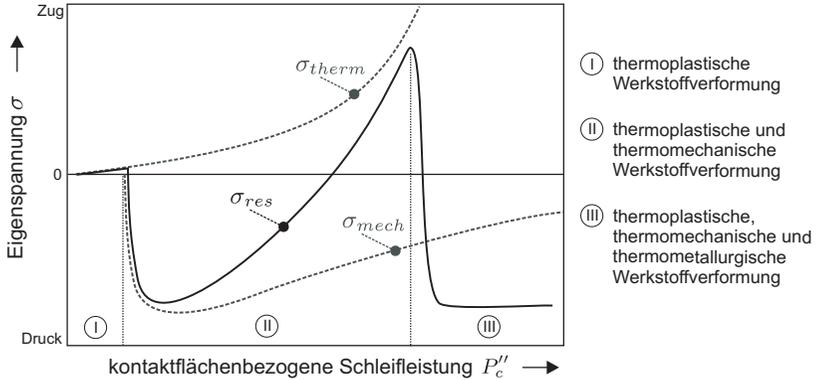


Abbildung 8: Qualitative Beschreibung der Eigenspannungen in der Werkstückrandzone in Abhängigkeit von der kontaktfächenbezogenen Schleifleistung  $P_c''$  durch Superposition thermischer, mechanischer und metallurgischer Effekte (in Anlehnung an BRINKSMEIER (1990) und SÖLTER (2010))

Im Bereich **II** wird die bearbeitete Randschicht zusätzlich durch mechanische Beanspruchung plastifiziert, wodurch sprunghaft hohe mechanische Druckeigenspannungen  $\sigma_{mech}$  eingebracht werden (BRINKSMEIER 1990). Mit zunehmender kontaktfächenbezogener Schleifleistung  $P_c''$  kommt es zu einem kontinuierlichen Anstieg der Temperaturen unterhalb der Schleifkontaktzone. Dadurch sinken einerseits die durch mechanische Verformung maximal eingebrachten Druckeigenspannungen  $\sigma_{mech}$ , während andererseits der Anteil der thermisch induzierten Zugeigenspannungen  $\sigma_{therm}$  stetig zunimmt (CHOI 1986, BRINKSMEIER 1990). Daher ist, wie bereits in Abbildung 7 links illustriert, bei der Schleifbearbeitung von gehärteten Stählen mit resultierenden Eigenspannungen  $\sigma_{res}$  im Zugspannungsbereich und damit mit der Entstehung von Rissen in der Randschicht zu rechnen (CHOI 1986, BRINKSMEIER 1991, ROWE ET AL. 1995, CHEN ET AL. 2000, GRUM 2001, NACHMANI 2008, DENKENA & TÖNSHOFF 2011).

Weiter steigende kontaktfächenbezogene Schleifleistungen  $P_c''$  führen im Bereich **III** zu Gefügewandlungen innerhalb der Randschicht, wodurch die resultierenden Eigenspannungen  $\sigma_{res}$  beeinflusst werden (BRINKSMEIER 1990). Wie in Abbildung 7 rechts dargestellt, treten bei der martensitischen Randschichtwärmebehandlung durch Schleifhärten im Umwandlungsbereich resultierende Eigenspannungen  $\sigma_{res}$  im Druckspannungsbereich auf (BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1996a, BROCKHOFF 1999b, BROCKHOFF & BRINKSMEIER 1999, WILKE 2008). Dies kann insbesondere auf das, im Vergleich zum ferritisch-perlitischen Ausgangsgefüge, höhere spezifische Volumen  $\nu$  des Martensits und die damit verbundene Gefügebrauchung zurückgeführt werden (BROCKHOFF

1999b, HEES 2003). Aufgrund der in der Randschicht induzierten Druckeigen-  
spannungen zeichnen sich durch Schleifhärten bearbeitete Bauteile durch ein  
geringe Neigung zur Rissbildung aus (WILKE 2008). Die aus der Eigenspan-  
nungsentstehung resultierenden Verzugsphänomene beim Schleifhärten wurden  
von KESSLER ET AL. (1998), BROCKHOFF (1999b) und VELDE (2006) analysiert  
und diskutiert.

## 2.3 Modelle zur Beschreibung von Schleifprozessen

### 2.3.1 Eingrenzung relevanter Modellansätze

Auf dem Gebiet der Modellbildung und Simulation von Schleifverfahren exis-  
tiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Prozessanalyse, -auslegung und -steuerung  
(TÖNSHOFF ET AL. 1992, BRINKSMEIER ET AL. 2006, HEINZEL 2009). Abbil-  
dung 9 zeigt einen Überblick über die bekannten Modellansätze und kategori-  
siert diese. Der Abstraktionsgrad der Modelle reicht dabei von der mikrosko-  
pischen bis zur makroskopischen Betrachtung der Schleifprozesse.

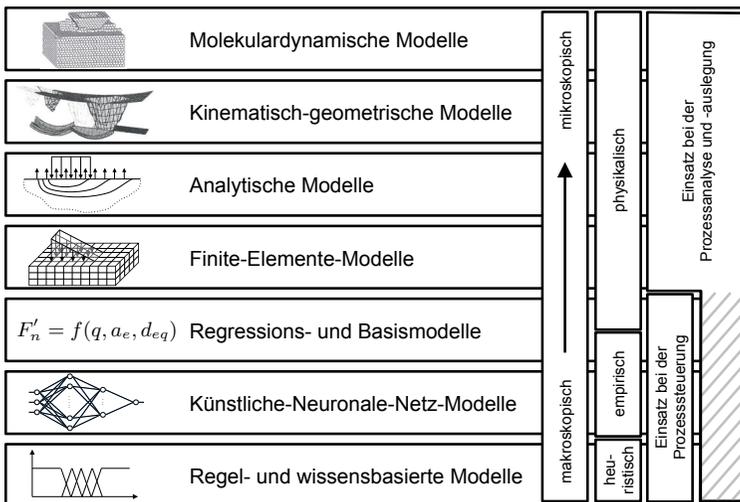


Abbildung 9: Kategorisierung der Modellansätze sowie deren Einsatz zur Beschreibung  
von Schleifprozessen (in Anlehnung an BRINKSMEIER ET AL. (2006),  
HEINZEL (2009), RENTSCH & INASAKI (1995) und ZITT (1999))

Die *mikroskopischen Modelle* zeichnen sich durch die Abbildung der physi-  
kalischen Zusammenhänge aus und werden daher i. d. R. deduktiv gewonnen  
(ZITT 1999). Zwar bedarf die detaillierte Beschreibung der prozessspezifischen

Mechanismen eines hohen Aufwands zur Lösung der komplexen Simulationsmodelle, dafür kann beim Einsatz von validierten Modellen weitestgehend auf Experimente verzichtet werden, wodurch sich physikbasierte Modelle besonders für die Prozessanalyse und -auslegung eignen (BRINKSMEIER ET AL. 2006). Die *makroskopischen Modelle* werden mithilfe von heuristischen Methoden auf Basis von Erfahrungswissen oder unter Einsatz von experimentellen Ergebnissen induktiv aufgebaut und stellen abstrakte Verknüpfungen von Eingangs- und Ausgangsgrößen dar (ZITT 1999, HEINZEL 2009). Durch die abstrakte Abbildung der prozessspezifischen Zusammenhänge sind die makroskopischen Modelle durch einen geringen Rechenaufwand gekennzeichnet, was diese v. a. für den Einsatz bei der Prozesssteuerung qualifiziert. Aufgrund der fehlenden Allgemeingültigkeit der makroskopischen Modelle ist die Möglichkeit zur Prozessanalyse und -auslegung jedoch eingeschränkt (BRINKSMEIER ET AL. 2006).

Unter Bezugnahme auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit (vgl. Abschnitt 1.2) werden im Folgenden die relevanten Modellansätze eingegrenzt. Zum einen erfolgt eine Fokussierung auf die Prozessanalyse und -auslegung des Schleifhärtens im Rahmen der operativen Technologieplanung. Dadurch können die rein makroskopischen Modellansätze, d. h. die Regressions- und Basismodelle<sup>11</sup>, die Künstliche-Neuronale-Netz-Modelle<sup>12</sup> sowie die regel- und wissensbasierten Modelle, aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden. Zum anderen liegt der Schwerpunkt der rechnergestützten Prozessgestaltung auf der Modellierung und Simulation der thermometallurgischen und thermomechanischen Phänomene innerhalb des Werkstücks, wie z. B. der martensitischen Randschichthärtung und der induzierten Eigenspannungen. Diesbezüglich und im Hinblick auf eine Minimierung des erforderlichen Aufwands eignen sich insbesondere werkstückbezogene Modellansätze (ROEREN 2007), welche als System- bzw. Modellgrenzen die Werkstückoberfläche nutzen. Dabei werden sämtliche Wechselwirkungen mit Prozesskomponenten, welche außerhalb der Systemgrenze liegen, wie z. B. der Schleifscheibe, über Ersatzmodelle abgebildet. In diesem Zusammenhang werden molekulardynamische und kinematisch-geometrische Modelle, deren Fokus die Simulation einzelner Korneingriffe in die Werkstückstruktur ist (BRINKSMEIER ET AL. 2006, HEINZEL 2009), nicht weiter berücksichtigt<sup>13</sup>. Daher kommen im Rahmen dieser Arbeit für die Modellierung und Simulation des Schleifhärteprozesses die werkstück-

---

<sup>11</sup> Der Ausschluss der Regressions- und Basismodelle bezieht sich dabei auf die umfassende, werkstückbezogene Modellierung und Simulation der thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte beim Schleifhärten. Unabhängig davon kommen im Rahmen dieser Arbeit die Regressions- und Basismodelle als Hilfsmittel zur Abbildung der Prozesskräfte beim Schleifhärten zum Einsatz (vgl. Abschnitt 4.3.2 und Publikation [P2](#)).

<sup>12</sup> Die Künstliche-Neuronale-Netz-Modelle können dabei aus einem oder mehreren künstlichen neuronalen Netz(en) bestehen.

<sup>13</sup> Analog dazu werden analytische und Finite-Elemente-basierte mikroskopische Modelle zur Simulation einzelner Korneingriffe ebenfalls von den Untersuchungen ausgeschlossen.

bezogenen analytischen und Finite-Elemente-(FE)-basierten Ansätze in Frage. Die diesbezüglich für konventionelle Schleifprozesse sowie das Schleifhärten bestehenden Simulationsmodelle werden in den folgenden beiden Abschnitten detailliert betrachtet<sup>14 15</sup>.

### 2.3.2 Analytische Modelle

**Modelle zur Beschreibung der thermischen Effekte**<sup>16</sup>. Der Großteil der Methoden zur analytischen Modellierung und Simulation von Schleifprozessen betrachtet die thermischen Effekte im bearbeiteten Werkstück. Viele der veröffentlichten Arbeiten, wie beispielsweise OUTWATER & SHAW (1952), HAHN (1962) und TAKAZAWA (1966), bauen auf den Ansätzen von JAEGER (1942) und CARSLAW & JAEGER (1959) zur Berechnungen eines zweidimensionalen Temperaturfelds in einem halbunendlichen Körper auf. Dieser besitzt eine adiabate Oberfläche und bewegt sich mit der konstanten Geschwindigkeit  $v_{ft}$  unter einer Wärmequelle mit der konstanten Wärmestromdichte  $\dot{q}_0$  hinweg (vgl. Abbildung 10). Das sich durch die Wirkung der Wärmequelle einstellende quasi-stationäre Temperaturfeld kann durch den ersten Term der in Abbildung 10 dargestellten Formel berechnet werden.

DESRUISSEAUX & ZERKLE (1970a, b) erweiterten diese Formel um einen zweiten Term, welcher die Temperaturreduzierung im Werkstück durch Strahlung und Konvektion an der Oberfläche repräsentiert. Die Strahlung und die Konvektion werden dabei mithilfe des Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  und der Umgebungstemperatur  $T_\infty$  beschrieben. Durch diese Ergänzung wird es u. a. möglich, den Einfluss des Kühlschmierstoffs auf das Prozessverhalten sowie die Wärmeaufteilung beim Schleifen analytisch abzubilden und zu untersuchen (WITTMANN 2007, WILKE 2008).

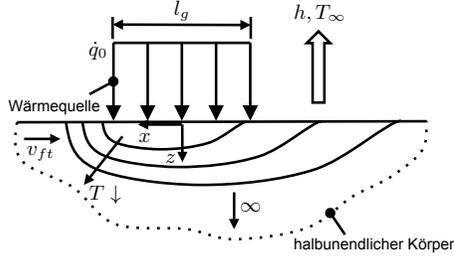
Die von LIAO ET AL. (2000) und MAKSOD (2005) entwickelten analytischen Modelle berücksichtigen die Mechanismen der Wärmeentstehung in der Kontaktzone sowie die thermischen Wechselwirkungen zwischen Werkstück, Schleifscheibe, Spänen und Kühlschmierstoff. Die zweidimensionalen Modelle basieren auf der Betrachtung einer bewegten Wärmequelle und erlauben die Berechnung der Kontaktzonen Temperaturen bei konventionellen und Tiefschleifprozessen.

---

<sup>14</sup> Detaillierte Informationen zu den übrigen in Abbildung 9 dargestellten Modellansätzen können BRINKSMEIER ET AL. (2006) und HEINZEL (2009) entnommen werden.

<sup>15</sup> Der Fokus der weiteren Diskussionen liegt dabei rein auf Ansätzen, welche die Modellierung und Simulation der thermometallurgischen und thermomechanischen Prozessphänomene innerhalb des Werkstücks ermöglichen. Modelle zur Beschreibung von z. B. chemischen und dynamischen Effekten beim Schleifen werden nicht erläutert.

<sup>16</sup> Der folgende Stand der Erkenntnisse zu den analytischen Modellen zur Beschreibung der thermischen Effekte orientiert sich in Teilen an den Ausführungen in Publikation [P3](#).



$$\begin{aligned}
 & \text{Temperaturfeld aufgrund Wärmequelle} \\
 T(X, Z) = & \frac{2a\dot{q}_0}{\pi k v_{ft}} \int_{X-L}^{X+L} e^{-m} K_0 \left( \sqrt{Z^2 + m^2} \right) dm \\
 & - \underbrace{\frac{2a\dot{q}_0}{\pi k v_{ft}} \pi H e^{Hz} \int_0^{\infty} \tau e^{H^2 \tau^2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Z}{2\tau} + H\tau \right] \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{X+L}{2\tau} + \tau \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{X-L}{2\tau} + \tau \right) \right] d\tau}_{\text{Temperaturreduzierung durch Strahlung und Konvektion}}
 \end{aligned}$$

Abbildung 10: Schematische Darstellung und formelbasierte Beschreibung<sup>17</sup> eines quasistationären Temperaturfelds in einem bewegten halbbunendlichen Körper, resultierend aus den überlagerten Wirkungen einer Wärmequelle sowie der Strahlung und der Konvektion an der Oberfläche (in Anlehnung an JAEGER (1942), CARSLAW & JAEGER (1959) und DESRUISSEAUX & ZERKLE (1970a, b))

Die von CARSLAW & JAEGER (1959) eingesetzte Wärmequelle mit konstanter Wärmestromdichte bildet die in Abschnitt 2.2 erläuterten prozessspezifischen Effekte der Wärmeentstehung lediglich bedingt ab. Aufgrund der entlang der Kontaktzone sequenziell einsetzenden Spanbildungsphänomene steigt der Anteil der umgesetzten Wärme näherungsweise proportional mit der zunehmenden unverformten Spannungsdicke  $h_{cu}$ . Die maximale Wärmestromdichte wird bei der maximalen unverformten Spannungsdicke  $h_{cu,max}$  am Ende der Kontaktzone erreicht, wodurch approximativ von einer dreiecksförmigen Wärmestromdichteverteilung ausgegangen werden kann (SNOEYS ET AL. 1978). Daher passten JIN & CAI (2001), JIN ET AL. (2002), ROWE (2001) und ROWE & JIN (2001) das Basismodell von CARSLAW & JAEGER (1959) durch den Einsatz einer Wärmequelle mit dreiecksförmiger Wärmestromdichteverteilung an die realen Gegebenheiten beim Schleifen an. Zudem berücksichtigt dieses zweidimensionale Modell die Kontaktverhältnisse beim Hochleistungstiefschleifen, indem sich die dreiecksförmige Wärmequelle auf einer schrägen Ebene bewegt.

<sup>17</sup> Die Definitionen der dimensionslosen Maßkennzahlen  $L$ ,  $X$  und  $Z$ , der dimensionslosen Integrationsvariablen  $m$  und  $\tau$  sowie der dimensionslosen Wärmeübergangskennzahl  $H$  finden sich im Verzeichnis der Zeichen, Kennzahlen und Konstanten auf S. ix.

Die oben vorgestellten und zum überwiegenden Teil eingesetzten zweidimensionalen Modelle vernachlässigen die Wärmeleitung quer zur Vorschubrichtung. LI & LI (2005) und KUO & LIN (2006) publizierten Ansätze zur analytischen Beschreibung von dreidimensionalen Temperaturfeldern. Die zugrunde liegenden Wärmequellen besitzen eine rechteckige Grundfläche, welche die Kontaktzone beim Schleifen repräsentiert, und eine homogene Wärmestromdichteverteilung. Die betrachteten halbbunendlichen Körper besitzen eine adiabate Oberfläche, so dass der Einfluss des Kühlschmierstoffs auf das resultierende Temperaturfeld nicht modelliert und analysiert werden kann.

Die analytisch berechneten Temperaturfelder werden u. a. eingesetzt, um schleifbedingte thermische Schädigungen innerhalb der Werkstückrandschicht, wie z. B. Anlasseffekte, zu prognostizieren (SNOEYS ET AL. 1978, ROWE ET AL. 1996, MALKIN & GUO 2007). ZARUDI & ZHANG (2002b) koppelten das Modell von CARSLAW & JAEGER (1959) mit analytischen Modellen zur Beschreibung der Gefügeumwandlung, um damit auf die metallurgischen Randzonenveränderungen beim Schleifen zu schließen. FRICKER ET AL. (2004) nutzten den Ansatz von CARSLAW & JAEGER (1959) zur Festlegung von Parameterfenstern für den Schleifhärteprozess. Dabei wurden die erreichbaren Einhärtetiefen über das analytisch berechnete Temperaturfeld abgeschätzt. Eine explizite Modellierung und Simulation der Gefügeumwandlung fand nicht statt.

**Modelle zur Beschreibung der mechanischen Effekte.** Wie in Abschnitt 2.2.3 erläutert, bewirken das thermomechanische Belastungskollektiv während des Schleifens und die dadurch resultierenden Gefügeumwandlungen eine plastische Deformation des Werkstoffs unterhalb der Kontaktzone, wodurch Spannungen in der Randzone induziert werden. IWANOW ET AL. (1993) beschreiben die prinzipiellen Wirkzusammenhänge im Schleifprozess über ein Systemmodell und leisten damit einen Beitrag zur Spannungsberechnung beim Schleifen. Allerdings vernachlässigt das umgesetzte Systemmodell die thermometallurgischen Effekte innerhalb der Werkstückrandschicht, wie z. B. die Gefügeumwandlung, wodurch sich dieses Modell nicht zur Beschreibung des Schleifhärteprozesses eignet.

Eine effiziente Methode zur Berechnung der Werkstückverzüge ist der Einsatz von Quellspannungsmodellen, in denen die in der Werkstückrandzone induzierten Spannungen vereinfacht betrachtet werden. Nach der Entfernung der äußeren Kräfte, d. h. der Werkstückeinspannung, führen diese Spannungen zu elastischen Formänderungen, wobei sich der dabei ausbildende Eigenspannungstiefenverlauf über den gesamten Werkstückquerschnitt erstreckt (TÖNSHOFF 1966, SÖLTER 2010). Die in der Werkstückrandschicht entstehenden Spannungen werden als Quellspannungen bezeichnet, da diese als Quellen für die Entstehung von Eigenspannungen wirken (REISSNER 1931, TÖNSHOFF

1966). Basierend auf den Querspannungen und deren Wirkquerschnitt lassen sich die sogenannten Quellkräfte berechnen. Mithilfe dieser Quellkräfte, welche im Querspannungsbereich auf das spannungsfreie Werkstück einwirken, können die durch die Schleifbearbeitung induzierten Verzüge für einfache Geometrien analytisch bestimmen werden (TÖNSHOFF 1966, BRINKSMEIER & SÖLTER 2009, HEINZEL 2009, SÖLTER 2010).

### 2.3.3 Finite-Elemente-Modelle

Der Einsatz der Finite-Elemente-Methode (FEM)<sup>18</sup> ermöglicht es, komplexe nichtlineare Phänomene, wie z. B. die instationäre Wärmeleitung in Körpern, über Differentialgleichungen zu beschreiben und numerisch zu berechnen. Dazu wird im Rahmen der sogenannten Vernetzung zunächst das zu simulierende System mithilfe von finiten Elementen abgebildet. Anschließend werden die definierten Differentialgleichungen numerisch an den diskreten Knotenpunkten, über welche die finiten Elemente gekoppelt sind, gelöst. Aufgrund der Tatsache, dass das betrachtete System und die dabei relevanten Phänomene theoretisch beliebig komplex sein können<sup>19</sup>, qualifiziert sich die FEM zur Modellierung, Analyse und Prognose der werkstückbezogenen thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte infolge einer Schleifbearbeitung (BRINKSMEIER ET AL. 2006, DOMAN ET AL. 2009, HEINZEL 2009)<sup>20</sup>.

Gemäß HEINZEL (2009) beschäftigt sich der überwiegende Anteil der publizierten FE-basierten Ansätze mit der Beschreibung und Analyse der thermischen Aspekte des Schleifens. Die diesbezüglich entwickelten zweidimensionalen (CHOI 1986, MAHDI & ZHANG 1995, BIERMANN & SCHNEIDER 1997, MAMALIS ET AL. 2003a, b, ANDERSON ET AL. 2008) und dreidimensionalen (WEBER 2001, JIN & STEPHENSON 2004, UHLMANN ET AL. 2010) Modelle ermöglichen eine numerische Analyse der transienten Temperaturfelder im Werkstück und erlauben Rückschlüsse auf etwaige schleifspezifische Schädigungen der bearbeiteten Randschicht. Im Rahmen der werkstückbezogenen Modellbildung wird die Energieumsetzung in der Kontaktzone (vgl. Abschnitt 2.2.2) über eine Wärmequelle beschrieben. Die Wärmeableitung über die Werkstückoberfläche wird i. d. R. mithilfe von Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  abgebildet. Zur Ge-

<sup>18</sup> Die Grundlagen der Finite-Elemente-Methode (FEM) können der Standardliteratur entnommen werden (u. a. HINTON (1992), LEWIS ET AL. (1996), ZIENKIEWICZ & TAYLOR (2000a, b) und BATHE (2002)).

<sup>19</sup> Begrenzt wird der Einsatz der FEM aktuell einerseits durch die fehlende Möglichkeit, sämtliche auftretenden physikalischen Phänomene über Differentialgleichungen zu beschreiben, und andererseits durch die endliche Rechenleistung, welche zur Lösung der Differentialgleichungen zur Verfügung steht.

<sup>20</sup> BRINKSMEIER ET AL. (2006), DOMAN ET AL. (2009) und HEINZEL (2009) vermitteln einen umfassenden Stand der aktuellen Arbeiten zur FE-basierten Simulation von Schleifprozessen.

währleistung einer hohen Ergebnisgüte der Simulationen ist es erforderlich, die real vorliegenden Randbedingungen, welche z. B. die Wärmeverteilung in der Kontaktzone beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.2.2), bei der Modellierung zu berücksichtigen. Daher kommen in Abhängigkeit von der jeweiligen Prozessvariante angepasste Ersatzmodelle zur Beschreibung der Wärmeeinbringung sowie der Wärmeableitung über die Werkstückoberfläche zum Einsatz (SCHNEIDER 1999, WEINERT & SCHNEIDER 2000, BRINKSMEIER ET AL. 2006, ANDERSON ET AL. 2008, NOYEN 2008, DOMAN ET AL. 2009).

Eine Erweiterung der thermischen FE-basierten Ansätze stellen die thermometallurgischen Modelle dar, welche, durch die detaillierte Abbildung des temperatur- und phasenabhängigen Materialverhaltens, eine numerische Berechnung der Gefügeumwandlung auf Basis der transienten Temperaturfelder erlauben (MAHDI & ZHANG 2000, HAMDI ET AL. 2004, DUSCHA ET AL. 2011a, SHAH ET AL. 2012). Damit bieten diese Modelle eine erweiterte Möglichkeit zur Beurteilung der thermometallurgischen Randschichtbeeinflussung durch eine Schleifbearbeitung. Zudem bilden die thermometallurgischen Ansätze die Grundlage für die Simulation der thermomechanischen Prozessphänomene, wie z. B. der Entstehung von Eigenspannungen und der resultierenden Werkstückverzüge (CHOI 1986, MAHDI & ZHANG 1998, 1999, 2000, HAMDI ET AL. 2004, DUSCHA ET AL. 2011b, SHAH ET AL. 2012).

Bei den veröffentlichten Modellen zur Simulation der transienten Temperaturfelder und Gefügeumwandlungen beim Schleifhärten handelt es sich i. d. R. um dreidimensionale thermometallurgische Ansätze. CHRYSOLOURIS ET AL. (2005), LI ET AL. (2008) und ZHANG ET AL. (2009a, b) entwickelten FE-basierte Modelle zur Beschreibung und Analyse des Planschleifhärtens, wobei Wärmequellen mit einer konstanten Wärmestromdichteverteilung  $\dot{q}_0$  eingesetzt wurden. BRINKSMEIER ET AL. (2003) stellten für das Planschleifhärten Wärmequellen mit unterschiedlichen Wärmestromdichteverteilungen einander gegenüber. Dabei zeigten insbesondere die Simulationsergebnisse bei einer Wärmeeinbringung über eine dreiecksförmige Wärmestromdichteverteilung<sup>21</sup> eine gute Übereinstimmung mit den durchgeführten Experimenten. Daher wurde die dreiecksförmige Wärmestromdichteverteilung zur Modellierung und Simulation des Plan- (NGUYEN & ZHANG 2010), des Profil- (SALONITIS ET AL. 2007) und des Außenrundschleifhärtens (SALONITIS & CHRYSOLOURIS 2007, NGUYEN & ZHANG 2011) genutzt.

---

<sup>21</sup> Durch die Dreidimensionalität der Modelle besitzen die im zweidimensionalen Fall dreiecksförmigen Wärmequellen eine keilförmige Ausprägung, wobei von einer konstanten Wärmestromdichteverteilung quer zur Vorschubrichtung ausgegangen wird. Aufgrund der gängigen Nomenklatur wird im weiteren Verlauf der Arbeit zur Beschreibung der Wärmequellen sowohl bei zwei- als auch bei dreidimensionalen Modellen die dreiecksförmige Wärmestromdichteverteilung herangezogen.

## 2.4 Fazit und Handlungsbedarf

**Fazit.** Durch den gezielten Einsatz der bei der Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide entstehenden Prozesswärme zur martensitischen Rand-schichthärtung stellt der Schleifhärteprozess eine effiziente und nachhaltige Alternative zu konventionellen Wärmebehandlungsverfahren dar. Zusätzlich zu der günstigen Verschleißfestigkeit aufgrund der gehärteten Randzone haben die beim Schleifhärten in der Werkstückrandschicht induzierten Druckeigen-spannungen eine geringe Neigung zur Rissbildung an der bearbeiteten Bauteiloberfläche zur Folge. Diese vorteilhaften prozessspezifischen Eigenschaften konnten für verschiedene industrierelevante Verfahrensvarianten bestätigt werden. Allerdings liegen die Potentiale zum aktuellen Zeitpunkt weitestgehend brach. Neben dem eingeschränkten Prozess-Know-how und den Defiziten bei der Beherrschung von Bauteilverzug und Härteschlupf verhindert insbesondere der hohe experimentelle Aufwand zur Prozessauslegung einen breiten industriellen Einsatz des Schleifhärteprozesses (vgl. Abschnitt 1.1).

Zur Lösung dieser Problematik nutzen die bestehenden Forschungsarbeiten die simulative Analyse und Prognose des Prozessverhaltens. Diesbezüglich wurden überwiegend dreidimensionale FE-basierte Modelle vorgestellt, welche sich auf die Beschreibung der thermometallurgischen Effekte beim Schleifhärten fokussieren. Die numerische Betrachtung der Eigenspannungsentstehung und des Verzugsverhaltens beim Schleifhärten wurden bis dato weitestgehend vernachlässigt. Zudem handelt es sich bei den veröffentlichten Ansätzen i. d. R. um Adaptionen von bestehenden Methoden zur Modellierung und Simulation von konventionellen Schleifprozessen, wodurch prozessspezifische Phänomene nicht adäquat berücksichtigt werden. Des Weiteren sind die vorgestellten Simulationsmodelle als Insellösungen einzustufen, welche im Kontext von spezifischen Forschungsfragestellungen aufgebaut, anhand von Versuchsergebnissen kalibriert und zur Analyse des beobachteten Prozessverhaltens eingesetzt wurden. Aufgrund der fehlenden Allgemeingültigkeit sowie des erforderlichen Aufwands zum manuellen Aufbau und zur Kalibrierung der Modelle sind die bisher publizierten Ansätze lediglich eingeschränkt für den industriellen Einsatz geeignet. Insbesondere können die rechen- und damit zeitintensiven FE-basierten Methoden für die effiziente Prozessfensteridentifikation in den frühen Phasen der operativen Technologieplanung ausgeschlossen werden. Dafür geeignete analytische Simulationsansätze, welche die Prognose der dreidimensionalen thermometallurgischen Effekte beim Schleifhärten erlauben, wurden bisher nicht publiziert. Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen, insbesondere der Vernachlässigung der Gefügewandlung, eignen sich die für konventionelle Schleifprozesse entwickelten analytischen Modelle nicht für die Simulation des Schleifhärteprozesses.

**Handlungsbedarf.** Die Qualifikation des Schleifhärtens für die industrielle Anwendung und damit die nachhaltige Erschließung der prozessspezifischen Potentiale kann lediglich durch eine effiziente rechnergestützte Prozessgestaltung im Rahmen der operativen Technologieplanung erfolgen. Dabei ist der alleinige Einsatz von FE-basierten Methoden nicht zielführend, was sich insbesondere durch den hohen Aufwand zum Aufbau und zur numerischen Lösung der FE-Modelle begründen lässt. Zur effizienten und aussagekräftigen Prognose des Prozessverhaltens in jeder Phase der operativen Technologieplanung sind anforderungsspezifische analytische und FE-basierte Simulationsmodelle zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren ist ein allgemeingültiges Modellierungs- und Simulationskonzept zu erarbeiten, in welches die Simulationsmodelle phasenadäquat eingeordnet werden können. Um dabei die Vergleichbarkeit der eingesetzten Simulationsmodelle zu gewährleisten, müssen diese auf denselben systematischen Teilmodellen aufbauen. Dabei sind im Rahmen einer systematischen Modellbildung die Spezifikationen dieser Teilmodelle sowie deren Kopplungen derart umzusetzen, dass die grundlegenden physikalischen Phänomene des Schleifhärteprozesses auf Basis der bekannten betriebsmittel- und prozessspezifischen System- und Stellgrößen formal beschrieben werden können. Erst durch eine solche systematische Modellbildung, ein durchgängiges Simulationskonzept und einen hohen Automatisierungsgrad bei der Modellerstellung kann die nachhaltige Akzeptanz der rechnergestützten Prozessgestaltung und damit der Einsatz des Schleifhärteprozesses im industriellen Umfeld sichergestellt werden.

## 3 Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung

### 3.1 Allgemeines

Aufbauend auf dem Stand der Erkenntnisse und dem in Abschnitt 2.4 aufgezeigten Handlungsbedarf wird in diesem Kapitel das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung vorgestellt. Dieses bildet die Grundlage und den Rahmen für die systematische Modellbildung (vgl. Kapitel 4) sowie für die anforderungsspezifische Modellimplementierung, welche ein inhaltlicher Schwerpunkt der in Kapitel 5 integrierten Publikationen (P1) bis (P7) ist. Im Sinne der Zielsetzung soll das Konzept primär dazu dienen, die Aufgaben und Abläufe der Prozessgestaltung, insbesondere während der operativen Technologieplanung (OTP), durch die phasengerechte Nutzung rechnergestützter Methoden zu verbessern.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Konzeptentwicklung besteht aus zwei Schritten. Zunächst werden die Aufgaben der Prozessgestaltung in Abhängigkeit der Phasen des operativen Technologieplanungsprozesses spezifiziert (vgl. Abschnitt 3.2) und die Anforderungen an den Einsatz der rechnergestützten Methoden analysiert (vgl. Abschnitt 3.3). Anschließend werden geeignete phasenabhängige Modellierungs- und Simulationsansätze ausgewählt und anhand von assoziierten Aufgaben eingeordnet. Das in Abschnitt 3.4 detailliert beschriebene Gesamtkonzept versteht sich als allgemeingültiger Ansatz zur effizienten rechnergestützten Gestaltung thermometallurgischer und thermomechanischer Fertigungsprozesse entlang des operativen Technologieplanungsprozesses.

### 3.2 Bedeutung und Aufgaben der Prozessgestaltung

Im kundenanonymen Produktentstehungsprozess (PEP) nimmt die Arbeitsplanung als Bindeglied zwischen Konstruktion und Fertigung eine zentrale Stellung ein (EHRENSPIEL 2007, EVERSHEIM & SCHUH 1996). Basierend auf den Vorgaben der Konstruktion legt die Arbeitsplanung einmalig fest, mit welchen Technologien, in welcher Reihenfolge und mit welchen Betriebsmitteln das entsprechende Produkt hergestellt werden soll. In der klassischen Sichtweise wird die Arbeitsplanung dabei als sequenzielle Phase des Produktentstehungsprozesses betrachtet (vgl. Abbildung 11).

Im Allgemeinen setzt sich die Arbeitsplanung aus der Prozessgestaltung sowie der Produktionsmittelplanung zusammen. Da sich die Produktionsmittelplanung (Arbeitssystemplanung) allerdings mit der langfristigen, an den Unternehmenszielen ausgerichteten Auslegung und Gestaltung der Fertigungs- und Montagebereiche befasst (EVERSHEIM 1997), spielt diese im Rahmen des

Produktentstehungsprozesses eine untergeordnete Rolle. Daher kann in diesem Kontext die Prozessgestaltung (Arbeitsablaufplanung) mit der Arbeitsplanung gleichgesetzt werden. Die Prozessgestaltung umfasst alle kurz- und mittelfristigen Tätigkeiten zur Gewährleistung einer nachhaltigen, qualitätsorientierten Fertigung und Montage von Produkten (EVERSHEIM 1997, WIENDAHL 2010). Zu den konkreten Aufgaben der Prozessgestaltung zählen u. a. die Prozess-, die Montage- und die Operationsplanung. Basierend auf den Konstruktionsvorgaben werden anforderungsgerechte Technologien ausgewählt, Technologieabfolgen festgelegt und alle für die Herstellung erforderlichen Dokumente, wie beispielsweise Stücklisten und Prüfanweisungen, abgeleitet.

Durch den direkten Einfluss auf die Produktgestaltung und die Produktion trägt die effektive Entwicklung von Technologien sowie deren effizienter Einsatz entscheidend zum Erfolg eines Unternehmens bei (SCHUH & KAMPKER 2011, SCHUH & KLAPPERT 2011). Getrieben von einem exponentiellen Anstieg verfügbarer Technologien, sich verkürzenden Produktlebenszyklen und einer damit einhergehenden beschleunigten Technologiealterung (ABELE & REINHART 2011) gewinnt die Technologieplanung bei der nachhaltigen Ausrichtung produzierender Unternehmen an Bedeutung (EVERSHEIM & SCHUH 1996, SCHUH & KAMPKER 2011). Dabei ist die Technologieplanung meist keine organisatorische Unternehmenseinheit, sondern vielmehr eine ganzheitliche, interdisziplinäre Aufgabe zur Identifikation, Planung, Entwicklung und Optimierung<sup>22</sup> von Technologien (EVERSHEIM & SCHUH 1996). Die Integration in die relevanten Unternehmensbereiche wird durch die Ansätze des Simultaneous Engineering sowie durch verschiedene Methoden der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung erreicht (EVERSHEIM & SCHUH 1996, EVERSHEIM 1997, 1998, SCHUH & KAMPKER 2011).

EVERSHEIM & SCHUH (1996) unterscheiden zwischen der strategischen und der operativen Technologieplanung. Die *strategische Technologieplanung* agiert mit der langfristigen Zielsetzung, die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens durch den Einsatz innovativer, nachhaltiger Technologien zu steigern. Durch die frühzeitige Identifikation, Bewertung und unternehmensspezifische Adaption vielversprechender Technologien werden Produktinnovationen unterstützt und damit Marktanteile gesichert.

Die strategische Technologieausrichtung dient als Handlungsvorgabe für die Tätigkeiten der *operativen Technologieplanung*, welche die kurz- und mittelfristige, produktorientierte Technologiegestaltung zum Ziel hat (EVERSHEIM & SCHUH

---

<sup>22</sup> Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist unter der Optimierung von Technologien bzw. von Technologieketten die Lösung eines multikriteriellen Problems zu verstehen. Dabei wird für die betrachtete Technologie bzw. Technologiekette hinsichtlich der Kriterien Fertigungskosten, Fertigungszeit, Ressourceneinsatz und resultierende Bauteilqualität unter Berücksichtigung der jeweiligen Unternehmenspräferenzen ein Gesamtoptimum angestrebt (vgl. beispielsweise Abbildung 1 im Abschnitt 1.1).

1996). Die Aktivitäten der operativen Technologieplanung werden in vielen Unternehmen von der Abteilung Prozessgestaltung (vgl. Abbildung 11) koordiniert, wodurch sich eine effiziente Verzahnung von Produktentstehungsprozess und operativem Technologieplanungsprozess realisieren lässt. Daraus abgeleitet und in Anlehnung an EVERSHEIM & SCHUH (1996), EVERSHEIM (1996) und EVERSHEIM (1997) fasst Abbildung 11 die phasenabhängigen Aufgaben der Prozessgestaltung entlang des operativen Technologieplanungsprozesses zusammen. Im Rahmen der *Technologieanalyse* werden, basierend auf den Zielvorgaben der Entwicklung, die erforderlichen Bauteileigenschaften spezifiziert, potenzielle Technologiealternativen identifiziert und in Abstimmung mit den Entwicklungsbereichen untersucht. Durch die frühzeitige Analyse der fertigungs- und montagetechnischen Machbarkeit können die Planung und die Konzeption der Produkte aus technologischer Sicht unterstützt und damit zeit- und kostenintensive Änderungen in den späteren Phasen des Produktentwicklungsprozesses vermieden werden.

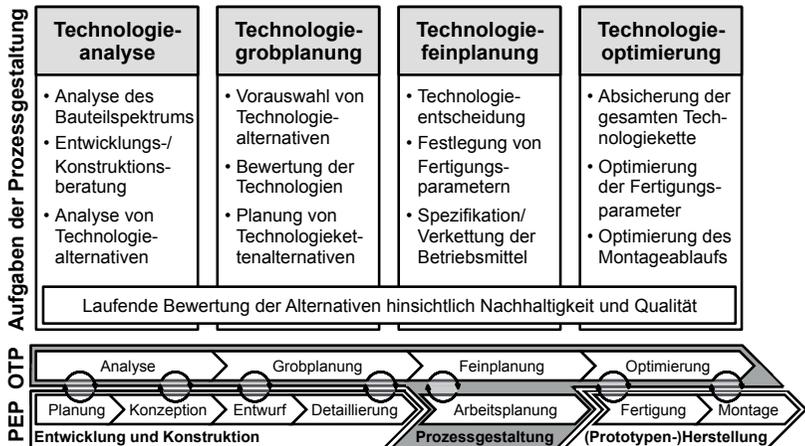


Abbildung 11: Wechselwirkungen zwischen Produktentstehungsprozess (PEP) und operativem Technologieplanungsprozess (OTP) sowie die daraus abgeleiteten phasenabhängigen Aufgaben für die Prozessgestaltung (in Anlehnung an VDI 2221 (1993), EHRENSPIEL (2007), EVERSHEIM & SCHUH (1996) und EVERSHEIM (1996, 1997))

Die *Technologiegrobplanung* befasst sich parallel zur Produktkonstruktion mit der Vorauswahl und der Grobauslegung von Technologiealternativen sowie mit der Planung möglicher Technologieketten. Basierend auf einer ganzheitlichen Bewertung werden in der anschließenden *Technologiefeinplanung* die optimalen Technologien und die finale Technologiekette festgelegt. Die Vorgabe der

zugehörigen Fertigungsparameter erfolgt unter Berücksichtigung der Betriebsmittelspezifikation, z. B. hinsichtlich der verfügbaren Maschinenachsen und der bereitgestellten Spindelleistungen. Zudem werden im Rahmen der Betriebsmittelverkettung die Transport- und die Handhabungseinrichtungen ausgelegt. Damit kann die Technologiefinplanung bezüglich der Zielsetzung mit der Arbeitsplanungsphase des Produktentstehungsprozesses gleichgesetzt werden. Die *Technologieoptimierung* als abschließende Phase des operativen Technologieplanungsprozesses verfolgt die Absicherung der gesamten Technologiekette. Auf Basis der Ergebnisse der (Prototypen-)Herstellung wird eine kontinuierliche Optimierung der Fertigungsparameter, des Montageablaufs und der Betriebsmittelverkettung angestrebt. Zusätzlich zu den erläuterten phasenspezifischen Aufgaben erfolgt entlang des gesamten operativen Technologieplanungsprozesses eine kontinuierliche Bewertung der betrachteten Alternativen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit und der zu erreichenden Bauteilqualitäten.

### 3.3 Anforderungen an das Konzept

Wie in Abschnitt 1.2 erläutert, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Umsetzung einer Methode zur effizienten rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens entlang des operativen Technologieplanungsprozesses. Aufgrund der Vielfältigkeit der Aufgaben der Prozessgestaltung, welche von der Konstruktionsberatung über die Technologiebewertung bis hin zur Optimierung der Fertigungsparameter reichen (vgl. Abbildung 11), können diese nicht durch ein einziges ausgewähltes Simulationsmodell unterstützt werden. Im Rahmen des Konzepts zur rechnergestützten Prozessgestaltung sollen den Anwendern verschiedene phasenspezifische und -gerechte Methoden und Modelle zur Verfügung gestellt werden, welche es erlauben, gleichermaßen effektiv wie effizient, das schleifhärtespezifische Prozessverhalten zu prognostizieren.

Im Hinblick auf die Zielsetzung und unter Einbezug der phasenabhängigen Aufgaben der Prozessgestaltung wurden folgende allgemeine Anforderungen an das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung und den Einsatz der phasengerechten Methoden in der operativen Technologieplanung abgeleitet:

A1 *Phasenadäquatheit*: Die eingesetzten Simulationsmodelle müssen in den einzelnen Phasen der operativen Technologieplanung unterschiedlichste Eigenschaften besitzen, welche sich zu einem überwiegenden Anteil aus den Aufgaben der Prozessgestaltung ableiten lassen. Einerseits müssen in den frühen Phasen, beispielsweise bei der Analyse von Technologiealternativen, in kurzen Iterationszyklen und auf Basis unscharfer Eingangsdaten belastbare Entscheidungen getroffen werden. Andererseits müssen in den späten Phasen die thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte

detailliert abgebildet werden, um beispielsweise eine simulative Absicherung der Technologieketten zu bewerkstelligen. Um diese Herausforderungen im industriellen Umfeld rechnergestützt zu bewältigen, müssen sowohl der erforderliche Aufwand zur Modellierung und Simulation als auch die resultierende Prognosegüte phasenadäquat sein.

- A2 *Durchgängigkeit*: Der Einsatz von verschiedenen Simulationsmodellen entlang des operativen Technologieplanungsprozesses bedingt zu gewissen Zeitpunkten einen Modellwechsel. Dabei können bestehende Erkenntnisse und mittels Kalibrierung erlangte Modelleigenschaften verloren gehen. Deshalb müssen das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung sowie die phasengerechten Methoden und Modelle durchgängig gestaltet sein. Die geforderte Durchgängigkeit soll es u. a. ermöglichen, bekannte oder kalibrierte Modellparameter innerhalb aller eingesetzter Modelle zu nutzen und lokal gewonnene Erkenntnisse auf alle Simulationsmodelle zu übertragen. Dies kann lediglich dann gewährleistet werden, wenn die zugrunde liegenden Systemmodelle und die relevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen über alle eingesetzten Simulationsmodelle hinweg identisch und konsistent sind.
- A3 *Unabhängigkeit*: Alle Simulationsmodelle sollen unabhängig voneinander einsetzbar sein. Werden bei einer Neuplanung sämtliche in Abbildung 11 dargestellten Phasen der operativen Technologieplanung durchlaufen, dann können die Simulationsmodelle durchgängig aufeinander aufbauen (vgl. Anforderung A2). Im Rahmen einer Umplanung, beispielsweise zur Optimierung einer bestehenden Technologieketten, ist lediglich eine Teilmenge der Aufgaben zu bearbeiten. Daher sollen die Simulationsmodelle der späteren Phasen bei gleichbleibender Prognosegüte unabhängig von denen der frühen Phasen eingesetzt werden können.
- A4 *Integrationsfähigkeit*: Das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung ist derart umzusetzen, dass dieses in die existierenden Unternehmensprozesse integriert werden kann. Aufgrund ihrer charakteristischen Ergebnisgrößen können die Simulationsmodelle nicht unmittelbar an die allgemeinen Aufgaben der Prozessgestaltung gekoppelt werden. Daher sind assoziierte Aufgaben abzuleiten, welche den Bezug zu den allgemeinen Aufgaben der Prozessgestaltung herstellen und anhand welcher die Simulationsmodelle entlang des operativen Technologieplanungsprozesses eingeordnet und dort nachhaltig verankert werden können.
- A5 *Anwenderfreundlichkeit*: Zur Steigerung der Akzeptanz seitens der Anwender sind die Eingangsgrößen der Simulationsmodelle auf die innerhalb der Prozessgestaltung bekannten betriebsmittel- und prozessspezifischen

System- und Stellgrößen zu begrenzen. Zudem sind sämtliche Simulationsmodelle auf Basis gängiger kommerzieller Softwareprodukte zu implementieren, wobei der erforderliche Aufwand für die Modellvorbereitung und die Ergebnisauswertung durch einen hohen Automatisierungsgrad gering gehalten werden soll.

A6 *Allgemeingültigkeit*: Zuletzt sollen sowohl das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung als auch die eingesetzten Simulationsmethoden dem Anspruch der Allgemeingültigkeit genügen. Dies bedeutet zum einen, dass das vorgestellte Konzept einen allgemeingültigen Ansatz zur rechnergestützten Gestaltung thermometallurgischer und thermomechanischer Fertigungsprozesse entlang des operativen Technologieplanungsprozesses darstellen soll. Zum anderen sollen die phasengerechten Methoden und Modelle, welche auf Basis von spezifischen schleifhärte-technischen Verfahrensvarianten entwickelt wurden, derart allgemeingültig konzeptioniert sein, dass diese effizient und programmunabhängig auf andere Fertigungsprozesse mit geometrisch unbestimmter Schneide übertragbar sind.

#### 3.4 Simulationskonzept zur Prozessgestaltung

Auf Basis der erläuterten allgemeinen Aufgaben der Prozessgestaltung (vgl. Abschnitt 3.2) und der definierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.3) wurde das in Abbildung 12 dargestellte Simulationskonzept zur Prozessgestaltung entwickelt. Ziel war es dabei, die ausgewählten phasenspezifischen und -gerechten Simulationsmodelle entlang des operativen Technologieplanungsprozesses einzuordnen und damit eine effektive und effiziente rechnergestützte Prozessgestaltung zu ermöglichen. Allerdings können die Simulationsmodelle aufgrund ihrer charakteristischen Ergebnisgrößen nicht direkt anhand der in Abbildung 11 gezeigten allgemeinen Aufgaben der Prozessgestaltung verankert werden (vgl. Abschnitt 3.3). Beispielsweise kann das Ergebnis einer thermomechanischen Simulation, wie z. B. der aus einem Fertigungsprozess resultierende Werkstückverzug, lediglich indirekt dabei unterstützen, im Rahmen der Technologiefeinplanung eine Entscheidung zu treffen oder Fertigungsparameter festzulegen. Daher wurden, basierend auf den allgemeinen Aufgaben, zunächst den Simulationseinsatz repräsentierende, assoziierte Aufgaben abgeleitet und in das Simulationskonzept integriert (vgl. Anforderung A4). Dabei zeichnen sich die assoziierten Aufgaben dadurch aus, dass diese unmittelbar mithilfe der Simulationsmodelle bearbeitet werden können und deren aufbereitete Ergebnisse die Grundlage für die allgemeinen Analyse-, Planungs- und Optimierungsaufgaben im Rahmen der operativen Technologieplanung bilden. Im Folgenden werden die assoziierten Aufgaben, deren Herleitung und deren phasenspezifische Einordnung erläutert. Darauf aufbauend werden die erforderlichen Eigenschaften der phasengerechten

Simulationsansätze spezifiziert, geeignete Simulationsmodelle definiert und diese anschließend an die assoziierten Aufgaben gekoppelt.

Im Rahmen der Technologieanalyse werden auf Basis von definierten Bauteileigenschaften geeignete Technologien identifiziert. Dabei bietet der Einsatz von rechnergestützten *Machbarkeitsstudien* die Möglichkeit, das grundlegende Prozessverhalten abzuschätzen. Bei der anschließenden Technologiegroßplanung werden die Technologien simulativ mithilfe einer *Prozessfensteridentifikation* und einer *Vorauslegung der thermometallurgischen Randzonenbeeinflussung* bewertet und ungeeignete Alternativen frühzeitig aus den Betrachtungen ausgeschlossen. Dabei fließen durch die *Vorauslegung der mechanischen Werkstückbeeinflussung* neben den thermometallurgischen auch die mechanischen Prozessauswirkungen in die Beurteilung ein. Die Resultate der assoziierten Aufgaben *Feinauslegung der thermometallurgischen Randzonenbeeinflussung* und *Feinauslegung der thermomechanischen Werkstückbeeinflussung* ermöglichen eine finale Technologieentscheidung sowie eine Spezifikation der Fertigungsparameter und unterstützen damit u. a. die Technologiefinplanung. Die abschließende *Absicherung und Optimierung* der Fertigungsparameter sowie der gesamten Technologiekette erfolgt dabei ebenfalls mithilfe von phasengerechten Simulationsmodellen. Damit werden die grundlegenden Aufgaben der Prozessgestaltung über alle Phasen der operativen Technologieplanung hinweg durch die definierten assoziierten Aufgaben repräsentiert.

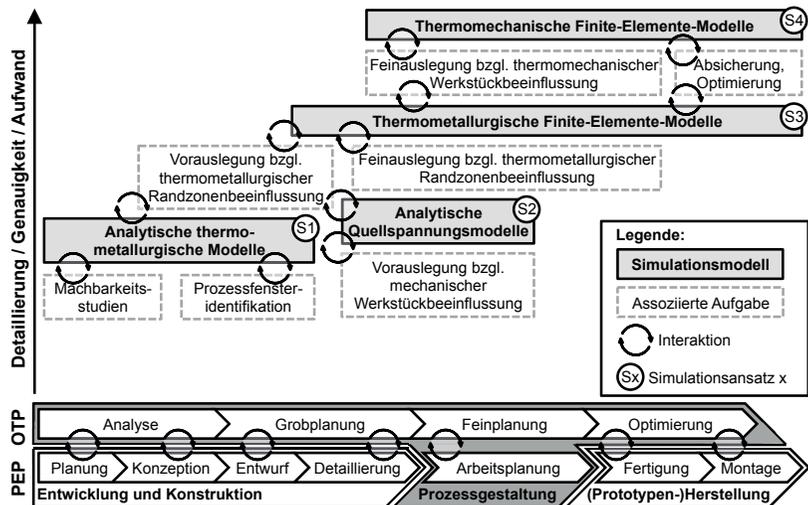


Abbildung 12: Konzept des phasenspezifischen und -gerechten Simulationseinsatzes zur Prozessgestaltung entlang des operativen Technologieplanungsprozesses

Die anschließende Auswahl der Simulationsmodelle und deren Einordnung in den operativen Technologieplanungsprozess orientieren sich an den assoziierten Aufgaben. Gemäß Anforderung A1 kann ein effektiver und effizienter Simulationseinsatz im Rahmen der Prozessgestaltung lediglich dann bewerkstelligt werden, wenn der Detaillierungsgrad der Modelle, die Genauigkeit der Simulationsergebnisse sowie der für die Modellierung und die Simulation erforderliche Aufwand phasenadäquat sind. Die phasenspezifischen Eigenschaften der Simulationsmodelle lassen sich dabei auf Basis der assoziierten Aufgaben ableiten. Beispielsweise sind in den frühen Phasen der operativen Technologieplanung Simulationsmodelle erforderlich, welche sich durch einen geringen Aufwand zur Modellierung und Simulation und somit kurze Iterationszyklen auszeichnen. Dies lässt sich u. a. damit begründen, dass zur Durchführung von Machbarkeitsstudien oder zur Prozessfensteridentifikation eine Vielzahl von Parametervariationen und damit Simulationsläufe durchgeführt werden müssen. Daher kommen in den frühen Phasen der operativen Technologieplanung *analytische thermometallurgische Modelle* (S1) und *analytische Quellspannungsmodelle* (S2) zum Einsatz. Diese zeichnen sich insbesondere durch kurze Rechenzeiten zur Lösung der zugrunde liegenden analytischen Prozessbeschreibung aus.

In den späten Phasen der operativen Technologieplanung müssen die eingesetzten Simulationsmodelle eine hohe Prognosegüte gewährleisten, um beispielsweise eine belastbare simulative Auslegung, Absicherung und Optimierung der Fertigungsparameter zu ermöglichen (vgl. Anforderung A1). Dazu ist es notwendig, die nichtlinearen thermometallurgischen und thermomechanischen Prozessphänomene, wie z. B. das temperatur- und phasenabhängige Materialverhalten, detailliert abzubilden. Daher werden die assoziierten Aufgaben im Rahmen der Technologiefeinplanung und der Technologieoptimierung mithilfe von FE-basierten Modellansätzen bearbeitet. Der damit verbundene hohe Rechenaufwand zur numerischen Lösung der Differentialgleichungen, welche die zahlreichen nichtlinearen Prozessphänomene beschreiben, wird aufgrund der resultierenden hohen Prognosegüte der Simulationsergebnisse in Kauf genommen. Im Kontext der Neuplanung einer Prozesskette sollen die phasenspezifischen *thermometallurgischen* (S3) und *thermomechanischen Finite-Elemente-Modelle* (S4) auf den Erkenntnissen und Modellparametern der analytischen Simulationsmodelle aufbauen können. Diese Durchgängigkeit ist gemäß Anforderung A2 durch eine modellübergreifende Nutzung der zugrunde liegenden Systemmodelle (vgl. Kapitel 4) zu bewerkstelligen. Allerdings können die FE-basierten Simulationsmodelle aufgrund der umfassenden Abbildung der Prozessphänomene auch unabhängig von den analytischen Modellen eingesetzt werden (vgl. Anforderung A3). Dies ist insbesondere dann erforderlich, wenn im Rahmen einer Umplanung lediglich die späten Phasen der operativen Tech-

nologieplanung von Bedeutung sind oder wenn nicht auf bestehende analytische Ansätze zurückgegriffen werden kann.

### 3.5 Fazit

Sowohl für die Analytik als auch für die FEM existiert eine Vielzahl von kommerziellen und bereits im industriellen Umfeld eingesetzten Softwareprodukten. Diese bilden die Grundlage für eine anwenderfreundliche Modellimplementierung sowie eine Automatisierung der Modellvorbereitung und der Ergebnisauswertung (vgl. Anforderung A5). Des Weiteren sind die entlang des operativen Technologieplanungsprozesses eingeordneten assoziierten Aufgaben sowie die daraus abgeleiteten analytischen und FE-basierten Simulationsmodelle generisch und damit verfahrensunabhängig definiert. Dadurch stellt das präsentierte Konzept eine allgemeingültige Methode zur rechnergestützten Gestaltung von thermometallurgischen und thermomechanischen Fertigungsprozessen dar (vgl. Anforderung A6). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das in diesem Kapitel beschriebene allgemeine Simulationskonzept zur Prozessgestaltung des Schleifhärtens herangezogen. Dazu wird im folgenden Kapitel 4 zunächst das formale Systemmodell des Schleifhärtens erläutert. Anschließend werden in Kapitel 5 die umgesetzten phasenspezifischen und -gerechten Modelle zur Simulation des Schleifhärteprozesses anhand der Zusammenfassungen der in die Arbeit eingebundenen Publikationen (P1) bis (P7) vorgestellt.



## 4 Systemmodell des Schleifhärteprozesses

### 4.1 Allgemeines

In Anlehnung an das in Abschnitt 1.2 definierte methodische Vorgehen und als Basis für die Umsetzung der phasengerechten Simulationsmodelle (vgl. Kapitel 5) beschreibt dieses Kapitel das im Rahmen der Modellbildung gewonnene formale Systemmodell des Schleifhärtens<sup>23</sup>. Dieses das reale Systemverhalten abbildende Systemmodell besteht aus Systemelementen, welche die prozessspezifischen Wirkmechanismen repräsentieren und über Relationen verknüpft sind. Durch die vorliegende werkstückbezogene Betrachtung des Schleifhärteprozesses (vgl. Abschnitt 1.2 und Abschnitt 2.3.1) wird die System- bzw. Modellgrenze durch die Werkstückoberfläche festgelegt. Sämtliche Einflüsse der Prozesskomponenten außerhalb dieser Begrenzung gehen über Ersatzmodelle oder in Form von Eingangsgrößen in das Systemmodell ein. Im Hinblick auf die Anwenderfreundlichkeit der Modelle (vgl. Anforderung A5 im Abschnitt 3.3) werden als Eingangsgrößen lediglich bekannte betriebsmittel- und prozessspezifische System- und Stellgrößen herangezogen. Die seitens der operativen Technologieplanung vorgegebenen Zielgrößen und die resultierenden Ergebnisgrößen des Schleifhärteprozesses bilden die Ausgangsgrößen des Systemmodells. Damit verknüpft das formale Systemmodell über die gekoppelten Systemelemente die System- und Stellgrößen mit den Ziel- und Ergebnisgrößen. Im Hinblick auf eine hinreichend genaue Abbildung des Schleifhärteprozesses ist die Güte des Systemmodells somit abhängig von der Analyse und der Vereinfachung des realen Systems, der Wahl der Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie der Beschreibung und Kopplung der Systemelemente bzw. Wirkmechanismen. Ein weiteres Kriterium für die Spezifikation der Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie der Systemelemente ergibt sich aus dem Verwendungszweck des formalen Systemmodells. Dieses Systemmodell dient als Grundlage für die Implementierung der phasenspezifischen Simulationsmodelle (vgl. Kapitel 5). Diesbezüglich wurden zunächst die in diesem Kapitel definierten Systemelemente implementiert, wodurch auf dem Rechner ausführbare Teilmodelle entstanden. Basierend auf diesen Teilmodellen wurden die Simulationsmodelle aufgebaut, wobei die Wirkzusammenhänge des formalen Systemmodells zugrunde gelegt wurden.

Im Folgenden werden zunächst die für das Systemmodell relevanten System- und Stellgrößen sowie die Ziel- und Ergebnisgrößen definiert (vgl. Abschnitt 4.2). Darauf aufbauend werden das formale Systemmodell des Schleifhärtens sowie

---

<sup>23</sup> Eine allgemeine Systemdefinition und das generische Vorgehen bei der Modellbildung im Rahmen einer Simulationsstudie erläutert SAUERBIER (1999).

die gekoppelten prozessspezifischen Systemelemente und die in diesen enthaltenen Wirkmechanismen prinzipiell erläutert (vgl. Abschnitt 4.3). Eine detaillierte Beschreibung der auf Basis der Systemelemente implementierten Teilmodelle kann den in diese Arbeit eingebundenen Publikationen (P1) bis (P7) entnommen werden, wobei die Umsetzung der prozessspezifischen Wirkmechanismen in den einzelnen Publikationen aufgezeigt wird. Abschließend erfolgt eine Bewertung des entwickelten formalen Systemmodells (vgl. Abschnitt 4.4).

## 4.2 Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systemmodells

### 4.2.1 System- und Stellgrößen

Wie bereits oben erwähnt, stellen die betriebsmittel- und prozessspezifischen System- und Stellgrößen die Eingangsgrößen des formalen Systemmodells dar. BRINKSMEIER & BROCKHOFF (1994), KLOCKE & KÖNIG (2005) und DENKENA & TÖNSHOFF (2011) fassten die Kenngrößen von Schleifprozessen zusammen und geben damit u. a. einen umfangreichen Überblick über die wesentlichen System- und Stellgrößen<sup>24</sup>. STÖHR (2008) leitete daraus die für den Schleifhärteprozess relevanten System- und Stellgrößen ab, welche in Abbildung 13 gezeigt werden. Dabei umfassen die *Systemgrößen* alle physischen Prozesskomponenten, wie den Kühlschmierstoff, die Schleifscheibe, die Werkzeugmaschine und das zu bearbeitende Werkstück, mit ihren physikalischen Eigenschaften. Bei den *Stellgrößen* handelt es sich um die in gewissen Grenzen frei wählbaren Fertigungsparameter Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , Zustellung  $a_e$ , Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$  und Kühlschmierstoff-Volumenstrom. Diese Stellgrößen gehen direkt als Eingangsgrößen in das Systemmodell ein.

Im Hinblick auf die werkstückbezogene Modellierung und Simulation der thermometallurgischen und thermomechanischen Phänomene des Schleifhärteprozesses ist es nicht erforderlich und damit nicht zielführend, sämtliche Systemgrößen vollständig als Eingangsgrößen abzubilden. Daher wurden die in Abbildung 13 zusammengefassten Kenngrößen gemäß ihrer Berücksichtigung bei der systematischen Modellbildung kategorisiert<sup>25</sup>. Das dreidimensionale *Werkstück* wird mit allen Materialeigenschaften und inklusive etwaiger metallurgischer und mechanischer Vorbelastungen vollständig modelliert. Die Integration der Prozesswirkung des *Kühlschmierstoffs* in Verbindung mit dem eingestellten

---

<sup>24</sup> Darüber hinaus veranschaulichen BRINKSMEIER & BROCKHOFF (1994), KLOCKE & KÖNIG (2005) und DENKENA & TÖNSHOFF (2011) den Zusammenhang zwischen den schleifspezifischen System- und Stellgrößen sowie den Ergebnisgrößen, wobei dieser über die Prozessgrößen, wie z. B. die thermomechanischen Trennmechanismen, hergestellt wird. Eine durchgängige, systematische Modellbildung und ein daraus abgeleitetes formales Systemmodell wird dabei nicht bereitgestellt.

<sup>25</sup> Das Ergebnis der Kategorisierung erschließt sich aus dem hier dargelegten Überblick und den detaillierten Ausführungen zu den Systemelementen im folgenden Abschnitt 4.3.

Kühlschmierstoff-Volumenstrom wird mithilfe eines Ersatzmodells realisiert, welches die Wärmeabfuhr über den Kühlschmierstoff ausreichend genau repräsentiert. Dabei ist in guter Näherung lediglich die Art des eingesetzten Kühlschmierstoffs, d. h. ob es sich um eine Emulsion oder ein Öl handelt, und dessen prinzipielle Zuführung entscheidend. Die exakte Spezifikation des Kühlschmierstoffs und der Kühlschmierstoffdüse ist für das Systemmodell nicht relevant. Die *Schleifscheibe* wird auf der makroskopischen Ebene berücksichtigt, wobei insbesondere deren Abmessungen zur Bestimmung der geometrischen Eingriffsverhältnisse in der Kontaktzone erforderlich sind. Die prozessspezifischen Eigenschaften der *Werkzeugmaschine* können bei der werkstückbezogenen Prozesssimulation des Schleifhärtens vernachlässigt werden. Lediglich die mechanische Schnittstelle zwischen Werkstück und Werkzeugmaschine wird über die Modellierung der Einspannung abgebildet. Eine umfassende Erläuterung der konkreten Eingangsgrößen sowie der eingesetzten Ersatzmodelle folgt in Abschnitt 4.3.

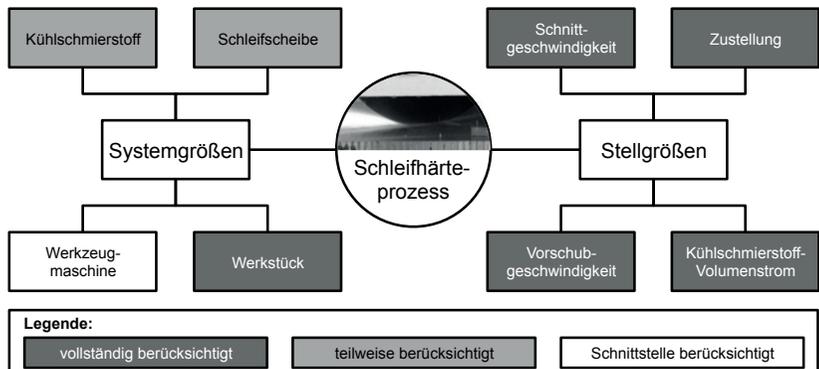


Abbildung 13: System- und Stellgrößen beim Schleifhärteprozess (in Anlehnung an STÖHR (2008)) sowie deren Kategorisierung hinsichtlich ihrer Berücksichtigung bei der systematischen Modellbildung

#### 4.2.2 Ziel- und Ergebnisgrößen

Die Ziel- und Ergebnisgrößen stellen die Ausgangsgrößen des formalen Systemmodells dar (vgl. Abschnitt 4.1). Dabei können die Ziel- und Ergebnisgrößen hinsichtlich ihres Inhalts prinzipiell gleichgesetzt werden. Die technologischen *Zielgrößen* spiegeln das Resultat des Produktentstehungsprozesses und der operativen Technologieplanung wider. Im Rahmen des Produktentstehungsprozesses (vgl. Abbildung 11) werden zunächst für jedes Bauteil die Eigenschaften, wie z. B. die minimale Härte und die maximale Rauheit der Oberfläche, spezifiziert, welche zur Erfüllung der Bauteilfunktionen erforderlich sind. Anschließend

wird durch die operative Technologieplanung eine Fertigungsprozesskette festgelegt, welche in Summe die Herstellung des Bauteils mit den geforderten funktionalen Merkmalen ermöglicht. Dabei werden für jedes Fertigungsverfahren der Prozesskette die technologischen Zielgrößen festgelegt, welche i. d. R. Mindestanforderungen, wie z. B. minimale Einhärtetiefe, bzw. maximal zulässige Abweichungen vom Idealzustand darstellen. Demgegenüber stehen die rechnergestützt oder experimentell ermittelten Resultate der technologischen Werkstückbearbeitung. Diese werden durch konkrete Zahlenwerte repräsentiert und in diesem Zusammenhang als *Ergebnisgrößen* bezeichnet.

BRINKSMEIER & BROCKHOFF (1994) nennen als werkstückbezogene Ergebnisgrößen beim Schleifen die Gefügebeeinflussung und die damit verbundenen Härteänderungen, den sich einstellenden Eigenspannungszustand, welcher zu Rissbildung und Verzug führen kann, sowie die resultierende Oberflächenrauheit. Im Hinblick auf die für den Schleifhärteprozess relevanten Ziel- und Ergebnisgrößen kann die Rissbildung vernachlässigt werden. Dies lässt sich durch die nach dem Schleifhärten in der Werkstückrandschicht vorherrschenden Druckeigenspannungen begründen, welche einer Rissbildung entgegenwirken (vgl. Abschnitt 2.2.3). Des Weiteren wird die sich einstellende Oberflächenrauheit in den folgenden Ausführungen aufgrund der in Abschnitt 2.3.1 dargestellten Fokussierung auf die makroskopischen Modellansätze und der meist folgenden Schlichtprozesse nicht weiter betrachtet. Damit und bezüglich der in der vorliegenden Arbeit angestrebten Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens sind, neben der *bearbeiteten Werkstückgeometrie*, insbesondere die sich einstellenden *Eigenspannungen* und der daraus resultierende *Werkstückverzug* sowie die *dreidimensionale Gefüge- und Härteverteilung* als Ziel- und Ergebnisgrößen ausschlaggebend (vgl. Abbildung 14 unten).

### 4.3 Formales Systemmodell

#### 4.3.1 Systemelementbasierte Kopplung der Wirkmechanismen

Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, werden die System- und Stellgrößen über das formale Systemmodell des Schleifhärteprozesses mit den Ziel- und Ergebnisgrößen in Verbindung gebracht. Dabei beschreiben die im Systemmodell enthaltenen und entsprechend Abbildung 14 gekoppelten Systemelemente die schleifhärtespezifischen thermometallurgischen und thermomechanischen Prozessmechanismen.

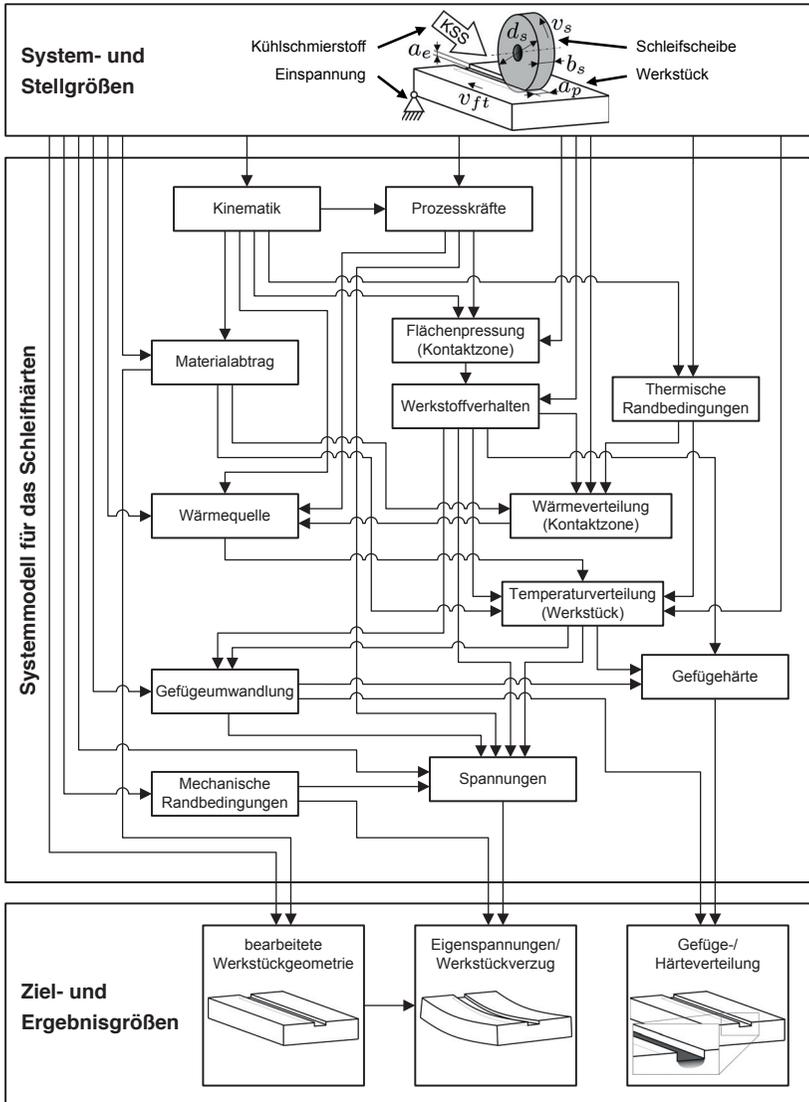


Abbildung 14: Generisches Systemmodell für das Schleifhärten inklusive der gekoppelten prozessspezifischen Wirkmechanismen (Systemelemente) zur Verknüpfung der System- und Stellgrößen (Eingangsrößen) mit den Ziel- und Ergebnisgrößen (Ausgangsgrößen), wobei die Kopplungen zwischen den Systemelementen durch Pfeile repräsentiert werden

Die Kopplung der Systemelemente erfolgte bewusst unidirektional. Der dadurch entstehende eindeutige Lösungspfad vereinfacht die Beschreibung der einzelnen Wirkmechanismen sowie die anschließende Implementierung der Simulationsmodelle und deren numerische Berechnung (vgl. Kapitel 5). Die zur numerischen Lösung erforderlichen Iterationsschleifen wurden bei der Darstellung des formalen Systemmodells nicht berücksichtigt, da diese stark vom jeweiligen Simulationsansatz abhängig und damit nicht allgemeingültig sind. Die Elemente des formalen Systemmodells und deren Kopplung untereinander werden im folgenden Abschnitt 4.3.2 beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf der Erläuterung der allgemeinen Ansätze und Wirkzusammenhänge liegt. Deren Umsetzung in simulationsgerechte Teilmodelle kann den in die Arbeit integrierten Publikationen (P1) bis (P7) entnommen werden. Diesbezüglich verdeutlicht Tabelle 1 die Zuordnung der implementierten Systemelemente bzw. Teilmodelle zu den Publikationen.

Tabelle 1: Umsetzung der Wirkmechanismen in den Publikationen

Systemelement (Teilmodell)	Publikationen						
	(P1)	(P2)	(P3)	(P4)	(P5)	(P6)	(P7)
Kinematik	○	○	○	○	○	○	○
Prozesskräfte	●	●	◐	◐	◐	◐	◐
Flächenpressung (Kontaktzone)	○	○	○	○	○	○	○
Materialabtrag	○	●	●	○	○	●	●
Werkstoffverhalten	◐	●	●	●	◐	◐	●
Thermische Randbedingungen	●	◐	●	◐	◐	◐	◐
Wärmeverteilung (Kontaktzone)	●	●	●	◐	◐	◐	◐
Wärmequelle	●	◐	●	◐	◐	●	◐
Temperaturverteilung (Werkstück)	●	●	●	◐	◐	●	◐
Gefügeumwandlung	●	●	●	◐	◐	◐	◐
Gefügehärte	●	◐	●	◐	◐	◐	●
Mechanische Randbedingungen	●	–	–	●	●	–	–
Spannungen	◐	–	–	●	●	–	–

- Wirkmechanismus nicht Gegenstand der Publikation
- Wirkmechanismus vereinfacht modelliert bzw. indirekt berücksichtigt
- ◐ Wirkmechanismus vollständig modelliert und kein Publikationsschwerpunkt
- Wirkmechanismus vollständig modelliert und Publikationsschwerpunkt

### 4.3.2 Systemelementbasierte Beschreibung der Wirkmechanismen

**Kinematik.** Im Rahmen der werkstückbezogenen Modellierung des Schleifhärtens wird die Prozesskinematik lediglich vereinfacht berücksichtigt<sup>26</sup> (vgl. Tabelle 1). Dabei werden, basierend auf den makroskopischen Abmessungen des Werkstücks und der Schleifscheibe sowie den Stellgrößen, die geometrischen Eingriffsverhältnisse in der Kontaktzone ermittelt (vgl. Abschnitt 2.2.1), wobei insbesondere die Eingriffsbreite  $a_p$ , die geometrische Kontaktlänge  $l_g$ , die Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück, der äquivalente Schleifscheibendurchmesser  $d_{eq}$  und der Verlauf des Kontaktbogens als Eingangsparameter für die nachfolgenden Systemelemente relevant sind.

**Prozesskräfte.** Die Prozesskräfte stellen für das Systemmodell entscheidende Größen dar, da diese, neben ihrer Auswirkung auf die Spannungsverteilung in der Randschicht (vgl. Abschnitt 2.2.3), u. a. die Grundlage zur Berechnung des in die Kontaktzone eingebrachten Wärmestroms  $\dot{Q}_{total}$  bilden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Damit beeinflussen die Prozesskräfte indirekt sämtliche thermometallurgischen und thermomechanischen Randzoneneffekte beim Schleifhärten. Im Hinblick auf die unidirektionale Kopplung der Systemelemente erfolgt die Berechnung der tangentialen und normalen Prozesskräfte ( $F_t$  und  $F_n$ ) rein auf Basis der Stellgrößen und des äquivalenten Schleifscheibendurchmessers  $d_{eq}$ . Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 angedeutet, kommen diesbezüglich im Rahmen der vorliegenden Arbeit Regressionsmodelle<sup>27</sup> zum Einsatz. Deren Herleitung und Anpassung anhand von experimentell ermittelten Daten sowie deren Evaluierung sind in der Publikation (P2) detailliert erläutert.

**Flächenpressung in der Kontaktzone.** Die Flächenpressung in der Kontaktzone wird bei der systematischen Modellierung und der anschließenden Implementierung lediglich vereinfacht abgebildet (vgl. Tabelle 1). Dies lässt sich analog zur Prozesskinematik durch die makroskopische, werkstückbezogene Betrachtung des Schleifhärteprozesses begründen. Basierend auf der während des Schleifhärtens auftretenden normalen Prozesskraft  $F_n$ , der Kontaktfläche und der Berechnung der sich im Eingriff befindlichen Schneidenzahl können die lokalen und globalen Flächenpressungen in der Kontaktzone und damit die Druckspannungen in der Werkstückrandschicht, welche das thermometallurgische Werkstoffverhalten beeinflussen, abgeschätzt werden (HEINZEL 1999, KLOCKE & KÖNIG 2005, NIEMANN ET AL. 2005, MALKIN & GUO 2007, WITTMANN 2007, HEINZEL 2009, DENKENA & TÖNSHOFF 2011).

<sup>26</sup> Im Hinblick auf die Ausführungen in Abschnitt 2.3.1 werden dabei die mikroskopischen Spanbildungsmechanismen an den einzelnen Körnern der Schleifscheibe vernachlässigt.

<sup>27</sup> Einen Überblick über weitere Modellansätze zur Berechnung der Kräfte bei Schleifprozessen geben u. a. BRINKSMEIER ET AL. (2006) und HEINZEL (2009).

**Materialabtrag.** Aus geometrischer Sicht stellt der Materialabtrag über die kinematischen Eingriffsverhältnisse und die prozessspezifischen Stellgrößen, wie z. B. die tangentiale Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$ , das Bindeglied zwischen dem unbearbeiteten und dem bearbeiteten Werkstück dar. Des Weiteren hat der Abtransport der heißen Späne aus der Kontaktzone, welcher u. a. über das Zeitspanvolumen  $Q_w$  repräsentiert wird, einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeverteilung beim Schleifhärten (vgl. Abschnitt 2.2.2) und damit auf das sich im Werkstück einstellende transiente Temperaturfeld. Daher sind insbesondere die thermischen Effekte des Materialabtrags bei der Modellierung des Schleifhärteprozesses zu berücksichtigen.

**Werkstoffverhalten.** Die Auswirkungen des thermomechanischen Belastungskollektivs beim Schleifhärten auf die Beeinflussung der Werkstückrandschicht sind u. a. abhängig von den thermischen, metallurgischen und mechanischen Eigenschaften des eingesetzten Werkstoffs. Die Werkstoffeigenschaften können mithilfe von temperatur- und phasenabhängigen Kennzahlen, wie z. B. der Dichte  $\rho$ , der Wärmeleitfähigkeit  $k$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c$ , dem Elastizitätsmodul  $E$ , dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  und der Querkontraktionszahl  $\mu$ , bzw. Diagrammen, wie z. B. Spannungs-Dehnungs-Kurven, dargestellt werden (HAASEN 1994, ACHT ET AL. 2008a, b, HORNBOGEN ET AL. 2008, WEISSBACH 2010). Die werkstoffspezifischen Effekte der Gefügeumwandlung werden i. d. R. über Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-(ZTA)- und Zeit-Temperatur-Umwandlungs-(ZTU)-Schaubilder beschrieben (WEVER ET AL. 1961, ORLICH ET AL. 1973, LÄPPLE 2003). Für den Simulationseinsatz werden diese Kennzahlen, Diagramme und Schaubilder in Form von Parametersätzen aufbereitet und in einem Werkstoffmodell hinterlegt. Dieses bildet die Grundlage für die nachfolgenden Systemelemente und damit für die Berechnung sämtlicher thermometallurgischer und thermomechanischer Effekte beim Schleifhärten.

Die temperatur- und phasenabhängige Modellierung des Werkstoffverhaltens ist für die Simulation von gängigen thermometallurgischen Fertigungsverfahren, wie z. B. Laserstrahlschweißen oder Induktionshärten, ausreichend und zielführend (ROEREN 2007, SCHWENK 2007, PAPADAKIS 2008). Aufgrund der im Bereich der Kontaktzone innerhalb der Randschicht wirkenden mechanischen Belastung (vgl. Abschnitt 2.2.3) muss bei der Simulation des Schleifhärtens zusätzlich die Druckspannungsabhängigkeit des Werkstoffverhaltens modelliert werden. Dabei führt insbesondere die Umsetzung eines druckspannungsabhängigen Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-(ZTA)-Schaubilds zu einer qualitativen und quantitativen Verbesserung der Simulationsergebnisse (vgl. Publikation (P2)).

**Thermische Randbedingungen.** Zur Berechnung der Wärmeverteilung in der Kontaktzone sowie der Temperaturverteilung im Werkstück müssen sämtliche thermischen Effekte an der Werkstückoberfläche berücksichtigt werden. Beim Schleifhärten bewirken die gegenüber der Umgebung hohen Temperaturen in der Werkstückrandschicht eine Wärmeabfuhr durch Strahlung und Konvektion. Des Weiteren unterstützt der Einsatz von Kühlschmierstoffen den konvektiven Wärmeübergang an der Werkstückoberfläche. Da aufgrund des werkstückbezogenen Modellierungsansatzes die Umgebung und der Kühlschmierstoff nicht abgebildet werden, werden die Wirkung der Strahlung und der Konvektion mithilfe von Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  als thermische Randbedingungen des Modells umgesetzt (vgl. Abschnitt 2.3). Diese die Strahlung und die Konvektion beschreibenden Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  können, basierend auf den allgemeinen Zusammenhängen der Wärmeübertragung, den kinematischen Eingriffsverhältnissen in der Kontaktzone und der Spezifikation des Kühlschmierstoffeinsatzes, hergeleitet werden (LAVINE 1988, LAVINE & JEN 1991a, b, WITTMANN 2007, JIN & STEPHENSON 2008, HEINZEL 2009, BAEHR & STEPHAN 2010).

**Wärmeverteilung in der Kontaktzone.** Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, verteilt sich der gesamte in der Kontaktzone entstehende Wärmestrom  $\dot{Q}_{total}$  auf Wärmeströme, welche in das Werkstück  $\dot{Q}_w$ , die Schleifscheibe  $\dot{Q}_s$ , den Kühlschmierstoff  $\dot{Q}_f$ , die Späne  $\dot{Q}_{ch}$  und die Umgebung  $\dot{Q}_\infty$  fließen. Aufgrund der werkstückbezogenen Modellierung des Schleifhärteprozesses werden lediglich der Wärmestrom in das Werkstück  $\dot{Q}_w$  und über den Materialabtrag der Wärmestrom in die Späne  $\dot{Q}_{ch}$  direkt abgebildet. Die Wärmeströme in den Kühlschmierstoff  $\dot{Q}_f$  und die Umgebung  $\dot{Q}_\infty$  werden, wie oben erläutert, über Ersatzmodelle als thermische Randbedingungen des Modells berücksichtigt. Der Wärmestromanteil, welcher über die Schleifscheibe  $\dot{Q}_s$  abgeführt wird, lässt sich abhängig von den System- und Stellgrößen, insbesondere der Schleifscheibenspezifikation, und basierend auf den übrigen Wärmeströmen abschätzen<sup>28</sup>.

**Wärmequelle.** In Anlehnung an die Ausführungen in Abschnitt 2.3 und in Publikation (P1) erfolgt die Wärmeeinbringung in das Modell mithilfe einer Wärmequelle mit einer dreiecksförmigen Wärmestromdichteverteilung, welche die maximale Wärmestromdichte am Ende der Kontaktzone erreicht. Die Wärmestromdichteverteilung quer zur Vorschubrichtung wird, basierend auf den

<sup>28</sup> Ansätze und Methoden zur Beschreibung und Berechnung der Wärmeströme sowie der daraus resultierenden Wärmeverteilung in der Kontaktzone wurden von LOWIN (1980), LAVINE & JEN (1991a, b), BRINKSMIEIER & BROCKHOFF (1994), GUO & MALKIN (1995), KIM ET AL. (1997), GUO ET AL. (1999), ROWE (2001), JIN & STEPHENSON (2003, 2006) und WILKE (2008) publiziert.

Erkenntnissen von NOYEN (2008), als konstant angenommen. Die geometrischen Abmessungen der Grundfläche der Wärmequelle ergeben sich aus den kinematischen Eingriffsverhältnissen zwischen Schleifscheibe und Werkstück. Die eingesetzte Wärmequelle beaufschlagt die Kontaktzone mit dem gesamten in der Kontaktzone umgesetzten Wärmestrom  $\dot{Q}_{total}$  (vgl. Abschnitt 2.2.2) abzüglich des Wärmestroms in die Schleifscheibe  $\dot{Q}_s$ , wodurch der in die Schleifscheibe abfließende Wärmeanteil innerhalb des werkstückbezogenen Modells indirekt abgebildet wird.

**Temperaturverteilung im Werkstück.** Die wärmequellenbasierte Energieeinbringung entlang der Schleifbahn sowie die Berücksichtigung des Materialabtrags und der thermischen Randbedingungen bilden die Grundlage für die Bestimmung der Temperaturverteilung im Werkstück. Die transienten Temperaturfelder werden mithilfe der allgemeinen Theorien der Wärmeleitung in Festkörpern<sup>29</sup> und basierend auf den modellierten thermischen Quellen und Senken ermittelt. Abhängig vom gewählten Berechnungsansatz können dabei die temperatur-, phasen- und druckspannungsabhängigen Werkstoffeigenschaften, wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit  $k$  und die spezifische Wärmekapazität  $c$ , und etwaige metallurgische Vorbelastungen berücksichtigt werden.

**Gefügeumwandlung.** Basierend auf der transienten Temperaturverteilung, dem metallurgischen Ausgangszustand des Werkstücks sowie dem temperatur-, phasen- und druckspannungsabhängigen Werkstoffverhalten können die Gefügeumwandlungen während des Schleifhärtens berechnet werden, wobei auf bestehende Modelle zurückgegriffen wird. Aufgrund der hohen Temperaturgradienten, welche während der Aufheizphase innerhalb der Werkstückrandschicht auftreten, wird die stattfindende Austenitisierung des Werkstoffs anhand der Methode von LEBLOND & DEVAUX (1984) abgebildet. Zur Modellierung der thermometallurgischen Vorgänge während der anschließenden Abkühlphase kommen zwei unterschiedliche Ansätze zur Anwendung. Die diffusionsgesteuerten Umwandlungsphänomene, wie z. B. die Ferrit- oder Perlitbildung, werden mithilfe der Johnson-Mehl-Avrami-Gleichung (JOHNSON & MEHL 1939, AVRAMI 1939, 1940, 1941) beschrieben, wohingegen die Umsetzung der diffusionslosen martensitischen Gefügeumwandlung basierend auf dem Modell nach KOISTINEN & MARBURGER (1959) erfolgt. Die kombinierte und an die Bedingungen beim Schleifhärten angepasste Verwendung der bestehenden Ansätze ermöglicht die modellgestützte Berechnung der prozessspezifischen Gefügebeeinflussung sowie der im Anschluss an die Abkühlung vorliegenden Gefügeverteilung innerhalb des Werkstücks.

---

<sup>29</sup> Die Grundlagen der Wärmeübertragung können der Standardliteratur entnommen werden (u. a. VON BÖCKH (2006), GNIELINSKI ET AL. (2006) und BAEHR & STEPHAN (2010)).

**Gefügehärt.** Die resultierende Gefügeverteilung bildet die Grundlage zur Bestimmung der Gefügehärt mitsamt ihrem Verlauf im Werkstück. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt die Berechnung der Gefügehärt anhand etablierter Methoden (BLONDEAU ET AL. 1973, LESLIE 1981), welche, neben der Gefügeverteilung, die für die Umwandlung relevanten Temperaturgradienten während der Abkühlung und die werkstoffspezifische Legierungszusammensetzung berücksichtigen. Die Auswahl des geeignetsten Ansatzes orientierte sich in erster Linie am Kohlenstoffgehalt des Werkstoffs. Werden Werkstoffe mit geringen Kohlenstoffanteilen, wie beispielsweise der untereutektoide Stahl Ck45, modelliert, kommt i. d. R. die Methode nach BLONDEAU ET AL. (1973) zum Einsatz. Aufgrund der Tatsache, dass diese Methode bei steigenden Kohlenstoffanteilen der Legierung zu stark von der Realität abweichenden Ergebnissen führt, publizierte LESLIE (1981) ein Verfahren, das eine belastbare Härteberechnung bei Werkstoffen mit höherem Kohlenstoffgehalt, wie z. B. dem übereutektoiden Stahl 100Cr6, erlaubt.

**Mechanische Randbedingungen.** Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 ausgeführt, wird bei der werkstückbezogenen Betrachtung des Schleifhärteprozesses die Werkstückeinspannung über die mechanischen Randbedingungen des Werkstückmodells realisiert. Die qualitativen und quantitativen Eigenschaften dieser mechanischen Randbedingungen haben dabei einen direkten Einfluss auf die während des Schleifhärtens induzierten Spannungen und damit auf die resultierenden Eigenspannungen innerhalb des bearbeiteten Werkstücks. Daher ist bei der Umsetzung der mechanischen Randbedingungen auf eine realitätsgetreue Abbildung der Einspannung zu achten. Die Modellierung erfolgt durch die Festlegung der Freiheitsgrade der mit der Werkzeugmaschine und deren Spannvorrichtungen in Kontakt stehenden Werkstückoberflächen. Aufgrund der transienten Betrachtung der thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte beim Schleifhärten sind dabei, neben den geometrischen und mechanischen Eigenschaften, die zeitlichen Aspekte der Werkstückeinspannung, wie z. B. der Zeitpunkt der Werkstückausspannung nach dem Prozessende, im Modell zu berücksichtigen.

**Spannungen.** Die Grundlage für die Bestimmung der beim Schleifhärten induzierten Spannungen ist die mechanische Vorbelastung des Werkstücks und damit die im eingespannten Zustand vorliegende Spannungsverteilung. Die Veränderungen des Spannungszustands während des Schleifhärteprozesses werden basierend auf der transienten Temperaturverteilung im Werkstück, der Gefügeumwandlung in der Randzone und der mechanischen Belastung der Kontaktzone, welche in Summe das thermomechanische Belastungskollektiv beim Schleifhärten repräsentieren (vgl. Abschnitt 2.2.3), berechnet. Dabei ist das temperatur-, phasen- und druckspannungsabhängige mechanische

Werkstoffverhalten zu berücksichtigen. Im angespannten Zustand führen die während des Schleifhärtens entstandenen Spannungen in Wechselwirkung mit den Flächenträgheitsmomenten der bearbeiteten Werkstückgeometrie zu einer charakteristischen Eigenspannungverteilung und zum Verzug des Werkstücks.

### 4.4 Fazit

Das in diesem Kapitel dargelegte formale Systemmodell beschreibt die thermo-metallurgischen und thermomechanischen Prozessphänomene des Schleifhärtens mithilfe von Systemelementen unabhängig voneinander und repräsentiert durch deren Kopplung das Prozessverhalten vollständig. Durch die systemelementbasierte Abbildung der Wirkmechanismen wird den in Abschnitt 3.3 definierten Anforderungen an das Simulationskonzept Rechnung getragen. Zum einen beschränken sich die Eingangsgrößen des Systemmodells auf die bekannten betriebmittel- und prozessspezifischen System- und Stellgrößen (vgl. Anforderung A5 im Abschnitt 3.3). Zum anderen ermöglicht die Kopplung der Systemelemente über definierte Eingangs- und Ausgangsgrößen eine phasenadäquate Modellierung der Wirkmechanismen, wodurch die auf Basis der Systemelemente implementierten Teilmodelle ohne jegliche gegenseitige Beeinflussung effizient und gezielt angepasst werden können. Die damit realisierbare phasenadäquate Umsetzung der Teilmodelle (vgl. Anforderung A1 im Abschnitt 3.3), wie z. B. mit variierenden Detaillierungsgraden des Werkstoffmodells, stellt die Durchgängigkeit des rechnergestützten Konzepts zur Prozessgestaltung sicher (vgl. Anforderung A2 im Abschnitt 3.3). Des Weiteren gewährleistet die allgemeingültige Beschreibung der Wirkmechanismen (vgl. Anforderung A6 im Abschnitt 3.3) die Implementierung von artverwandten Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, indem einzelne prozessspezifische Teilmodelle, wie z. B. die Wärmequellenbeschreibung, angepasst bzw. ausgetauscht werden. Zudem sind die beschriebenen Systemelemente unabhängig vom gewählten Implementierungsansatz, wodurch beispielsweise die Berechnung der Prozesskräfte prinzipiell sowohl über Regressionsmodelle als auch über Künstliche-Neuronale-Netz-Modelle erfolgen kann. Die obigen Ausführungen und die in den eingebundenen Publikationen (P1) bis (P7) dokumentierten Modelleignungsprüfungen (vgl. Abschnitt 1.2) bestätigen, dass das entwickelte formale Systemmodell gemäß den Anforderungen das reale Systemverhalten hinreichend genau beschreibt. Damit bildet das Systemmodell eine belastbare Grundlage für die Implementierung der Simulationsmodelle (vgl. Kapitel 5) und die modellgestützte Berechnung der definierten Ziel- und Ergebnisgrößen.

## 5 Simulationsmodelle des Schleifhärteprozesses

### 5.1 Allgemeines

In Bezug auf das dieser Arbeit zugrunde liegende methodische Vorgehen (vgl. Abschnitt 1.2) und basierend auf dem in Kapitel 4 beschriebenen formalen Systemmodell stellt dieses Kapitel die implementierten Simulationsmodelle vor und erläutert deren Verifikation, Validierung und exemplarischen Einsatz. Dies erfolgt anhand der in die Arbeit integrierten Publikationen (P1) bis (P7) (vgl. Abschnitt 1.3). Dazu werden die Publikationen anhand der in Abschnitt 3.4 definierten Simulationsansätze (S1) bis (S4) konzeptionell eingeordnet (vgl. Abschnitt 5.2) und zusammengefasst (vgl. Abschnitt 5.3). Anschließend zeigt Abschnitt 5.4 die individuellen Leistungsbeiträge des Autors an den durchgeführten Arbeiten auf, bevor Abschnitt 5.5 das Kapitel mit einer Bewertung der umgesetzten Simulationsmodelle abschließt.

### 5.2 Konzeptionelle Einordnung der Publikationen

Wie bereits oben erläutert, beschreiben die Publikationen (P1) bis (P7) in Summe die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten und implementierten Simulationsmodelle sowie die in diesen enthaltenen phasenspezifischen und -gerechten Teilmodelle. In Abbildung 15 werden die inhaltlich aufeinander aufbauenden Publikationen (P1) bis (P7) den vier Simulationsansätzen (S1) bis (S4), welche durch das entwickelte Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung definiert sind (vgl. Abschnitt 3.4), konzeptionell zugeordnet. Die Publikation (P1) umfasst die FE-basierte Modellierung der grundlegenden thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte während des Schleifhärteprozesses. Damit bildet diese Veröffentlichung die Basis für die Weiterentwicklung der Modellansätze sowie für deren Verifikation. Darauf aufbauend detailliert die Publikation (P2) einige Teilmodelle, wie z. B. die rechnergestützte Berechnung der Prozesskräfte, und qualifiziert den FE-basierten Modellierungsansatz für die Simulation von transienten Phänomenen beim Schleifhärten. Die hinsichtlich der Prozessmodellierung gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Abbildung der thermometallurgischen Effekte mithilfe eines dreidimensionalen analytischen Modells (vgl. Publikation (P3)) und unterstützen zugleich die simulative Analyse und erweiterte Modellierung der prozessbedingten Eigenspannungs- und Verzugsentstehung (vgl. Publikation (P4)). Ergänzend wird in der Publikation (P5) ein analytisches Quellspannungsmodell für das Schleifhärten, unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Quellspannungen und Quellkräfte, vorgestellt. Während im Rahmen der Publikationen (P1) bis (P5) ausschließlich Planschleifhärteprozesse

betrachtet werden, befassen sich die Publikationen (P6) und (P7) mit dem Außenrundsleifhärten. Die Publikation (P6) erläutert diesbezüglich die Übertragung der relevanten Teilmodelle auf das Außenrundsleifhärten. Abschließend erörtert die Publikation (P7) die Ergebnisse eines beispielhaften industriellen Einsatzes der Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung. In diesem Zusammenhang wurde mithilfe der thermometallurgischen Modelle das Prozessverhalten des Schleifhärtens als Teil der Komplettbearbeitung einer Welle prognostiziert und optimiert. Dabei wurde im Gegensatz zu den Publikationen (P1) bis (P6) nicht der überereutektoide Stahl 100Cr6 untersucht, sondern der unterereutektoide Stahl Ck45. Die detaillierten Zusammenfassungen der Publikationsinhalte können dem folgenden Abschnitt 5.3 entnommen werden.

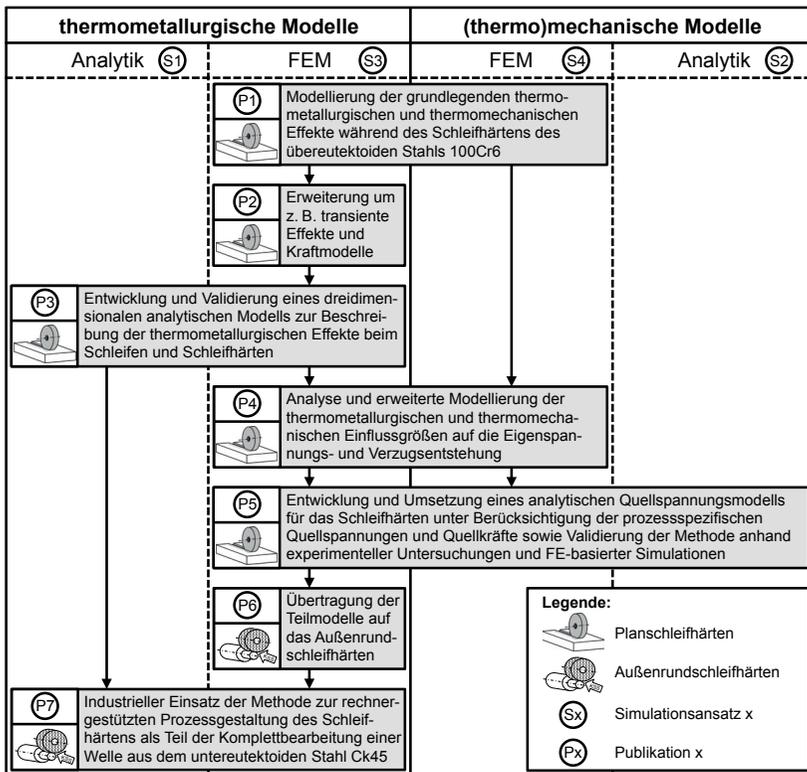


Abbildung 15: Inhaltliche Schwerpunkte der Publikationen sowie deren konzeptionelle Einordnung anhand der in Abschnitt 3.4 definierten Simulationsansätze

### 5.3 Zusammenfassungen der Publikationen

#### 5.3.1 Publikation (P1) – „Experimental and Numerical Identification of Process Parameters of Grind-Hardening and Resulting Part Distortions“

Der Schwerpunkt von Publikation (P1) liegt auf der Modellierung der grundlegenden thermometallurgischen und thermomechanischen Phänomene des Schleifhärteprozesses mithilfe von FE-basierten Methoden. Dazu wurden anhand von experimentellen Prozessuntersuchungen und Parameterstudien geeignete Modelle entwickelt, implementiert und validiert, wobei insbesondere diejenigen Teilmodelle fokussiert wurden, welche die thermometallurgischen Vorgänge innerhalb der Werkstückrandzone beeinflussen. Daher wurden zunächst die werkstückbezogenen, thermischen Quellen und Senken analysiert und modelliert. Die Betrachtung der experimentell ermittelten, tangentialen Kräfte und Eingriffslasten entlang der Kontaktzone zeigt eine dreiecksförmige Ausprägung der Wärmestromdichteverteilung beim Schleifhärten, welche entsprechend im Wärmequellenmodell umgesetzt wurde. Die thermischen Senken an der Werkstückoberfläche sind über Wärmeübergangskoeffizienten abgebildet und repräsentieren, neben der Kühlschmierstoffwirkung und der Strahlung, auch die Wärmeabfuhr über die Späne. Im eingesetzten Werkstoffmodell des übereutektoiden Stahls 100Cr6 wurde das temperatur- und phasenabhängige Werkstoffverhalten implementiert und anschließend kalibriert. Um auf Basis der transienten Temperaturfelder die Umwandlungsphänomene und die resultierende Einhärtetiefe berechnen zu können, wurden die Teilmodelle zur Beschreibung der Gefügeumwandlung und der Gefügehärtung vollständig abgebildet. Die Berechnung der thermomechanischen Eigenspannungs- und Verzugphänomene erfolgte aufbauend auf den thermometallurgischen Ergebnisgrößen und unter Beachtung der mechanischen Randbedingungen, welche durch die Sperrung der translatorischen Freiheitsgrade der Spannflächen modelliert wurden.

Die sich aus den implementierten Teilmodellen zusammensetzenden FE-basierten Simulationsmodelle wurden auf Basis einer experimentellen Parameterstudie kalibriert und exemplarisch validiert. Dabei zeigen sowohl die berechneten Temperaturzyklen innerhalb der Randzone als auch die simulierten Querschliffe und Einhärtetiefen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Darüber hinaus erlaubt es die thermomechanische Simulation, das reale Verzugsverhalten der bearbeiteten Werkstücke qualitativ zu prognostizieren. Damit belegen die veröffentlichten Ergebnisse die prinzipielle Möglichkeit, die prozessspezifischen Phänomene, wie z. B. die Temperaturverteilung und die Gefügeumwandlung innerhalb der Randschicht sowie den resultierenden Werkstückverzug, FE-basiert zu simulieren und damit den Schleifhärteprozess rechnergestützt zu gestalten.

### 5.3.2 Publikation (P2) – „Experimental and Numerical Analysis of Transient Behavior During Grind-Hardening of AISI 52100“

Aufbauend auf den Vorarbeiten der Publikation (P1) befasst sich die Publikation (P2) mit der Weiterentwicklung der FE-basierten Teilmodelle und mit der Erweiterung des thermometallurgischen Simulationsmodells um instationäre Prozessphänomene. Der Anspruch einer hohen Prognosegüte der thermometallurgischen Ergebnisgrößen erfordert eine weitere Optimierung der Teilmodelle *Materialabtrag*, *Prozesskräfte* und *Werkstoffverhalten*. Gemäß Abschnitt 2.2.2 hat der *Materialabtrag* einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeverteilung innerhalb der Kontaktzone. Eine Modellierung des Wärmestroms in die Späne über einen Wärmeübergangskoeffizienten bildet die realen Gegebenheiten lediglich unzureichend ab. Daher wurde eine schrittweise Deaktivierung der finiten Elemente unterhalb der Kontaktzone implementiert, wodurch die Wärmekapazität dieser finiten Elemente und damit die darin enthaltenen Wärmemengen auf Null gesetzt werden. Ebenso wie der *Materialabtrag* haben die *Prozesskräfte* Auswirkungen auf die thermometallurgischen Randzoneneffekte. Zur Ermittlung der *Prozesskräfte* wurde ein Regressionsmodell entwickelt, welches als Eingangsgrößen lediglich prozessspezifische Stellgrößen und den äquivalenten Schleifscheibendurchmesser nutzt. Die Anpassung und Evaluierung des Modells wurde anhand eines experimentell ermittelten Parametersatzes durchgeführt, welcher zugleich den modellspezifischen Gültigkeitsbereich aufspannt. Die aufgrund der Normalkräfte in der Kontaktzone auftretenden Flächenpressungen beeinflussen das *Werkstoffverhalten* in der Randzone, insbesondere die Gefügeumwandlungen, welche von einer Minimierung der Gibbs'schen Energie getrieben werden. Daher wird der Simulation der Gefügeumwandlung ein auf Basis der Clausius-Clapeyron-Gleichung (HORNBOGEN ET AL. 2008) abgeleitetes druckspannungsabhängiges Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild zugrunde gelegt. Ein weiterer Aspekt, welcher in der Publikation (P1) nicht berücksichtigt wurde, ist das anhand von Experimenten nachgewiesene instationäre Prozessverhalten. Durch den Schleifscheibenverschleiß, d. h. durch den Ausbruch von verschlissenen Schleifkörnern, treten an der Schleifscheibe Selbstschärfereffekte auf, die entlang der Schleifbahn zu kontinuierlich abnehmenden tangentialen Schleifkräften führen. Damit wird mit zunehmendem Schleifweg sukzessive weniger Leistung in der Kontaktzone umgesetzt, wodurch sich die Temperaturen und damit die erreichbaren Einhärtetiefen in der Randzone kontinuierlich reduzieren. Erst die Modellierung eines schleifwegabhängigen Kraftverlaufs ermöglicht die korrekte Prognose der dreidimensionalen Gefüge- und Härteverteilung im Werkstück. Da eine direkte Modellierung der Schleifscheibeneffekte aufgrund der werkstückbezogenen Prozessbetrachtung nicht möglich ist, müssen die erforderlichen Kraftverläufe aus Referenzmessungen abgeleitet oder mithilfe von Erfahrungswissen abgeschätzt werden.

### 5.3.3 Publikation (P3) – „A Three-Dimensional Analytical Model to Predict the Thermo-Metallurgical Effects within the Surface Layer During Grinding and Grind-Hardening“

Die Publikation (P3) fokussiert die Entwicklung und Implementierung eines analytischen Simulationsmodells, welches die Berechnung der dreidimensionalen thermometallurgischen Effekte beim Schleifhärten ermöglicht. Wie bereits in Abschnitt 2.4 ausgeführt, sind bestehende analytische Modelle nicht geeignet, die komplexen Prozessphänomene innerhalb der Randzone abzubilden. Daher wurde mithilfe eines neuartigen Ansatzes ein formelbasierter Zusammenhang hergeleitet, welcher die Berechnung von stationären und instationären dreidimensionalen Temperaturfeldern in halbunendlichen Körpern erlaubt, wobei eine dreiecksförmige bewegte Wärmequelle und der Wärmeübergang an der Oberfläche berücksichtigt werden. Die thermischen Einflüsse des Materialabtrags wurden über eine Betrachtung der spezifischen inneren Energie der Späne integriert. Auf Basis des stationären dreidimensionalen Temperaturfelds ist es möglich, die in der Randzone auftretenden zeitabhängigen Temperaturzyklen zu ermitteln. Diese können infolge des zugrunde liegenden Lagrange'schen Ansatzes, bei dem sich der halbunendliche Körper unter der feststehenden Wärmequelle hinweg bewegt, nicht direkt aus dem Temperaturfeld abgeleitet werden. Zur Bestimmung der zeitabhängigen Temperaturzyklen werden die Temperaturwerte an diskreten Punkten des halbunendlichen Körpers entlang dessen Bewegungsrichtung mit dessen Relativgeschwindigkeit zur Wärmequelle verrechnet. Damit können die zeitabhängigen Temperaturzyklen innerhalb der Randschicht anhand der geometrischen Lage der wärmebeeinflussten diskreten Punkte gewonnen werden. Anhand der Temperaturverteilung und der Aufheizgeschwindigkeiten, welche aus den Temperaturzyklen resultieren, kann die Austenitisierung des Werkstoffs analytisch berechnet werden. Aufgrund der dreidimensionalen Herangehensweise lassen sich über die anschließende Gefüge- und Härteberechnung u. a. Härtetiefenverläufe außerhalb der Arbeitsebene und Querschliffe unterhalb der Kontaktzone darstellen. Damit ist es erstmalig möglich, die dreidimensionale thermometallurgische Randzonenbeeinflussung beim Schleifhärten analytisch zu berechnen.

Die analytischen Teilmodelle wurden mithilfe von validierten FE-Modellen verifiziert, wobei die Ergebnisse lediglich marginal voneinander abweichen. Anschließend wurde das analytische thermometallurgische Simulationsmodell anhand von experimentellen Ergebnissen validiert. Verglichen mit den in den Publikationen (P1) und (P2) vorgestellten FE-basierten Modellen zeichnet sich der analytische Ansatz durch die stark reduzierten Rechenzeiten bei einer vergleichbaren Prognosegüte aus. Dies qualifiziert das analytische Simulationsmodell insbesondere für die frühen Phasen der operativen Technologieplanung.

### 5.3.4 Publikation (P4) – „Experimental and Numerical Analysis of the Influences on Part Distortion as a Result of the Grind-Hardening Process“

Fußend auf den Ausführungen der Publikation (P1) und unter Berücksichtigung des thermomechanischen Belastungskollektivs beim Schleifhärten (vgl. Abschnitt 2.2.3) behandelt die Publikation (P4) die Erweiterung und Optimierung des FE-basierten thermomechanischen Simulationsmodells. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Analyse und Modellierung der thermometallurgischen und thermomechanischen Einflussgrößen auf die Eigenspannungs- und Verzugsentstehung beim Schleifhärten. Diesbezüglich wurden insbesondere diejenigen Teilmodelle adaptiert, welche direkte oder indirekte Auswirkungen auf die Superposition der thermisch, mechanisch und durch Gefügeumwandlung induzierten Spannungen haben (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Das im Rahmen der Publikation (P1) vorgestellte thermomechanische Simulationsmodell erlaubt eine qualitative Vorhersage der prozessspezifischen Werkstückverzüge, wobei die simulierten Werkstückverzüge im Mittel etwa drei Mal höher als die experimentell ermittelten Ergebnisse sind. Dies lässt sich in erster Linie auf die innerhalb der Simulation unverhältnismäßige Dominanz der thermisch induzierten Zugeigenspannungen zurückführen. Die aus der martensitischen Gefügeumwandlung resultierenden Druckeigenspannungen in der Werkstückrandschicht stellen aufgrund der direkten Kopplung mit der Gefüge- und der Härteverteilung keinen Stellhebel zur Verbesserung der modellspezifischen Prognosegüte dar. Damit und aufgrund der vernachlässigbar geringen mechanischen Beeinflussung des Eigenspannungszustands erfolgte die Optimierung des thermomechanischen Simulationsmodells über eine zielgerichtete Modifikation der implementierten Modelle zur Berechnung der thermisch induzierten Zugeigenspannungen. Dabei hat die Integration der Druckspannungsabhängigkeit der Austenitisierung (vgl. Publikation (P2)) die größte Auswirkung auf die thermomechanischen Simulationsergebnisse. Die Druckspannungsbeaufschlagung der Werkstückrandschicht verringert die zu deren Austenitisierung notwendigen Temperaturen. Dies führt bei gleichbleibender Gefügebeeinflussung zu einer Absenkung des im Werkstück auftretenden Temperaturniveaus und damit zu einer Reduzierung der thermisch induzierten Zugeigenspannungen. Die Validierung des Simulationsmodells sowie der darin enthaltenen modifizierten Teilmodelle erfolgte anhand von makroskopischen, prozessspezifischen Werkstückverzügen und mikroskopischen Eigenspannungstiefenverläufen, welche mithilfe einer röntgenografischen Eigenspannungsanalyse experimentell ermittelt wurden. Die in dieser Publikation beschriebenen Optimierungen resultieren in einer quantitativen Verbesserung der Prognosegüte des FE-basierten thermomechanischen Simulationsmodells.

### 5.3.5 Publikation (P5) – „Identification and Analysis of Part Distortion Resulting from Grind-Hardening Process Using Computer-Based Methods“

Die Publikation (P5) legt den Schwerpunkt auf die Entwicklung, Implementierung und Validierung eines analytischen Quellspannungsmodells zur rechnergestützten Abschätzung des mechanischen Verzugsverhaltens infolge einer Randschichtwärmebehandlung durch einen Schleifhärteprozess. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 erläutert, nutzen die Quellspannungsmodelle zur Bestimmung der Werkstückverzüge Quellkräfte, welche im Quellspannungsbereich auf das spannungsfreie Werkstück wirken. Damit erfolgt der Aufbau des Quellspannungsmodells über die Identifikation der auftretenden Quellkräfte. Diese können anhand der Spannungen, welche prozessspezifisch in der Werkstückrandschicht entstehen (vgl. Abschnitt 2.2.3 und Abschnitt 4.3.2), und anhand von deren Wirkquerschnitt berechnet werden. Alternativ können die Quellkräfte über das beobachtbare Verzugsbild, die bearbeitete Werkstückgeometrie und unter Zuhilfenahme der Kirchhoff'schen Plattentheorie (TIMOSHENKO & WOINKOWSKY-KRIEGER 1959) hergeleitet werden.

Im Rahmen der Publikation (P5) wurden die Quellkräfte anhand der parameterabhängigen Verzüge sowie der Werkstückabmessungen bestimmt. Diesbezüglich wurde, basierend auf den Ergebnissen einer experimentellen Parameterstudie, ein Quellkraftverlauf ermittelt, welcher vom bezogenen Zeitspanvolumen abhängt. Dieser Quellkraftverlauf bildet die Grundlage für die Prognose der infolge einer Schleifhärtebearbeitung auftretenden Werkstückverzüge. Aufgrund des geringen Rechenaufwands zur Lösung der analytischen Prozessbeschreibung ist das Quellspannungsmodell für den Einsatz in den frühen Phasen der operativen Technologieplanung prädestiniert (vgl. Abschnitt 3.4). Die Bestimmung der erforderlichen Eingangsgrößen, wie z. B. des durch einen Schleifhärteprozess spannungsbeeinflussten Randzonenbereichs, kann beispielsweise durch das in Publikation (P3) hergeleitete analytische thermometallurgische Simulationsmodell erfolgen. Die Verifikation des entwickelten analytischen Quellspannungsmodells wurde anhand des FE-basierten Simulationsmodells durchgeführt, welches in den Publikationen (P1) und (P4) beschrieben ist. Des Weiteren wurde das Modell auf Basis ergänzender experimenteller Untersuchungen validiert, wobei die Tauglichkeit der Quellspannungsmethode zur Abschätzung der Werkstückverzüge beim Schleifhärten bestätigt werden konnte. Die Gültigkeit des Quellspannungsmodells ist über den Betrachtungsrahmen bei dessen Herleitung und Validierung definiert. Zur Erweiterung bzw. Anpassung an geänderte Prozessrahmenbedingungen ist eine erneute Kalibrierung des Quellspannungsmodells notwendig. Diese kann anhand von experimentellen Ergebnissen oder unter Einsatz des FE-basierten thermomechanischen Simulationsmodells (vgl. Publikationen (P1) und (P4)) erfolgen.

### 5.3.6 Publikation (P6) – „Experimental and Numerical Analysis of the Surface Integrity Resulting from Outer-Diameter Grind-Hardening“

Die Publikation (P6) beschreibt das für das Außenrundsleifhärten adaptierte FE-basierte thermometallurgische Simulationsmodell. Dazu wurden die im Rahmen der Publikationen (P1) bis (P5) anhand des Plansleifhärtens entwickelten, implementierten und eingesetzten Teilmodelle an das charakteristische Prozessverhalten des Außenrundsleifhärtens angepasst. Dabei wird eine von BROCKHOFF (1999b) präsentierte Einstechstrategie betrachtet, bei welcher die Schleifscheibe zunächst ohne Werkstückrotation bis auf das Fertigmaß zugestellt wird. Anschließend wird das zu zerspanende Werkstückvolumen durch eine einzige Werkstückumdrehung abgetragen und somit in einem einzigen Überlauf eine ringförmige Nut in das Werkstück eingestochen.

Da sämtliche in diesem Kapitel vorgestellten Simulationsmodelle auf dem in Kapitel 4 definierten formalen Systemmodell aufbauen, mussten zur Abbildung des verfahrensspezifischen Prozessverhaltens lediglich einige wenige Teilmodelle modifiziert werden. Sämtliche Teilmodelle, welche nicht direkt von der Werkstückgeometrie und den Bedingungen in der Kontaktzone beeinflusst werden, konnten unverändert übernommen werden. Dies betrifft z. B. die Teilmodelle zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens, der Gefügewandlung und der Gefügehärte. Des Weiteren kann das in Publikation (P2) entwickelte Regressionsmodell zur Prozesskraftberechnung für die Modellierung des Außenrundsleifhärtens herangezogen werden, was sich mit der verfahrensunabhängigen Nutzung des äquivalenten Schleifscheibendurchmessers als Eingangsgröße begründen lässt.

Der Großteil der erforderlichen Anpassungen am Simulationsmodell ergibt sich aus den im Vergleich zum Plansleifhärten geänderten kinematischen Eingriffsverhältnissen zwischen Werkstück und Schleifscheibe. Diese werden u. a. durch die Vernetzung des Werkstücks, die verfahrensadäquate Modellierung des Materialabtrags, insbesondere im Einstechbereich, und die Aktualisierung der geometrischen Abmessungen der Wärmequelle berücksichtigt. Aufgrund der Eingriffsverhältnisse während des radialen Einstechvorgangs kann von einer näherungsweise konstanten Spannungsdicke entlang der gesamten Kontaktlänge ausgegangen werden. Daher wurde der Wärmeeintrag beim Einstechen der Schleifscheibe in das Werkstück über eine Wärmequelle mit einer konstanten Wärmestromdichteverteilung abgebildet. Während der anschließenden Vorschubbewegung kommt die in Publikation (P1) für das Schleifhärten definierte Wärmequelle mit dreiecksförmiger Ausprägung der Wärmestromdichteverteilung zum Einsatz. Die Absicherung dieser Modifikationen erfolgte im Rahmen einer Modellvalidierung, welche anhand einer experimentellen Parameterstudie durchgeführt wurde.

### 5.3.7 Publikation (P7) – „Complete Machining of Cylindrical Steel Parts on a Mill Turn Center Including Heat Treatment Using Grind-Hardening“

Die Publikation (P7) verdeutlicht die Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale der rechnergestützten Prozessgestaltung im Rahmen eines industriellen Einsatzszenarios. Das Ziel der durchgeführten Untersuchung war die Integration des Außenrundschleifhärtens in eine Prozesskette zur Komplettbearbeitung einer Welle aus dem Werkstoff Ck45 auf einem konventionellen Dreh-Fräs-Zentrum (vgl. Abbildung 16). Dabei wurden die implementierten thermometallurgischen Simulationsmodelle zur Auslegung der Fertigungsparameter sowie zur Analyse und Optimierung der Einstechstrategie herangezogen. Den Ausgangspunkt der rechnergestützten Prozessgestaltung bildete die Implementierung eines Werkstoffmodells für den untereutektoiden Stahl Ck45, welches sowohl in dem analytischen als auch in dem FE-basierten Simulationsmodell zur Anwendung kam.

In Anlehnung an die in Abschnitt 3.4 beschriebene Methode wurden die grundlegenden Machbarkeitsstudien sowie die Prozessfensteridentifikation mithilfe des analytischen thermometallurgischen Simulationsmodells durchgeführt. Dabei erfordert der Einsatz des analytischen Simulationsmodells für das Außenrundschleifhärten eine Umrechnung der kinematischen Eingriffsverhältnisse über den äquivalenten Schleifscheibendurchmesser. Das auf Basis von zwei Referenzversuchen kalibrierte Simulationsmodell ermöglichte eine rechnergestützte Parameterstudie und die Ableitung eines stabilen Prozessfensters. Zudem konnten auf Basis der analytisch bestimmten Querschliffe erste Abschätzungen zur geometrischen Ausprägung der gehärteten Randschicht getroffen werden. Im Rahmen der Vorauslegung der dreidimensionalen Randzonenbeeinflussung wurden die Modellparameter vom analytischen an das FE-basierte thermometallurgische Simulationsmodell übergeben. Bei der anschließenden Feinauslegung der Randzonenbeeinflussung wurde insbesondere das Einstechverhalten analysiert und darauf aufbauend eine optimierte Einstechstrategie zur Vermeidung bzw. Minimierung der Härteschlupfeffekte rechnergestützt abgeleitet. Die mithilfe der rechnergestützten Prozessgestaltung erlangten Erkenntnisse konnten experimentell bestätigt werden. Der phasenadäquate und durchgängige Einsatz der Simulationsmodelle sowie deren hohe Prognosegüte resultierten in einer im Vergleich zum konventionellen Vorgehen erheblichen Reduzierung des experimentellen Aufwands zur Prozessfensteridentifikation und zur Optimierung der Fertigungsparameter. Diese Prozessoptimierung wurde durch die umgesetzte vollautomatisierte Modellerstellung auf Basis der System- und Stellgrößen und die damit möglichen kurzen Iterationszyklen unterstützt. Damit belegen die publizierten Ergebnisse die Industrietauglichkeit der Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung sowie der eingesetzten Simulationsmodelle.

## 5.4 Individuelle Leistungsbeiträge des Autors

Wie bereits in Abschnitt 1.3 erläutert, entstand der Großteil der in diese Arbeit eingebundenen Publikationen (P1) bis (P7) im Rahmen von Kooperationsprojekten. Die gemäß der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.2) für die vorliegende Arbeit relevanten Anteile der Publikationen, wie z. B. zur Modellbildung und zu den Simulationen, wurden federführend vom Autor konzipiert, erarbeitet und schriftlich abgefasst. Eine Ausnahme bildet das in der Publikation (P5) ausgeführte Quellspannungsmodell, welches in enger Zusammenarbeit mit der IWT, Bremen, entwickelt und umgesetzt wurde.

Tabelle 2 fasst die individuellen Leistungsbeiträge des Autors zusammen. Dabei werden die Leistungsanteile an den inhaltlichen bzw. operativen Arbeiten, d. h. an der Konzeption und der Durchführung, sowie an der Publikationserstellung, jeweils bezogen auf die Experimente sowie auf die Modellbildung und Simulation, aufgezeigt. Zusätzlich werden die allgemeinen, organisatorischen Beiträge zur Publikationserstellung dargelegt.

Tabelle 2: Übersicht über die individuellen Leistungsbeiträge des Autors an den zugrunde liegenden inhaltlichen bzw. operativen Arbeiten sowie der Publikationserstellung

	inhaltliche/operative Arbeiten				Publikations- erstellung		
	Konzeption		Durchführung		Allgemeines	Experiment	Modellbildung/ Simulation
Publikation	Experiment	Modellbildung/ Simulation	Experiment	Modellbildung/ Simulation			
(P1)	15 %	85 %	10 %	90 %	55 %	5 %	85 %
(P2)	20 %	90 %	10 %	90 %	60 %	5 %	90 %
(P3)	–	85 %	–	90 %	85 %	–	95 %
(P4)	10 %	85 %	5 %	90 %	60 %	10 %	90 %
(P5)	15 %	50 %	5 %	50 %	45 %	5 %	55 %
(P6)	10 %	85 %	15 %	90 %	40 %	10 %	85 %
(P7)	50 %	90 %	40 %	100 %	55 %	30 %	95 %

## 5.5 Fazit

Die in diesem Kapitel konzeptionell eingeordneten und zusammengefassten Publikationen (P1) bis (P7) verdeutlichen die Eigenschaften und Potentiale der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Simulationsmodelle zur Prognose des schleifhärtespezifischen Prozessverhaltens. Dabei orientieren sich die zugrunde liegenden phasenadäquaten Simulationsansätze (S1) bis (S4) an dem Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung (vgl. Abschnitt 3.4). Die vorgestellten Simulationsmodelle bauen unmittelbar auf dem in Kapitel 4 erläuterten formalen Systemmodell auf und wurden auf Basis der in diesem Systemmodell gekoppelten Systemelemente implementiert.

Für die Vorhersage des Prozessverhaltens in den frühen Phasen der operativen Technologieplanung stellt die vorliegende Arbeit zwei analytische Simulationsmodelle zur Verfügung. Die neuartigen Modellansätze ermöglichen eine phasenadäquate Prognosegüte bei gleichzeitig geringem Aufwand zur Lösung der zugrunde liegenden analytischen Prozessbeschreibung (vgl. Anforderung A1 im Abschnitt 3.3). Dadurch qualifizieren sich die analytischen Simulationsmodelle insbesondere für die Prozessfensteridentifikation und die Prozessvorauslegung. Die späteren Phasen der operativen Technologieplanung werden mithilfe von FE-basierten Simulationsmodellen unterstützt. Diese erlauben eine detaillierte Analyse der thermometallurgischen und thermomechanischen Prozessphänomene (vgl. Anforderung A1 im Abschnitt 3.3), wodurch sie sich in erster Linie für die Feinauslegung und Optimierung des Schleifhärtens eignen.

Die teilmodellbasierte Implementierung sämtlicher Simulationsmodelle unter Nutzung von definierten Eingangs- und Ausgangsgrößen gewährleistet die Durchgängigkeit der Simulationsmodelle entlang des operativen Technologieplanungsprozesses (vgl. Anforderung A2 im Abschnitt 3.3). Gleichzeitig können die einzelnen Simulationsmodelle durch die vollständige Abbildung der relevanten prozessspezifischen Wirkmechanismen über die Teilmodelle weitestgehend unabhängig voneinander angewendet werden (vgl. Anforderung A3 im Abschnitt 3.3). Durch den Aufbau der Simulationsmodelle auf Basis des allgemeingültig konzeptionierten Systemmodells können diese effizient an die charakteristischen Gegebenheiten verschiedener Verfahrensvarianten und Einsatzszenarios angepasst werden (vgl. Publikationen (P6) und (P7)). Im Sinne der Integrationsfähigkeit (vgl. Anforderung A4 im Abschnitt 3.3) sowie der Anwenderfreundlichkeit (vgl. Anforderung A5 im Abschnitt 3.3) wurden die Simulationsmodelle unter Einsatz gängiger kommerzieller Softwareprodukte implementiert. Zudem wurden Algorithmen zur vollautomatisierten FE-Vernetzung und Modellvorbereitung auf Basis der System- und Stellgrößen entwickelt und eingesetzt. Diese ermöglichen eine Minimierung des Modellierungsaufwands sowie kurze Iterationszyklen bei der Durchführung von Parameterstudien und Optimierungen. Die in der

Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.2) geforderte anwendungsnahe Erprobung der entwickelten und implementierten Simulationsmodelle fand im Rahmen der Publikation (P7) statt. In diesem Zusammenhang konnte die Effizienz und der funktionale Nutzen der rechnergestützten Prozessgestaltung bestätigt werden. Die Wirtschaftlichkeit des Konzepts zur rechnergestützten Prozessgestaltung wird im folgenden Kapitel 6 bewertet.

## 6 Bewertung der rechnergestützten Prozessgestaltung

### 6.1 Allgemeines

Basierend auf den Erkenntnissen der formalen Systemmodellierung (vgl. Kapitel 4) sowie der Implementierung der Simulationsmodelle (vgl. Kapitel 5) und im Hinblick auf die in Abschnitt 1.2 dargelegte Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bewertet dieses Kapitel die entwickelte Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens (vgl. Kapitel 3) gesamthaft. Dazu erfolgt zunächst eine inhaltliche Diskussion des Erfüllungsgrads der in Abschnitt 3.3 definierten, allgemeinen Anforderungen an das Konzept zum phasengerechten Methoden- und Modelleinsatz in der operativen Technologieplanung (vgl. Abschnitt 6.2). Anschließend zeigt Abschnitt 6.3 anhand eines industrienahe Anwendungsszenarios den wirtschaftlichen Nutzen des umgesetzten Simulationskonzepts auf, bevor Abschnitt 6.4 das Kapitel mit einer zusammenfassenden Beurteilung der Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung abschließt.

### 6.2 Bewertung des Erfüllungsgrads der Anforderungen

Die in Abschnitt 3.3 abgeleiteten Anforderungen an das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung bildeten die Grundlage für die Entwicklung des formalen Systemmodells (vgl. Kapitel 4), für die Implementierung der Simulationsmodelle (vgl. Kapitel 5) und für deren Einordnung entlang des operativen Technologieplanungsprozesses (vgl. Abschnitt 3.4). Daher wird im Folgenden die Güte der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung anhand des Erfüllungsgrads der allgemeinen Anforderungen diskutiert und beurteilt:

A1 *Phasenadäquatheit*: Aufgrund der Vielzahl von Aufgaben der Prozessgestaltung werden von den entlang des operativen Technologieplanungsprozesses eingesetzten Simulationsmodellen unterschiedlichste Eigenschaften gefordert. Diesbezüglich müssen die Simulationsmodelle, unter Berücksichtigung der Qualität der Eingangsdaten und der zur Erfüllung der Aufgaben erforderlichen Effizienz, eine phasenadäquate Prognosegüte gewährleisten. Dies wird insbesondere durch die Abbildung der prozessspezifischen physikalischen Effekte über variierende Detaillierungsgrade der zugrunde liegenden Teilmodelle ermöglicht. Für die frühen Phasen stellt die vorliegende Arbeit analytische Simulationsmodelle zur Verfügung, welche sich durch eine hinreichende Ergebnisgüte und einen geringen Aufwand zur Lösung der analytischen Prozessbeschreibungen auszeichnen. Dadurch sind diese u. a.

für den Einsatz bei der Prozessfensteridentifikation und der Vorauslegung der Fertigungsparameter prädestiniert. In den späten Phasen der operativen Technologieplanung können die implementierten FE-basierten Simulationsmodelle herangezogen werden. Diese erlauben eine umfassende transiente Analyse und Prognose der thermometallurgischen und thermomechanischen Prozessphänomene, wodurch eine belastbare rechnergestützte Feinauslegung und Optimierung des Schleifhärteprozesses realisierbar ist. Im Hinblick sowohl auf die erforderlichen Aufwände zur Modellierung und Simulation als auch auf die resultierende Prognosegüte genügen die implementierten Simulationsmodelle dem gestellten Anspruch der Phasenadäquatheit.

A2 *Durchgängigkeit*: Die zielgerichtete und effiziente Nutzung des Simulationskonzepts führt phasenabhängig zu einem Wechsel bzw. zu einer zeitgleichen Verwendung der implementierten Modelle. Durch die Umsetzung sämtlicher Simulationsmodelle aus Basis definiert gekoppelter Teilmodelle können lokal abgesicherte Modellparameter und gewonnene Erkenntnisse wechselseitig auf andere Simulationsmodelle übertragen und dort eingesetzt werden. Damit gewährleisten die präsentierte Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung sowie die phasengerechten Modelle die geforderte Durchgängigkeit.

A3 *Unabhängigkeit*: Aufgrund der detaillierten, umfassenden Abbildung aller prozessspezifischen Phänomene über die Teilmodelle können die Simulationsmodelle bei gleichbleibender Prognosegüte prinzipiell unabhängig voneinander verwendet werden. Insbesondere können die FE-basierten Simulationsmodelle entkoppelt von den analytischen Ansätzen eingesetzt werden, was beispielsweise eine rechnergestützte Umplanung einer bestehenden Technologiekette in der späten Phase der Prozessgestaltung ermöglicht. Einzig die alleinige Nutzung des FE-basierten thermomechanischen Simulationsmodells ist eingeschränkt, da dieses weitestgehend auf den Ergebnissen der thermometallurgischen Untersuchungen aufbaut.

A4 *Integrationsfähigkeit*: Die Integration der Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung in die existierenden Unternehmensprozesse erfolgt anhand von assoziierten Aufgaben, welche im Rahmen der Entwicklung und Umsetzung des Simulationskonzepts auf Basis der allgemeinen Aufgaben der operativen Technologieplanung abgeleitet wurden. Diese assoziierten Aufgaben können unmittelbar mithilfe der implementierten Simulationsmodelle bearbeitet werden, wodurch deren charakteristische Ergebnisgrößen die Bewältigung der Analyse-, Planungs- und Optimierungsaufgaben der operativen Technologieplanung unterstützen.

- A5 *Anwenderfreundlichkeit*: Die Akzeptanz der rechnergestützten Prozessgestaltung wird u. a. durch die Begrenzung der Modelleingangsgrößen auf die bekannten betriebsmittel- und prozessspezifischen System- und Stellgrößen gewährleistet. Zudem wurden die Simulationsmodelle auf Basis gängiger kommerzieller Softwareprodukte implementiert und abgesichert. Darüber hinaus wurden Algorithmen entwickelt und umgesetzt, welche auf Basis der System- und Stellgrößen eine vollautomatisierte Modellvorbereitung inklusive der FE-Vernetzung und eine teilautomatisierte Ergebnisauswertung erlauben. Durch die Summe dieser Maßnahmen konnte der erforderliche Aufwand zur Modellbildung und Simulation gering gehalten und die Anwenderfreundlichkeit sichergestellt werden.
- A6 *Allgemeingültigkeit*: Durch die prozessunabhängige Herleitung der Simulationsmethoden und durch deren Verankerung entlang des operativen Technologieplanungsprozesses stellt das Simulationskonzept einen allgemeingültigen Ansatz zur rechnergestützten Gestaltung thermometallurgischer und thermomechanischer Fertigungsprozesse dar. Aufgrund der Tatsache, dass die Simulationsmodelle für den Schleifhärteprozess auf Basis des allgemeingültig konzeptionierten Systemmodells implementiert wurden, können diese effizient und zielgerichtet auf andere Verfahrensvarianten mit geometrisch unbestimmter Schneide und Einsatzszenarios übertragen werden, indem einzelne Teilmodelle modifiziert bzw. ausgetauscht werden. Dabei sind die zugrunde liegenden prozessspezifischen Wirkmechanismen unabhängig von den Simulationsmethoden definiert und beschrieben, wodurch die final für die Implementierung herangezogenen Ansätze frei gewählt und modular kombiniert werden können. Damit genügen sowohl das Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung als auch die implementierten Simulationsmodelle der Forderung nach Allgemeingültigkeit.

## 6.3 Wirtschaftlichkeitsbewertung

### 6.3.1 Szenarios der Prozessgestaltung und Fertigung

Wie in Kapitel 1 ausgeführt, wird die industrielle Anwendung des Schleifhärteprozesses durch das fehlende Prozess-Know-how und den damit verbundenen hohen experimentellen Aufwand zur Parameterauslegung behindert. Unter Einsatz der entwickelten Simulationsmethode kann die Gestaltung des Schleifhärteprozesses rechnergestützt erfolgen, wodurch dieser nachhaltig im industriellen Umfeld verankert werden kann. Im Folgenden wird mithilfe einer Stundensatzrechnung der wirtschaftliche Nutzen der Methode anhand der bereits in Abschnitt 1.1 vorgestellten alternativen Prozessketten zur Fertigung einer randschichtgehärteten Welle analysiert und bewertet. Dabei wird einer

konventionellen Prozesskette, welche auf das Induktionshärtungsverfahren zurückgreift, eine integrierte Prozesskette unter Verwendung des Schleifhärteprozesses gegenübergestellt. Abweichend von den Erläuterungen in Abschnitt 1.1 wurden bei der integrierten Prozesskette sämtliche Schritte unter Verwendung des Schleifhärtens auf einem Dreh-Fräs-Zentrum durchgeführt (vgl. Abbildung 16). Die den folgenden Ausführungen zugrunde liegenden betriebsmittel- und prozessspezifischen System- und Stellgrößen werden in der Publikation (P7), welche das Schleifhärten als Teil einer Komplettbearbeitung auf einem Dreh-Fräs-Zentrum thematisiert (vgl. Abschnitt 5.3.7), erläutert.

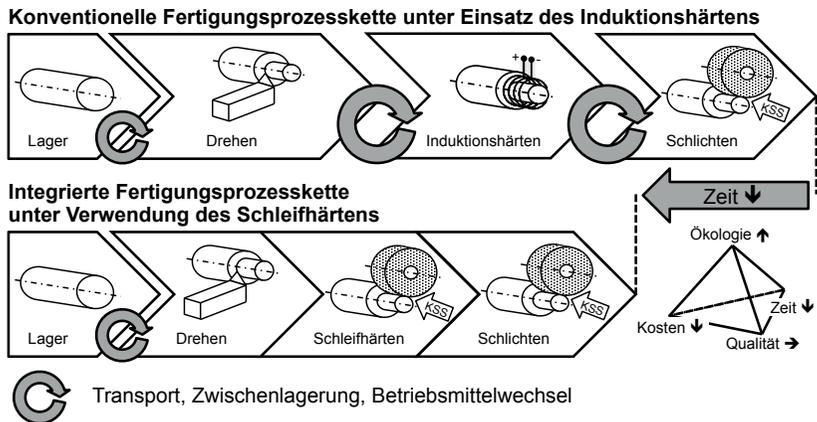


Abbildung 16: Alternative Prozessketten zur Fertigung einer randschichtgehärteten Welle einerseits unter Einsatz des konventionellen Induktionshärtens und andererseits mithilfe des Schleifhärteprozesses als Teil einer Komplettbearbeitung auf einem Dreh-Fräs-Zentrum (in Anlehnung an Abbildung 1 und die Publikation (P7))

Die grundlegende Beschreibung der drei nachfolgend bewerteten Anwendungsszenarios ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Dabei betrachtet das *Szenario 1* die konventionelle Prozesskette (vgl. Abbildung 16 oben), für deren Prozessschritte *Drehen*, *Induktionshärtens* und *Schlichten* jeweils spezielle Betriebsmittel eingesetzt werden. Dadurch wird zwischen den einzelnen Prozessschritten ein Wechsel der Betriebsmittel erforderlich, was zu einem zusätzlichen Aufwand für Transport und Zwischenlagerung führt. Die Auslegung der Fertigungsprozesse erfolgt experimentell.

Die *Szenarios 2 und 3* beleuchten die Fertigung der randschichtgehärteten Welle durch Integration des hybriden Schleifhärteprozesses auf einem Dreh-Fräs-Zentrum (vgl. Abbildung 16 unten). Durch die Komplettbearbeitung auf dem Dreh-Fräs-Zentrum entfallen die Betriebsmittelwechsel zwischen den Pro-

zessschritten *Drehen*, *Schleifhärten* und *Schlichten*, was insbesondere eine Verkürzung der Fertigungsdauer mit sich bringt. Diese beiden Szenarios unterscheiden sich lediglich in dem Aspekt, dass in Szenario 3 der Schleifhärteprozess rechnergestützt gestaltet wird, wodurch im Vergleich zu Szenario 2 insbesondere der erforderliche experimentelle Aufwand reduziert werden kann.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Einsatzszenarios

	<b>Szenario 1</b>	<b>Szenario 2</b>	<b>Szenario 3</b>
Prozesskette	Induktionshärten	Schleifhärten	
Prozesse	Drehen, Induktionshärten, Schlichten	Drehen, Schleifhärten, Schlichten	Drehen, Schleifhärten, Schlichten
Betriebsmittel	Drehmaschine, Induktionshärteanlage, Schleifmaschine	Dreh-Fräs- Zentrum	Dreh-Fräs- Zentrum
Rechnergestützte Prozessgestaltung	nein	nein	ja

Im Rahmen der wirtschaftlichen Bewertung der Szenarios sind alle Kosten, welche bei der Herstellung der randschichtgehärteten Welle verursacht werden, zu ermitteln. Neben den Aufwänden der spanenden Fertigung werden dabei die durch die rechnergestützte Prozessgestaltung und die Qualitätsprüfung entstehenden Kosten berücksichtigt. Daher werden im folgenden Abschnitt 6.3.2 die relevanten Stundensätze der eingesetzten Betriebsmittel sowie der Arbeitsplätze für die Simulation und die Qualitätssicherung aufgestellt. Durch die Verrechnung dieser Stundensätze mit den zugehörigen Zeitaufwänden für die Bearbeitung, die Simulation und die Prüfung kann die Wirtschaftlichkeit der Szenarios miteinander verglichen werden.

### 6.3.2 Stundensatzrechnung und Aufstellung der Zeitaufwände

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Darstellung und Erläuterung sämtlicher quantitativer Eingangsgrößen<sup>30</sup> der Stundensatzrechnung. Diesbezüglich zeigt Tabelle 4 die allgemeinen, szenariounabhängigen Angaben. Den Ausgangspunkt der wirtschaftlichen Bewertung der betrachteten Fertigungsszenarios stellen die

<sup>30</sup> Die im Folgenden aufgeführten quantitativen Eingangsgrößen entstammen zu einem überwiegenden Teil dem Erfahrungswissen des Autors und bilden damit ein fiktives Anwendungsszenario.

Materialeinzelkosten des Halbzeugs dar. Des Weiteren werden verschiedene, unternehmensspezifische Kalkulationswerte, wie z. B. die Gemeinkostenzuschlagssätze, der kalkulatorische Zinssatz und die Energiekosten, in die Berechnung der Stundensätze einbezogen. Die jährlichen Kosten für die Wartung und Instandhaltung der Betriebsmittel sowie der Arbeitsplätze werden über einen prozentualen Anteil der jeweiligen Wiederbeschaffungswerte (vgl. Tabelle 5) berücksichtigt. Neben diesen allgemeinen Angaben fließen die Lohnkosten in die Stundensatzrechnung ein. Dazu wurden die Lohnkosten für einen Ingenieur<sup>31</sup>, einen Techniker und einen Facharbeiter auf Basis allgemeiner, branchenüblicher Gehaltstabellen und unter Einbezug der Lohnnebenkosten zentral ermittelt. Der Ingenieur kommt im vorliegenden Fall bei der rechnergestützten Prozessgestaltung zum Einsatz. Die Qualitätsprüfung wird von einem Techniker durchgeführt. Die Dauer der zerstörenden Qualitätsprüfung je Werkstück ist auf 4 Stunden festgelegt, die Dauer der zerstörungsfreien Prüfung beläuft sich auf eine halbe Stunde. Nachdem die zerstörend geprüften Werkstücke nicht weiter verwendet werden können, werden diese als Ausschussteile deklariert und deren Kosten über alle gefertigten Werkstücke verrechnet. Die Betriebsmittel werden von Facharbeitern bedient, wobei angenommen wird, dass ein Facharbeiter im Durchschnitt zwei Maschinen bzw. Anlagen betreut.

Tabelle 4: Allgemeine Angaben

<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
Materialeinzelkosten (Halbzeug)	€	29,40
Materialgemeinkostenzuschlagssatz	%	5,20
Fertigungsgemeinkostenzuschlagssatz	%	7,50
Verwaltungs- und Vertriebsgemeinkostenzuschlagssatz	%	5,80
Wartungs- und Instandhaltungskostensatz	%	5,00
Kalkulatorischer Zinssatz	%	9,00
Energiekosten	€/kWh	0,15
Lohnkosten Ingenieur (inkl. Lohnnebenkosten)	€/h	54,65
Lohnkosten Techniker (inkl. Lohnnebenkosten)	€/h	41,19
Lohnkosten Facharbeiter (inkl. Lohnnebenkosten)	€/h	35,42
Dauer der zerstörenden Qualitätsprüfung	h/Stück	4,00
Dauer der zerstörungsfreien Qualitätsprüfung	h/Stück	0,50

<sup>31</sup> Aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit die maskuline Form verwendet, wobei selbstredend die feminine Form mit eingeschlossen ist.

Die Tabelle 5 fasst die betriebsmittel- und arbeitsplatzspezifischen Angaben zusammen und präsentiert die resultierenden Stundensätze, welche auf Basis der jährlichen Belegungszeiten sowie der jährlich anfallenden Kosten der Betriebsmittel und Arbeitsplätze ermittelt wurden. Diesbezüglich wird davon ausgegangen, dass auf den Maschinen und Anlagen in einem Zweischichtbetrieb 80 Stunden pro Woche gefertigt wird. Dabei wird 48 Wochen pro Jahr produziert, wobei sich die restlichen 4 Wochen auf die Betriebsferien sowie die Feiertage und Brückentage verteilen. Die Arbeitsplätze für die Simulation und die Qualitätssicherung werden ganzjährig im Rahmen einer 35-Stunden-Woche genutzt. Mithilfe der jeweiligen Wiederbeschaffungswerte und der Abschreibungsdauern lassen sich die jährlichen kalkulatorischen Abschreibungen berechnen. Des Weiteren fließen die Raumkosten und die Energiekosten, welche sich aus dem Raumbedarf sowie der durchschnittlichen Leistungsaufnahme des jeweiligen Betriebsmittels und Arbeitsplatzes ergeben, in die Betrachtungen ein. Die jährlichen Betriebs- und Lizenzkosten werden über Pauschalen einbezogen.

Tabelle 5: Betriebsmittel- und arbeitsplatzspezifische Angaben sowie die resultierenden Stundensätze

Bezeichnung	Einheit	Drehmaschine	Induktionshärteanlage	Schleifmaschine	Dreh-Fräszentrum	Arbeitsplatz Qualität	Arbeitsplatz Simulation
Belegungszeit	h/a	3.840	3.840	3.840	3.840	1.824	1.824
Wiederbeschaffungswert	T€	250	500	450	550	250	7,5
Abschreibungsdauer	a	15	15	15	15	10	3
Raumbedarf	m <sup>2</sup>	20	30	25	30	40	10
Monatliche Raumkosten	€/m <sup>2</sup>	12	12	12	12	15	15
Durchschnittliche Leistungsaufnahme	kW	10,5	80,0	17,5	24,5	2,4	1,2
Betriebs-/Lizenzkosten	T€/a	3	2	15	15	2,5	50
Stundensatz	€/h	13,63	34,70	26,41	31,86	73,59	85,67

Zur Ermittlung der szenarioabhängigen Fertigungskosten werden die in Tabelle 5 dargelegten Stundensätze mit den in Tabelle 6 gezeigten Betriebsmittelzeiten je Werkstück, Prüfintervallen und Simulationsaufwänden verrechnet. Die veranschlagten Werkstückwechselzeiten sind für alle Szenarios und Betriebsmittelwechsel identisch, wobei diese bei den Szenarios 2 und 3, aufgrund der Komplettbearbeitung auf dem Dreh-Fräs-Zentrum, zwischen den einzelnen Prozessschritten entfallen. Hinsichtlich der Drehbearbeitung wird davon ausgegangen, dass, im Gegensatz zur Fertigung auf einer konventionellen Drehmaschine, die Welle im Dreh-Fräs-Zentrum teilweise parallel mit zwei Drehmeißeln bearbeitet werden kann, wodurch sich die Bearbeitungszeiten bei den Szenarios 2 und 3 reduzieren lassen. Die Bearbeitungszeiten für den Härteprozess, d. h. das Induktionshärten beim Szenario 1 bzw. das Schleifhärten bei den Szenarios 2 und 3, sowie das Schlichtschleifen der Welle sind für alle Szenarios identisch.

Tabelle 6: Betriebsmittelzeiten je Werkstück, Prüfintervalle und Simulationsaufwand in Abhängigkeit von den betrachteten Szenarios

Bezeichnung		Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Drehen	Werkstückwechselzeit	min	3	3	3
	Bearbeitungszeit	min	10	7	7
Härten	Werkstückwechselzeit	min	3	-	-
	Bearbeitungszeit	min	4	4	4
Schlichten	Werkstückwechselzeit	min	3	-	-
	Bearbeitungszeit	min	8	8	8
Prüfungen zur Prozessabsicherung (zerstörend)		Stück	10	30	10
Stichproben Qualitätsprüfung (zerstörungsfrei)		%	5	10	5
Stichproben Qualitätsprüfung (zerstörend)		%	1	2	1
Aufwand der rechnergestützten Prozessgestaltung		h	-	-	70

Aufgrund des langjährigen Einsatzes der Fertigungsverfahren des Szenarios 1 und der damit verbundenen Erfahrungen sind im Rahmen der Prozessgestaltung für die Ermittlung von stabilen Prozessparametern und die Prozessabsicherung lediglich wenige zerstörende Qualitätsprüfungen notwendig. Demgegenüber führt das fehlende Prozess-Know-how zu einem erhöhten Aufwand bei der

experimentellen Gestaltung und Absicherung des Schleifhärteprozesses (vgl. Szenario 2). Auch die Prüfintervalle in der anschließenden Produktion müssen beim Szenario 2 aufgrund der vorherrschenden Unsicherheiten im Vergleich zu Szenario 1 halbiert werden. Durch die rechnergestützte Prozessgestaltung des Schleifhärtens im Rahmen des Szenarios 3 kann die Identifikation von stabilen Prozessparametern und deren Absicherung durch die simulative Analyse der prozessspezifischen Phänomene erfolgen. Dadurch lassen sich die für die Prozessabsicherung erforderlichen experimentellen Untersuchungen sowie die stichprobenartigen Qualitätsprüfungen während der laufenden Produktion auf das Niveau des Szenarios 1 senken. Für die rechnergestützte Prozessgestaltung im Rahmen des Szenarios 3 wird für die Modellbildung und Simulation ein Aufwand von 70 Stunden veranschlagt.

### 6.3.3 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die anhand der Angaben in Abschnitt 6.3.2 berechneten Fertigungseinzelkosten der drei betrachteten Szenarios sind in Abbildung 17 in Abhängigkeit der produzierten Stückzahl dargestellt. Da die experimentellen und simulativen Einmalaufwände zur Parameteridentifikation und Absicherung der Prozessketten auf alle gefertigten Werkstücke verrechnet werden, nehmen die Fertigungseinzelkosten szenariounabhängig mit zunehmender Stückzahl ab.

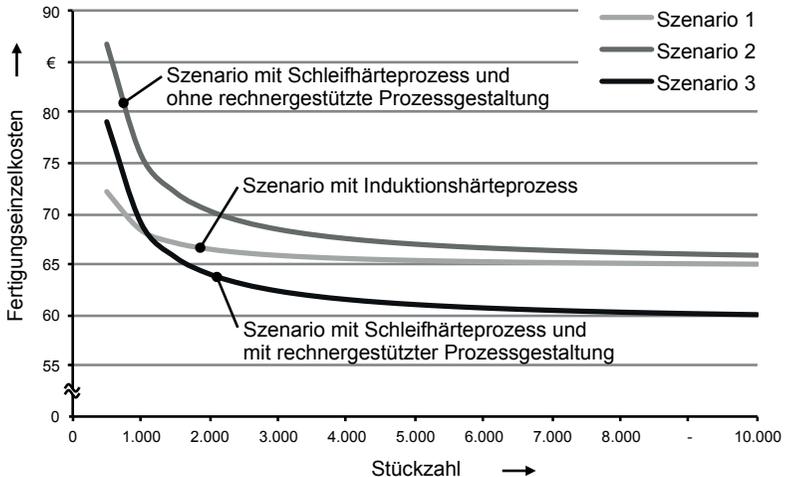


Abbildung 17: Fertigungseinzelkosten der drei betrachteten Szenarios in Abhängigkeit von der produzierten Stückzahl

Aufgrund der im Vergleich zu Szenario 1 zusätzlichen Experimente (vgl. Szenario 2) bzw. Simulationen (vgl. Szenario 3) erfordern die beiden Prozessketten unter Einsatz des Schleifhärtens einen höheren Einmalaufwand. Daher ist die konventionelle Prozesskette unter Verwendung des Induktionshärtens bei sehr geringen Stückzahlen am wirtschaftlichsten. Bei steigenden Stückzahlen nähert sich das Szenario 2, trotz der angenommenen kürzeren Prüfintervalle, den Fertigungseinzelkosten des Szenarios 1 an. Durch die rechnergestützte Gestaltung des Schleifhärteprozesses in Szenario 3 kann der erhöhte Umfang der experimentellen Absicherung und Qualitätsprüfung vermieden werden, wodurch die wirtschaftlichen Potentiale des Schleifhärteprozesses, insbesondere im Rahmen der Komplettbearbeitung auf dem Dreh-Fräs-Zentrum, nutzbar werden. Damit können beim Szenario 3 bereits ab einem Produktionsvolumen von etwa 1.000 Stück die geringsten Fertigungseinzelkosten erreicht werden. Der kostenspezifische Abstand zwischen den beiden Prozessketten könnte durch die rechnerische Berücksichtigung der anfallenden Lager- und Transportkosten zugunsten der Komplettbearbeitung unter Einsatz des Schleifhärteprozesses weiter vergrößert werden.

### 6.4 Fazit

Die im Rahmen der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.2) geforderte Bestätigung des industriellen Nutzens der Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens konnte mit diesem Kapitel erbracht werden. Diesbezüglich stellte Abschnitt 6.2 zunächst das Simulationskonzept, das formale Systemmodell und die implementierten Simulationsmodelle den in Abschnitt 3.3 definierten Anforderungen gegenüber. Die inhaltliche Bewertung anhand des Erfüllungsgrads der Anforderungen belegt die positiven funktionalen Eigenschaften der entwickelten Gesamtmethode. Des Weiteren wird aus der in Abschnitt 6.3 dargelegten Wirtschaftlichkeitsbewertung ersichtlich, dass die rechnergestützte Prozessgestaltung dazu geeignet ist, den wirtschaftlichen Einsatz des Schleifhärteprozesses zu unterstützen. Aufgrund der anforderungsbasierten Qualifizierung der Ansätze und der belegten Wirtschaftlichkeit ermöglicht es die Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung, die technologischen und wirtschaftlichen Potentiale des Schleifhärteprozesses nachhaltig zu erschließen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Die technologischen Potentiale des Schleifhärteprozesses bleiben im industriellen Umfeld aktuell weitestgehend ungenutzt. Dies lässt sich insbesondere durch das fehlende Prozess-Know-how und den damit verbundenen experimentellen Aufwand zur Auslegung und Absicherung der Prozessparameter begründen. Eine Möglichkeit, den Aufwand zur Parameterauslegung zu reduzieren und damit den Schleifhärteprozess für den industriellen Einsatz zu qualifizieren, ist die Etablierung einer simulationsgestützten Prozessgestaltung. Allerdings sind die bekannten schleifspezifischen Simulationsansätze nicht geeignet, die thermometallurgischen und thermomechanischen Prozessphänomene beim Schleifhärten in einem erforderlichen Maß abzubilden. Beim überwiegenden Anteil der bisher publizierten Methoden zur Modellierung und Simulation des Schleifhärteprozesses handelt es sich um Insellösungen, welche für spezifische Fragestellungen im Forschungsumfeld entwickelt und eingesetzt wurden. Diese zumeist Finite-Elemente-basierten Ansätze sind für einen industriellen Einsatz lediglich eingeschränkt qualifiziert, da sie zumeist wenig anwendungsfreundlich und relativ ineffizient sind. Zudem lassen sich diese nicht durchgängig und phasenadäquat in die bestehenden Abläufe der operativen Technologieplanung integrieren.

In diesem Zusammenhang wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein allgemeingültiges Konzept zur rechnergestützten Prozessgestaltung vorgestellt, welches definierte phasenspezifische und -gerechte Simulationsmodelle entlang des operativen Technologieplanungsprozesses positioniert. Zur Konzepterstellung wurden auf Basis der allgemeinen Aufgaben der Prozessgestaltung im Kontext der operativen Technologieplanung zunächst die Anforderungen an den Einsatz der rechnergestützten Methoden abgeleitet. Anhand der definierten Anforderungen wurden geeignete Simulationsmodelle ausgewählt und phasengerecht entlang des operativen Technologieplanungsprozesses eingeordnet. Durch die phasenadäquate Bereitstellung von geeigneten Simulationsmodellen kann eine effiziente rechnergestützte Prozessgestaltung gewährleistet werden. Zur Prognose der thermometallurgischen und thermomechanischen Effekte beim Schleifhärten werden in den frühen Phasen dreidimensionale analytische Ansätze herangezogen, welche sich bei einer hinreichenden Ergebnisgüte durch einen geringen Aufwand zur Lösung der analytischen Prozessbeschreibung auszeichnen. In den späten Phasen der operativen Technologieplanung werden die Prozessphänomene anhand von Finite-Elemente-basierten Simulationsmodellen

berechnet. Diese weisen eine hohe Prognosegüte auf und erlauben eine umfassende Beurteilung der dreidimensionalen transienten Effekte im Werkstück. Der im Vergleich zu den analytischen Modellen hohe Aufwand zur Modellerstellung und Simulation wird durch die Umsetzung einer vollautomatisierten Finite-Elemente-basierten Modellgenerierung gering gehalten. Die phasenadäquaten Eigenschaften der entwickelten und umgesetzten Simulationsmodelle ermöglichen eine durchgängige simulative Unterstützung der operativen Technologieplanung, von den ersten Machbarkeitsstudien und Prozessfensteranalysen bis hin zur Feinauslegung und Optimierung der betrachteten Verfahrensvarianten.

Die Umsetzung der Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung sowie der integrierten Simulationsmodelle orientiert sich dabei am allgemeinen Vorgehen zur Durchführung einer Simulationsstudie. In einem *ersten Schritt* wurde ein formales Systemmodell aufgebaut, welches die prozessspezifischen System- und Stellgrößen über gekoppelte Systemelemente mit den Ziel- und Ergebnisgrößen verbindet. Dabei bilden die definierten Systemelemente sämtliche thermomechanischen und thermomechanischen Phänomene des Schleifhärteprozesses sowie deren Wechselwirkungen mit dem notwendigen Abstraktionsgrad ab. Basierend auf dem formalen Systemmodell des Schleifhärtens wurden im *zweiten Schritt* die phasenspezifischen und -gerechten Simulationsmodelle implementiert und verifiziert. Die detaillierte Erläuterung der entwickelten analytischen und Finite-Elemente-basierten Teil- und Simulationsmodelle erfolgte anhand von sieben in die Arbeit eingebundenen Publikationen. Neben der Herleitung und Verifikation der spezifischen Teilmodelle befassen sich diese mit der rechnergestützten Analyse und Auslegung von verschiedenen Verfahrensvarianten des Schleifhärteprozesses. Des Weiteren wurden in einem *dritten Schritt* anhand eines industriellen Anwendungsszenarios der Einsatz und die Validierung der Simulationsmodelle thematisiert. Diesbezüglich wurden die Simulationsmodelle zur rechnergestützten Auslegung der Fertigungsparameter sowie zur Optimierung der Einstechstrategie eines Außenrundsleifhärteprozesses herangezogen. Damit wurde die Integration dieser Verfahrensvariante in eine Prozesskette zur Komplettbearbeitung einer Randschichtgehärteten Welle auf einem Dreh-Fräszentrum unterstützt.

Diese integrierte Fertigungsprozesskette unter Verwendung des Schleifhärtens wurde im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbewertung einer konventionellen Prozesskette gegenübergestellt. Durch die rechnergestützte Prozessgestaltung können zusätzliche Aufwände zur experimentellen Prozessauslegung umgangen und damit die wirtschaftlichen Vorteile einer Randschichthärtung unter Einsatz des Schleifhärteprozesses genutzt werden. Zudem wurden das entwickelte Simulationskonzept, das erstellte formale Systemmodell und die abgeleiteten Simulationsmodelle an den zu Beginn gestellten Anforderungen gespiegelt.

Durch die umfassende Bewertung der gesamten Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung konnten deren Potentiale sowohl funktional als auch wirtschaftlich bestätigt werden. Damit bildet die hier entwickelte Methode die Grundlage zur wirtschaftlichen industriellen Anwendung des Schleifhärteprozesses und zur Erschließung der damit einhergehenden technologischen Potentiale.

## 7.2 Ausblick

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärteprozesses wurde mit dem Anspruch entwickelt, ein allgemeingültiger Ansatz für die rechnergestützte Auslegung von thermometallurgischen und thermomechanischen Fertigungsprozessen entlang des operativen Technologieplanungsprozesses zu sein. Diesbezüglich sollten zukünftige Forschungsarbeiten analysieren, ob die erläuterte Methode geeignet ist, bekannte Simulationsmodelle zur Beschreibung von thermischen Fertigungsverfahren, wie z. B. Laserstrahlschweißen oder Induktionshärten, in den operativen Technologieplanungsprozess zu integrieren. Gegebenenfalls sollte das beschriebene Simulationskonzept entsprechend den neu identifizierten zusätzlichen Anforderungen angepasst und damit weiterentwickelt werden.

Neben der allgemeinen Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung eröffnet auch das entwickelte formale Systemmodell neue Möglichkeiten für dieses Themengebiet. Zur kontinuierlichen Erweiterung des Prozess-Know-hows sollten zunächst die anhand von spezifischen Anwendungsfällen implementierten Teil- und Simulationsmodelle auf weitere Verfahrensvarianten des Schleifhärtens, wie z. B. das Innenrundsleifhärten, das Verzahnungssleifhärten und das Profilsleifhärten, übertragen werden. Anschließend ist zu betrachten, inwieweit die schleifhärtespezifischen Simulationskonzepte dabei unterstützen können, bestehende Modelle zur Beschreibung von konventionellen Schleifprozessen zu verbessern. Insbesondere der umgesetzte neuartige Ansatz zur dreidimensionalen analytischen Beschreibung der thermometallurgischen Randzoneneffekte beim Schleifen und Schleifhärten bietet viele Potentiale zur effizienten Analyse und Prognose des Prozessverhaltens von Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Aufgrund der kurzen Rechenzeiten und durch die alleinige Nutzung von System- und Stellgrößen als Eingangsgrößen ist es beispielsweise denkbar, die analytischen Simulationsmodelle für Prozessoptimierungen oder für die In-Process-Regelung an spanenden Werkzeugmaschinen einzusetzen.



## Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.

ACHT ET AL. 2008a

Acht, C.; Dalgic, M.; Frerichs, F.; Hunkel, M.; Irretier, A.; Lübben, T.; Surm, H.: Ermittlung der Materialdaten zur Simulation des Durchhärtens von Komponenten aus 100Cr6: Teil 1. Journal of Heat Treatment and Materials (Härtereitechnische Mitteilungen) 63 (2008) 5, S. 234–244.

ACHT ET AL. 2008b

Acht, C.; Dalgic, M.; Frerichs, F.; Hunkel, M.; Irretier, A.; Lübben, T.; Surm, H.: Ermittlung der Materialdaten zur Simulation des Durchhärtens von Komponenten aus 100Cr6: Teil 2. Journal of Heat Treatment and Materials (Härtereitechnische Mitteilungen) 63 (2008) 6, S. 362–371.

ANDERSON ET AL. 2008

Anderson, D.; Warkentin, A.; Bauer, R.: Experimental Validation of Numerical Thermal Models for Dry Grinding. Journal of Materials Processing Technology 204 (2008) 1/2/3, S. 269–278.

AVRAMI 1939

Avrami, M.: Kinetics of Phase Change: I – General Theory. Journal of Chemical Physics 7 (1939) o.Nr., S. 1103–1112.

AVRAMI 1940

Avrami, M.: Kinetics of Phase Change: II – Transformation-Time Relations for Random Distribution of Nuclei. Journal of Chemical Physics 8 (1940) o.Nr., S. 212–224.

AVRAMI 1941

Avrami, M.: Kinetics of Phase Change: III – Granulation, Phase Change, and Microstructure. Journal of Chemical Physics 9 (1941) o.Nr., S. 177–184.

BAEHR & STEPHAN 2010

Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Heidelberg: Springer 2010.

BARGEL ET AL. 2005

Bargel, H.-J.; Hilbrans, H.; Hübner, K.-H.; Krüger, O.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Berlin: Springer 2005.

BATHE 2002

Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methode. Berlin: Springer 2002.

BIERMANN & SCHNEIDER 1997

Biermann, D.; Schneider, M.: Modeling and Simulation of Workpiece Temperature in Grinding by Finite Element Analysis. *Machining Science and Technology* 1 (1997) 2, S. 173–183.

BLONDEAU ET AL. 1973

Blondeau, R.; Maynier, P.; Dollet, J.: Préviation de la dureté et de la résistance des aciers au carbone et faiblement alliés d'après leur structure et leur composition. *Les Mémoires Scientifiques de la Revue de Métallurgie* 70 (1973) 12, S. 883–892.

BRANDIN 1978

Brandin, H.: Pendelschleifen und Tiefschleifen: Vergleichende Untersuchungen beim Schleifen von Rechteckprofilen. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Braunschweig: Eigenverlag 1978.

BRINKSMEIER 1982

Brinksmeier, E.: Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke. Dissertation Universität Hannover. Düsseldorf: VDI 1982. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 50).

BRINKSMEIER 1990

Brinksmeier, E.: Eigenspannungsanalyse zur Prozeßgestaltung beim Schleifen. *Journal of Heat Treatment and Materials (Härterei-Technische Mitteilungen)* 45 (1990) 6, S. 348–355.

BRINKSMEIER 1991

Brinksmeier, E.: Prozeß- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung. Habilitation Universität Hannover. Düsseldorf: VDI 1991. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 234).

BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1994

Brinksmeier, E.; Brockhoff, T.: Randschicht-Wärmebehandlung durch Schleifen. *Journal of Heat Treatment and Materials (Härterei-Technische Mitteilungen)* 49 (1994) 5, S. 327–330.

**BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1996a**

Brinksmeier, E.; Brockhoff, T.: Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 45 (1996) 1, S. 283–286.

**BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1996b**

Brinksmeier, E.; Brockhoff, T.: Integrierte Wärmebehandlung durch spanende Bearbeitung. *Journal of Heat Treatment and Materials (Härtereitechnische Mitteilungen)* 51 (1996) 3, S. 176–181.

**BRINKSMEIER & BROCKHOFF 1997**

Brinksmeier, E.; Brockhoff, T.: Spanende Kurzzeitmetallurgie: Kurzzeitmetallurgische Effekte in der Hartbearbeitung. *wt Werkstattstechnik* 87 (1997) 9/10, S. 463–466.

**BRINKSMEIER & SÖLTER 2009**

Brinksmeier, E.; Sölter, J.: Prediction of Shape Deviations in Machining. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 58 (2009) 1, S. 507–510.

**BRINKSMEIER ET AL. 2003**

Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Böhm, C.; Wilke, T.: Simulation of the Temperature Distribution and Metallurgical Transformations in Grinding by Using the Finite-Element-Method. *Production Engineering – Research and Development (WGP Annals)* 10 (2003) 1, S. 9–14.

**BRINKSMEIER ET AL. 2005**

Brinksmeier, E.; Minke, E.; Wilke, T.: Investigations on Surface Layer Impact and Grinding Wheel Performance for Industrial Grind-Hardening Applications. *Production Engineering – Research and Development (WGP Annals)* 12 (2005) 1, S. 35–40.

**BRINKSMEIER ET AL. 2006**

Brinksmeier, E.; Aurich, J. C.; Govekar, E.; Heinzl, C.; Hoffmeister, H.-W.; Klocke, F.; Peters, J.; Rentsch, R.; Stephenson, D. J.; Uhlmann, E.; Weinert, K.; Wittmann, M.: Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 55 (2006) 2, S. 667–696.

**BROCKHOFF 1999a**

Brockhoff, T.: Grind-Hardening: A Comprehensive View. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 48 (1999) 1, S. 255–260.

BROCKHOFF 1999b

Brockhoff, T.: Schleifprozesse zur martensitischen Randschichthärtung von Stählen. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Shaker 1999. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 1).

BROCKHOFF & BRINKSMEIER 1999

Brockhoff, T.; Brinksmeier, E.: Prozessintegrierte Wärmebehandlung durch Schleifhärten. *Journal of Heat Treatment and Materials (Härterei-Technische Mitteilungen)* 54 (1999) 2, S. 117–122.

CARSLAW & JAEGER 1959

Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. London: Oxford University Press 1959.

CHEN & ROWE 1996

Chen, X.; Rowe, W. B.: Analysis and Simulation of the Grinding Process: Part 2 – Mechanics of Grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36 (1996) 8, S. 883–896.

CHEN ET AL. 2000

Chen, X.; Rowe, W. B.; McCormack, D. F.: Analysis of the Transitional Temperature for Tensile Residual Stress in Grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 107 (2000) 1/2/3, S. 216–221.

CHOI 1986

Choi, H.-Z.: Beitrag zur Ursachenanalyse der Randzonenbeeinflussung beim Schleifen. Dissertation Universität Hannover. Düsseldorf: VDI 1986. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 119).

CHRYSSOLOURIS ET AL. 2005

Chryssolouris, G.; Tsirbas, K.; Salonitis, K.: An Analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind-Hardening. *Journal of Manufacturing Processes* 7 (2005) 1, S. 1–9.

DENKENA & TÖNSHOFF 2011

Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: *Spanen: Grundlagen*. Heidelberg: Springer 2011.

DENKENA ET AL. 2003

Denkena, B.; Jung, M.; Müller, C.; Walden, L.: Charakterisierung weißer Schichten nach mechanischer und thermischer Einwirkung durch Fertigungsverfahren. *Journal of Heat Treatment and Materials (Härterei-Technische Mitteilungen)* 58 (2003) 4, S. 211–217.

## DESRIUSSEAUX &amp; ZERKLE 1970a

DesRuisseaux, N. R.; Zerkle, R. D.: Thermal Analysis of the Grinding Process. *Journal of Engineering for Industry (ASME Transactions)* 92 (1970) 2, S. 428–434.

## DESRIUSSEAUX &amp; ZERKLE 1970b

DesRuisseaux, N. R.; Zerkle, R. D.: Temperature in Semi-Infinite and Cylindrical Bodies Subjected to Moving Heat Sources and Surface Cooling. *Journal of Heat Transfer (ASME Transactions)* 92 (1970) 3, S. 456–464.

## DIN 8589-11 2003

DIN 8589-11: Fertigungsverfahren Spanen: Schleifen mit rotierendem Werkzeug – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 2003.

## DOMAN ET AL. 2009

Doman, D. A.; Warkentin, A.; Bauer, R.: Finite Element Modeling Approaches in Grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49 (2009) 2, S. 109–116.

## DUSCHA ET AL. 2011a

Duscha, M.; Eser, A.; Klocke, F.; Broeckmann, C.; Wegner, H.; Bezold, A.: Modeling and Simulation of Phase Transformation During Grinding. *Advanced Materials Research* 223 (2011) o. Nr., S. 743–753.

## DUSCHA ET AL. 2011b

Duscha, M.; Klocke, F.; Wegner, H.: Residual Stress Model for Speed-Stroke Grinding of Hardened Steel with CBN Grinding Wheels. *International Journal of Automation Technology* 5 (2011) 3, S. 439–444.

## ECKEBRECHT 2000

Eckebrecht, J.: Umweltverträgliche Gestaltung von spanenden Fertigungsverfahren: Forschungsansätze und Wissenstransfer. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Shaker 2000. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 3).

## EHRLENSPIEL 2007

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München: Hanser 2007.

## EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 1: Grundlagen. Düsseldorf: VDI 1996.

EVERSHEIM 1997

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3: Arbeitsvorbereitung. Berlin: Springer 1997.

EVERSHEIM 1998

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 2: Konstruktion. Berlin: Springer 1998.

EVERSHEIM & SCHUH 1996

Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management: Betriebshütte. Berlin: Springer 1996.

FÖCKERER ET AL. 2009

Föckerer, T.; Huntemann, J.-W.; Heinzel, C.; Brinksmeier, E.; Zäh, M. F.: Einfluss der Wärmequellenmodellierung auf die Simulation der Einhärtetiefe und der Bauteilverzüge beim Schleifhärteprozess. In: Hildebrand, J.; Loose, T.; Gittens, A. (Hrsg.): Tagungsband SYSWELD-Forum 2009. Weimar: Universitätsverlag 2009. S. 205–220.

FOECKERER ET AL. 2009

Foeckerer, T.; Huntemann, J.-W.; Heinzel, C.; Brinksmeier, E.; Zaeh, M. F.: Simulation of Part Distortions Resulting from Heat Input During Grind-Hardening. In: NAFEMS (Hrsg.): NAFEMS World Congress 2009: The Analysis Advantage – Perspectives on Engineering Simulation for Today and Beyond. Glasgow: NAFEMS 2009. 12-seitige elektronische Publikation.

FOECKERER ET AL. 2010

Foeckerer, T.; Huntemann, J.-W.; Heinzel, C.; Brinksmeier, E.; Zaeh, M. F.: Experimental and Numerical Analysis of the Influences on Part Distortion as a Result of the Grind-Hardening Process. In: Teti, R. (Hrsg.): 7<sup>th</sup> CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2010): Innovative and Cognitive Production Technology and Systems. Neapel: University of Naples 2010. 4-seitige elektronische Publikation.

FOECKERER ET AL. 2012

Foeckerer, T.; Kolkwitz, B.; Heinzel, C.; Zaeh, M. F.: Experimental and Numerical Analysis of Transient Behavior During Grind-Hardening of AISI 52100. Production Engineering – Research and Development (WGP Annals) 6 (2012) 6, S. 559–568.

## FOECKERER ET AL. 2013

Foeckerer, T.; Zaeh, M. F.; Zhang, O. B.: A Three-Dimensional Analytical Model to Predict the Thermo-Metallurgical Effects within the Surface Layer During Grinding and Grind-Hardening. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 56 (2013) 1/2, S. 223–237.

## FRICKER ET AL. 2004

Fricker, D. C.; Pearce, T. R. A.; Harrison, A. J. L.: Predicting the Occurrence of Grind-Hardening in Cubic Boron Nitride Grinding of Crankshaft Steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B: Journal of Engineering Manufacture* 218 (2004) 10, S. 1339–1356.

## FRITZ &amp; SCHULZE 2010

Fritz, A. H.; Schulze, G.: *Fertigungstechnik*. Heidelberg: Springer 2010.

## GNIELINSKI ET AL. 2006

Gnielinski, V.; Kabelac, S.; Kind, M.; Martin, H.; Mewes, D.; Schaber, K.; Stephan, P.: *VDI-Wärmeatlas*. Berlin: Springer 2006.

## GROF 1977

Grof, H. E.: Beitrag zur Klärung des Trennvorganges beim Schleifen von Metallen. Dissertation Technische Universität München. München: Eigenverlag 1977.

## GROTE &amp; FELDHUSEN 2007

Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer 2007.

## GRUM 2001

Grum, J.: A Review of the Influence of Grinding Conditions on Resulting Residual Stresses After Induction Surface Hardening and Grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 114 (2001) 3, S. 212–226.

## GUO &amp; MALKIN 1995

Guo, C.; Malkin, S.: Analysis of Energy Partition in Grinding. *Journal of Engineering for Industry (ASME Transactions)* 117 (1995) 1, S. 55–61.

## GUO ET AL. 1999

Guo, C.; Wu, Y.; Varghese, V.; Malkin, S.: Temperatures and Energy Partition for Grinding with Vitrified CBN Wheels. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 48 (1999) 1, S. 247–250.

## HAASEN 1994

Haasen, P.: *Physikalische Metallkunde*. Berlin: Springer 1994.

HAHN 1962

Hahn, R. S.: On the Nature of the Grinding Process. In: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Machine Tool Design and Research Conference, Birmingham 1962. S. 129–154.

HAMDI ET AL. 2004

Hamdi, H.; Zahouani, H.; Bergheau, J.-M.: Residual Stresses Computation in a Grinding Process. Journal of Materials Processing Technology 147 (2004) 3, S. 277–285.

HAN ET AL. 2007

Han, Z.; Zhang, N.; Gao, D.; Yang, G.: Research into Grinding-Hardening of Microalloyed Non-Quenched and Tempered Steel. Journal of China University of Mining and Technology 17 (2007) 2, S. 238–241.

HEESS 2003

Heeß, K.: Maß- und Formänderungen infolge Wärmebehandlung von Stählen: Grundlagen – Ursachen – Praxisbeispiele. Renningen: Expert 2003.

HEINZEL 1999

Heinzel, C.: Methoden zur Untersuchung und Optimierung der Kühlschmierung beim Schleifen. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Shaker 1999. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 2).

HEINZEL 2009

Heinzel, C.: Schleifprozesse verstehen: Zum Stand der Modellbildung und Simulation sowie unterstützender experimenteller Methoden. Habilitation Universität Bremen. Aachen: Shaker 2009. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 47).

HINTON 1992

Hinton, E.: NAFEMS Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. Glasgow: NAFEMS 1992.

HORNBOGEN ET AL. 2008

Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.: Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften. Berlin: Springer 2008.

HYATT ET AL. 2013

Hyatt, G.; Mori, M.; Foeckerer, T.; Zaeh, M. F.; Niemeyer, N.; Duscha, M.: Integration of Heat Treatment into the Process Chain of a Mill Turn Center by Enabling External Cylindrical Grind-Hardening. Production Engineering – Research and Development (WGP Annals) 7 (2013) 6, S. 571–584.

## IWANOW ET AL. 1993

Iwanow, W.; Postnych, A.; Kotow, A.; Iwankin, W.; Tschekalkin, A.; Chronusow, W.: Beitrag zur Temperatur- und Spannungsberechnung beim Schleifen. In: Saljé, E.; Westkämper, E. (Hrsg.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Essen: Vulkan 1993. S. 1–19.

## JAEGER 1942

Jaeger, J. C.: Moving Sources of Heat and the Temperature of Sliding Contacts. *Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales* 76 (1942) 3, S. 203–224.

## JIN &amp; CAI 2001

Jin, T.; Cai, G. Q.: Analytical Thermal Models of Oblique Moving Heat Source for Deep Grinding and Cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering (ASME Transactions)* 123 (2001) 2, S. 185–190.

## JIN &amp; STEPHENSON 2003

Jin, T.; Stephenson, D. J.: Investigation of the Heat Partitioning in High Efficiency Deep Grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003) 11, S. 1129–1134.

## JIN &amp; STEPHENSON 2004

Jin, T.; Stephenson, D. J.: Three Dimensional Finite Element Simulation of Transient Heat Transfer in High Efficiency Deep Grinding. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 53 (2004) 1, S. 259–262.

## JIN &amp; STEPHENSON 2006

Jin, T.; Stephenson, D. J.: Heat Flux Distributions and Convective Heat Transfer in Deep Grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006) 14, S. 1862–1868.

## JIN &amp; STEPHENSON 2008

Jin, T.; Stephenson, D. J.: A study of the Convection Heat Transfer Coefficients of Grinding Fluids. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 57 (2008) 1, S. 367–370.

## JIN ET AL. 2002

Jin, T.; Rowe, W. B.; McCormack, D.: Temperatures in Deep Grinding of Finite Workpieces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (2002) 1, S. 53–59.

## JOHNSON &amp; MEHL 1939

Johnson, W. A.; Mehl, R. F.: Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 135 (1939) o. Nr., S. 416–458.

KESSLER ET AL. 1998

Keßler, O.; Brockhoff, T.; Hoffmann, F.; Brinksmeier, E.; Mayr, P.: Maß- und Formänderung bei der Randschichtwärmebehandlung durch Schleifen. *Journal of Heat Treatment and Materials (Härtereitechnische Mitteilungen)* 53 (1998) 1, S. 9–13.

KIM ET AL. 1997

Kim, N. K.; Guo, C.; Malkin, S.: Heat Flux Distribution and Energy Partition in Creep-Feed Grinding. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 46 (1997) 1, S. 227–232.

KLOCKE & KÖNIG 2005

Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen*. Berlin: Springer 2005.

KLOCKE ET AL. 2005

Klocke, F.; Brinksmeier, E.; Weinert, K.: Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 54 (2005) 2, S. 22–45.

KLOCKE ET AL. 2006

Klocke, F.; Zeppenfeld, C.; Nachmani, Z.: Schnellhubschleifen: Mechanische und thermische Energiebilanzen. *wt Werkstattstechnik online* 96 (2006) 6, S. 366–371.

KOISTINEN & MARBURGER 1959

Koistinen, D. P.; Marburger, R. E.: A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels. *Acta Metallurgica* 7 (1959) o. Nr., S. 59–60.

KOLKWITZ ET AL. 2011a

Kolkwitz, B.; Foeckerer, T.; Heinzel, C.; Zaeh, M. F.; Brinksmeier, E.: Experimental and Numerical Analysis of the Surface Integrity Resulting from Outer-Diameter Grind-Hardening. *Procedia Engineering* 19 (2011), S. 222–227. (zugleich Beitrag zur 1<sup>st</sup> CIRP Conference on Surface Integrity (CSI 2012)).

KOLKWITZ ET AL. 2011b

Kolkwitz, B.; Foeckerer, T.; Huntemann, J.-W.; Heinzel, C.; Zaeh, M. F.; Brinksmeier, E.: Identification and Analysis of Part Distortion Resulting from Grind-Hardening Process Using Computer-Based Methods. In: Zoch, H.-W.; Lübben, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Distortion Engineering (IDE 2011)*. Bremen: Universität Bremen 2011. S. 499–506.

## KUO &amp; LIN 2006

Kuo, W. L.; Lin, J. F.: General Temperature Rise Solution for a Moving Plane Heat Source Problem in Surface Grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 31 (2006) 3/4, S. 268–277.

## LÄPPLE 2003

Läpple, V.: Wärmebehandlung des Stahls: Grundlagen, Verfahren und Werkstoffe. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel 2003.

## LAVINE 1988

Lavine, A. S.: A Simple Model for Convective Cooling During the Grinding Process. *Journal of Engineering for Industry (ASME Transactions)* 110 (1988) 1, S. 1–6.

## LAVINE &amp; JEN 1991a

Lavine, A. S.; Jen, T.-C.: Coupled Heat Transfer to Workpiece, Wheel, and Fluid in Grinding, and the Occurrence of Workpiece Burn. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 34 (1991) 4/5, S. 983–992.

## LAVINE &amp; JEN 1991b

Lavine, A. S.; Jen, T.-C.: Thermal Aspects of Grinding: Heat Transfer to Workpiece, Wheel, and Fluid. *Journal of Heat Transfer (ASME Transactions)* 113 (1991) 2, S. 296–303.

## LEBLOND &amp; DEVAUX 1984

Leblond, J. B.; Devaux, J.: A New Kinematic Model for Anisothermal Metallurgical Transformations in Steels Including Effect of Austenite Grain Size. *Acta Metallurgica* 32 (1984) 1, S. 137–146.

## LESLIE 1981

Leslie, W. C.: *The Physical Metallurgy of Steels*. New York: McGraw-Hill 1981.

## LEWIS ET AL. 1996

Lewis, R. W.; Morgan, K.; Thomas, H. R.; Seetharamu, K. N.: *The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis*. Chichester: Wiley 1996.

## LI &amp; LI 2005

Li, J.; Li, J. C. M.: Temperature Distribution in Workpiece During Scratching and Grinding. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials – Properties, Microstructure and Processing* 409 (2005) 1/2, S. 108–119.

LI ET AL. 2008

Li, S.; Xiao, B.; Qin, S.; Song, Z.; Su, H.; Gong, H.: Investigation on Simulation for Grind-Hardening Temperature Field of Non-Quenched and Tempered Steel. *Key Engineering Materials* 375/376 (2008) o.Nr., S. 520–524.

LIAO ET AL. 2000

Liao, Y. S.; Luo, S. Y.; Yang, T. H.: A Thermal Model of the Wet Grinding Process. *Journal of Materials Processing Technology* 101 (2000) 1/2/3, S. 137–145.

LIEDTKE & JÖNSSON 2004

Liedtke, D.; Jönsson, R.: *Wärmebehandlung: Grundlagen und Anwendungen für Eisenwerkstoffe*. Renningen: Expert 2004.

LIU ET AL. 2006

Liu, J. D.; Wang, G. C.; Wang, Z.; Fan, S. T.: Experimental Research on Grind-Hardening of 65Mn Steel. *Materials Science Forum* 505/506/507 (2006) o.Nr., S. 787–792.

LIU ET AL. 2007

Liu, J. D.; Wang, G. C.; Wang, B. L.; Chen, K. M.: Study on the Formation of Grind-Hardening of Steel AISI 1066. *Key Engineering Materials* 329 (2007) o.Nr., S. 57–62.

LORTZ 1975

Lortz, W.: *Schleifscheibentopographie und Spanbildungsmechanismen beim Schleifen*. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Eigenverlag 1975.

LOWIN 1980

Lowin, R.: *Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück*. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Eigenverlag 1980.

MAHDI & ZHANG 1995

Mahdi, M.; Zhang, L.: The Finite Element Thermal Analysis of Grinding Processes by ADINA. *Computers and Structures* 56 (1995) 2/3, S. 313–320.

MAHDI & ZHANG 1998

Mahdi, M.; Zhang, L.: Applied Mechanics in Grinding: Part 6 – Residual Stresses and Surface Hardening by Coupled Thermo-Plasticity and Phase Transformation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38 (1998) 10/11, S. 1289–1304.

MAHDI & ZHANG 1999

Mahdi, M.; Zhang, L.: Applied Mechanics in Grinding: Part 7 – Residual Stresses Induced by the Full Coupling of Mechanical Deformation, Thermal Deformation and Phase Transformation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 39 (1999) 8, S. 1285–1298.

MAHDI & ZHANG 2000

Mahdi, M.; Zhang, L.: A Numerical Algorithm for the Full Coupling of Mechanical Deformation, Thermal Deformation and Phase Transformation in Surface Grinding. *Computational Mechanics* 26 (2000) 2, S. 148–156.

MAKSOU D 2005

Maksoud, T. M. A.: Heat Transfer Model for Creep-Feed Grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005) 3, S. 448–463.

MALKIN 1974

Malkin, S.: Thermal Aspects of Grinding: Part 2 – Surface Temperatures and Workpiece Burn. *Journal of Engineering for Industry (ASME Transactions)* 96 (1974) 4, S. 1184–1191.

MALKIN & ANDERSON 1974

Malkin, S.; Anderson, R. B.: Thermal Aspects of Grinding: Part 1 – Energy Partition. *Journal of Engineering for Industry (ASME Transactions)* 96 (1974) 4, S. 1177–1183.

MALKIN & GUO 2007

Malkin, S.; Guo, C.: Thermal Analysis of Grinding. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 56 (2007) 2, S. 760–782.

MALKIN & GUO 2008

Malkin, S.; Guo, C.: *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York: Industrial Press 2008.

MAMALIS ET AL. 2003a

Mamalis, A. G.; Kunderák, J.; Manolakos, D. E.; Gyáni, K.; Markopoulos, A.: Thermal Modelling of Surface Grinding Using Implicit Finite Element Techniques. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21 (2003) 12, S. 929–934.

MAMALIS ET AL. 2003b

Mamalis, A. G.; Kunderák, J.; Manolakos, D. E.; Gyani, K.; Markopoulos, A.; Horvath, M.: Effect of the Workpiece Material on the Heat Affected Zones During Grinding: A Numerical Simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 22 (2003) 11/12, S. 761–767.

MASSLOW 1952

Masslow, E. N.: Grundlagen der Theorie des Metallschleifens. Berlin: Verlag Technik 1952.

NACHMANI 2008

Nachmani, Z.: Randzonenbeeinflussung beim Schnellhubschleifen. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Apprimus 2008.

NEUGEBAUER ET AL. 2008

Neugebauer, R.; Blau, P.; Harzbecker, C.; Weidlich, D.: Ressourceneffiziente Maschinen- und Prozessgestaltung. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Zerspanung in Grenzbereichen: 5. Chemnitzer Produktionstechnisches Kolloquium (CPK 2008). Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2008. S. 49–68.

NGUYEN & ZHANG 2010

Nguyen, T.; Zhang, L. C.: Grinding-Hardening Using Dry Air and Liquid Nitrogen: Prediction and Verification of Temperature Fields and Hardened Layer Thickness. International Journal of Machine Tools and Manufacture 50 (2010) 10, S. 901–910.

NGUYEN & ZHANG 2011

Nguyen, T.; Zhang, L. C.: Realisation of Grinding-Hardening in Workpieces of Curved Surfaces: Part 1 – Plunge Cylindrical Grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture 51 (2011) 4, S. 309–319.

NGUYEN ET AL. 2007

Nguyen, T.; Zarudi, I.; Zhang, L. C.: Grinding-Hardening with Liquid Nitrogen: Mechanisms and Technology. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (2007) 1, S. 97–106.

NIEMANN ET AL. 2005

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Maschinenelemente: Band 1 – Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Berlin: Springer 2005.

NOYEN 2008

Noyen, M.: Analyse der mechanischen Belastungsverteilung in der Kontaktzone beim Längs-Umfangs-Planschleifen. Dissertation Technische Universität Dortmund. Essen: Vulkan 2008. (Schriftenreihe des ISF, Band 44).

## ORLICH ET AL. 1973

Orlich, J.; Rose, A.; Wiest, P.: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle: Band 3 Zeit-Temperatur-Austenitisierung-Schaubilder. Düsseldorf: Stahl Eisen 1973.

## OUTWATER &amp; SHAW 1952

Outwater, J. O.; Shaw, M. C.: Surface Temperatures in Grinding. Journal of Engineering for Industry (ASME Transactions) 74 (1952) o. Nr., S. 73–86.

## PAPADAKIS 2008

Papadakis, L.: Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2008. (Forschungsberichte *iwb*, Band 218).

## PREKEL ET AL. 2003

Prekel, H.; Ament, C.; Goch, G.: Photothermal Characterization of Grind-Hardened Steel. Review of Scientific Instruments 74 (2003) 1, S. 670–672.

## REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Föckerer, T.; Zäh, M. F.: Comparison of the Resource Efficiency of Alternative Process Chains for Surface Hardening. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: 18<sup>th</sup> CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2011). Berlin: Springer 2011. S. 311–316.

## REISSNER 1931

Reißner, H.: Eigenspannungen und Eigenspannungsquellen. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 11 (1931) 1, S. 1–8.

## REITHOFER 2010

Reithofer, N.: Mobilität neu gedacht. In: Hoffmann, H.; Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): münchener kolloquium: Innovationen für die Produktion (Produktionskongress 2010). München: Utz 2010. S. 19–30.

## RENTSCH &amp; INASAKI 1995

Rentsch, R.; Inasaki, I.: Investigation of Surface Integrity by Molecular Dynamics Simulation. Manufacturing Technology (CIRP Annals) 44 (1995) 1, S. 295–298.

## ROEREN 2007

Roeren, S.: Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2007. (Forschungsberichte *iwb*, Band 203).

ROWE 2001

Rowe, W. B.: Thermal Analysis of High Efficiency Deep Grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (2001) 1, S. 1–19.

ROWE & JIN 2001

Rowe, W. B.; Jin, T.: Temperatures in High Efficiency Deep Grinding (HEDG). *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 50 (2001) 1, S. 205–208.

ROWE ET AL. 1995

Rowe, W. B.; Black, S. C. E.; Mills, B.; Qi, H.; Morgan, M. N.: Experimental Investigation of Heat Transfer in Grinding. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 44 (1995) 1, S. 329–332.

ROWE ET AL. 1996

Rowe, W. B.; Morgan, M. N.; Black, S. C. E.; Mills, B.: A Simplified Approach to Control of Thermal Damage in Grinding. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 45 (1996) 1, S. 299–302.

SALONITIS & CHRYSOLOURIS 2007

Salonitis, K.; Chryssolouris, G.: Cooling in Grind-Hardening Operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007) 3/4, S. 285–297.

SALONITIS ET AL. 2006

Salonitis, K.; Tsoukantas, G.; Drakopoulos, S.; Stavropoulos, P.; Chryssolouris, G.: Environmental Impact Assessment of Grind-Hardening Process. In: Dufloy, J. R.; Dewulf, W.; Willems, B.; Devoldere, T. (Hrsg.): *Towards a Closed Loop Economy: Proceedings of the 13<sup>th</sup> CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2006)*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven 2006. S. 657–662.

SALONITIS ET AL. 2007

Salonitis, K.; Stavropoulos, P.; Stournaras, A.; Chryssolouris, G.: Finite Element Modeling of Grind-Hardening Process. In: Micari, F.; Filice, L. (Hrsg.): *Proceedings of the 10<sup>th</sup> CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*. Reggio Calabria: Università della Calabria 2007.

SALONITIS ET AL. 2008

Salonitis, K.; Chondros, T.; Chryssolouris, G.: Grinding Wheel Effect in the Grind-Hardening Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (2008) 1/2, S. 48–58.

SAUERBIER 1999

Sauerbier, T.: Theorie und Praxis von Simulationssystemen: Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker. Braunschweig: Vieweg 1999.

SCHMIDT 1980

Schmidt, G.: Simulationstechnik. München: Oldenbourg 1980.

SCHNEIDER 1999

Schneider, M.: Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen. Dissertation Technische Universität Dortmund. Essen: Vulkan 1999. (Schriftenreihe des ISF, Band 9).

SCHUH & KAMPKER 2011

Schuh, G.; Kampker, A.: Strategie und Management produzierender Unternehmen: Handbuch Produktion und Management 1. Berlin: Springer 2011.

SCHUH & KLAPPERT 2011

Schuh, G.; Klappert, S.: Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2. Berlin: Springer 2011.

SCHWENK 2007

Schwenk, C.: FE-Simulation des Schweißverzugs laserstrahlgeschweißter dünner Bleche: Sensitivitätsanalyse durch Variation der Werkstoffkennwerte. Dissertation Technische Universität Berlin. Berlin: BAM 2007. (BAM-Dissertationsreihe, Band 26).

SHAH ET AL. 2012

Shah, S. M.; Nélías, D.; Zain-ul abdein, M.; Coret, M.: Numerical Simulation of Grinding Induced Phase Transformation and Residual Stresses in AISI-52100 Steel. *Finite Elements in Analysis and Design* 61 (2012) o. Nr., S. 1–11.

SHAW & VYAS 1994

Shaw, M. C.; Vyas, A.: Heat-Affected Zones in Grinding Steel. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 43 (1994) 1, S. 279–282.

SNOEYS ET AL. 1978

Snoeys, R.; Maris, M.; Peters, J.: Thermally Induced Damage in Grinding. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 27 (1978) 2, S. 571–581.

SÖLTER 2010

Sölter, J.: Ursachen und Wirkmechanismen der Entstehung von Verzug infolge spanender Bearbeitung. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Shaker 2010. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 48).

STÖHR 2008

Stöhr, R.: Untersuchung und Entwicklung des Innenrundschleifhärtens. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Shaker 2008. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 40).

TAKAZAWA 1966

Takazawa, K.: Effects of Grinding Variables on Surface Structure of Hardened Steel. Bulletin of the Japan Society of Grinding Engineers 2 (1966) 1, S. 14–21.

TIMOSHENKO & WOINKOWSKY-KRIEGER 1959

Timoshenko, S. P.; Woinkowsky-Krieger, S.: Theory of Plates and Shells. New York: McGraw-Hill 1959.

TÖNSHOFF 1966

Tönshoff, H. K.: Eigenspannungen und plastische Verformungen im Werkstück durch spanende Bearbeitung. Dissertation Universität Hannover. 1966.

TÖNSHOFF ET AL. 1992

Tönshoff, H. K.; Peters, J.; Inasaki, I.; Paul, T.: Modelling and Simulation of Grinding Processes. Manufacturing Technology (CIRP Annals) 41 (1992) 2, S. 677–688.

UHLMANN ET AL. 2010

Uhlmann, E.; Mewis, J.; Kirchgatter, M.: Temperatursimulation von Schleifprozessen: Beitrag zur Ermittlung des technologischen Nutzens von genuteten Schleifscheiben. wt Werkstatttechnik online 100 (2010) 1/2, S. 47–52.

VDI 2221 1993

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.

VELDE 2006

Velde, H.: Schleifhärten aus industrieller Sicht. In: Brinksmeier, E.; Klocke, F.; Werner, K. (Hrsg.): 2<sup>nd</sup> European Conference on Grinding. Düsseldorf: VDI 2006. S. 10.1–10.35. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 660).

## VENKATACHALAPATHY &amp; RAJMOHAN 2003

Venkatachalapathy, V. S. K.; Rajmohan, B.: Experimental Studies on the Grind-Hardening Effect in Cylindrical Grinding. *Materials and Manufacturing Processes* 18 (2003) 2, S. 245–259.

## VON BÖCKH 2006

von Böckh, P.: *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. Berlin: Springer 2006.

## WEBER 2001

Weber, T.: Simulation des Flachprofilschleifens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan 2001. (Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik).

## WEGNER ET AL. 2010

Wegner, H.; Lung, D.; Nau, B.; Schlosser, R.: Bewertung und Bilanzierung von Fertigungsprozessen und Fertigungsverkettungen. In: Eversheim, W.; Pfeifer, T.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R. H.; Schuh, G. (Hrsg.): *Ressourceneffiziente Produktionstechnik: Ein Aachener Modell (Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke)*. Aachen: Apprimus 2010. S. 97–113.

## WEINERT &amp; SCHNEIDER 2000

Weinert, K.; Schneider, M.: Simulation of Tool-Grinding with Finite Element Method. *Manufacturing Technology (CIRP Annals)* 49 (2000) 1, S. 253–256.

## WEISSBACH 2010

Weißbach, W.: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010.

## WEVER ET AL. 1961

Wever, F.; Rose, A.; Peter, W.; Strassburg, W.; Rademacher, L.: *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle: Band 1*. Düsseldorf: Stahleisen 1961.

## WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser 2010.

## WILKE 2008

Wilke, T.: *Energieumsetzung und Gefügebeeinflussung beim Schleifhärten*. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Shaker 2008. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 42).

WITTMANN 2007

Wittmann, M.: Bedarfsgerechte Kühlschmierung beim Schleifen. Dissertation Universität Bremen. Aachen: Shaker 2007. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Band 36).

YOUSSEF & AL-MAKKY 2006

Youssef, H. A. A.; Al-Makky, M. Y.: Metallurgical Aspects in Grind-Hardening of Heat Treatable Steels. Alexandria Engineering Journal 45 (2006) 2, S. 141–152.

ZÄH & FÖCKERER 2007

Zäh, M. F.; Föckerer, T.: Wärmequellenmodelle zur numerischen Auslegung des Schleifhärteprozesses. In: Wielage, B. (Hrsg.): Tagungsband zur 7. Industriefachtagung „Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik“ und zum 10. Werkstofftechnischen Kolloquium (OWT/WTK 2007). Chemnitz: Eigenverlag 2007. S. 325–334.

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M. F.; Föckerer, T.; Waibel, M.: Simulation in der Entwicklung – Lohnend oder Luxus? In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Mechatronik: Vorsprung durch Simulation. München: Utz 2007. S. 1.1–1.18. (Seminarberichte iwB, Band 88).

ZÄH ET AL. 2009a

Zäh, M. F.; Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Huntemann, J.-W.; Föckerer, T.: Experimental and Numerical Identification of Process Parameters of Grind-Hardening and Resulting Part Distortions. Production Engineering – Research and Development (WGP Annals) 3 (2009) 3, S. 271–279.

ZÄH ET AL. 2009b

Zäh, M. F.; Föckerer, T.; Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Huntemann, J.-W.: Experimentelle und numerische Bestimmung der Einhärtetiefe beim Schleifhärten: Einflüsse und Absicherung der Wärmequellenmodellierung. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 1/2, S. 49–55.

ZARUDI & ZHANG 2002a

Zarudi, I.; Zhang, L. C.: Mechanical Property Improvement of Quenchable Steel by Grinding. Journal of Materials Science 37 (2002) 18, S. 3935–3943.

ZARUDI & ZHANG 2002b

Zarudi, I.; Zhang, L. C.: Modelling the Structure Changes in Quenchable Steel Subjected to Grinding. Journal of Materials Science 37 (2002) 20, S. 4333–4341.

ZHANG ET AL. 2009a

Zhang, J.; Ge, P.; Jen, T.-C.; Zhang, L.: Experimental and Numerical Studies of AISI1020 Steel in Grind-Hardening. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 3/4, S. 787–795.

ZHANG ET AL. 2009b

Zhang, J.; Xu, H.; Yu, Y.; Wei, Z.: FEM Based Numerical Analysis on the Temperature Field in Grind-Hardening. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS 2009)*. Washington: IEEE Computer Society 2009. S. 615–618.

ZHANG ET AL. 1992

Zhang, L.; Suto, T.; Noguchi, H.; Waida, T.: An Overview of Applied Mechanics in Grinding. *Manufacturing Review* 5 (1992) 4, S. 261–273.

ZHANG 2007

Zhang, L. C.: Grind-Hardening of Steel Surfaces: A Focused Review. *International Journal of Abrasive Technology* 1 (2007) 1, S. 3–36.

ZIENKIEWICZ & TAYLOR 2000a

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.: *The Finite Element Method: Volume 1 – The Basis*. Oxford: Butterworth-Heinemann 2000.

ZIENKIEWICZ & TAYLOR 2000b

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.: *The Finite Element Method: Volume 2 – Solid Mechanics*. Oxford: Butterworth-Heinemann 2000.

ZITT 1999

Zitt, U. R.: *Modellierung und Simulation von Hochleistungsschleifprozessen*. Dissertation Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern: Eigenverlag 1999. (FBK Produktionstechnische Berichte, Band 34).



## Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München in den Jahren von 2006 bis 2012 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Schleifhärtesimulation untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

<b>Studierende(r)</b>	<b>Studienarbeit</b>
Birnkammer M.	Untersuchung der Einflüsse des Werkstoff- und des Gefügeumwandlungsmodells auf das Ergebnis der Schleifhärtesimulation, abgegeben im November 2008.
Distel F.	Künstliche neuronale Netze zur Bestimmung der Prozesskräfte beim Schleifhärten, abgegeben im Juni 2010.
Hannemann F.	Automatische Kalibrierung von isothermen und kontinuierlichen Zustandsschaubildern zur Verwendung in der numerischen Simulation der Wärmewirkung des Schweißens und der Wärmebehandlung, abgegeben im Juni 2011.
Kuhn P.	Entwicklung und Implementierung eines FE-basierten Modells zur numerischen Analyse des Außenrund-Schleifhärteprozesses, abgegeben im März 2011.
Lehner S.	Bewertung der Energie- und Ressourcenverbräuche in der Oberflächentechnik, abgegeben im Juni 2011.
Mainka T.	Entwicklung und Implementierung eines Zerspankraftmodells für die numerische Betrachtung des Schleifhärteprozesses, abgegeben im September 2008.
Meniaoui H.	Untersuchung der Einflüsse der temperaturabhängigen metallurgischen und mechanischen Materialeigenschaften auf das Ergebnis der Schleifhärtesimulation am Beispiel des Werkstoffs 42CrMo4, abgegeben im August 2009.
Pergler D.	Entwicklung und Implementierung eines Wärmeübergangmodells für die numerische Betrachtung eines Abkühlvorgangs, abgegeben im Oktober 2008.

---

<b>Studierende(r)</b>	<b>Studienarbeit</b>
Reihle M.	Untersuchung und Umsetzung von Wärmequellenmodellen zur numerischen Beschreibung des Schleifhärteprozesses, abgegeben im Mai 2007.
Schmitt F.	Berechnung und Vergleich der Fertigungskosten von Prozesskettenalternativen in der Oberflächentechnik, abgegeben im Mai 2012.
Stezowski B.	Entwicklung und Implementierung eines FE-basierten Zerspanmodells für die numerische Analyse eines Schleifkorn-eingriffs, abgegeben im November 2010.
Zhang O.	Entwicklung und Implementierung eines FE-basierten Modells zur numerischen Analyse des Außenrund-Schleifhärteprozesses unter Berücksichtigung des Materialabtrags, abgegeben im April 2011.

---

## Verzeichnis eingesetzter Softwareprodukte

Produkt	Beschreibung und Einsatz	Anbieter
HYPERMESH	Vernetzungsprogramm (FEM) <ul style="list-style-type: none"><li>• Erstellung von FE-Netzen</li><li>• Modifikation von FE-Netzen</li></ul>	Altair Engineering GmbH Calwer Straße 7 71034 Böblingen <a href="http://www.altairhyperworks.de">www.altairhyperworks.de</a>
MATLAB	Softwaretool zur Lösung mathematischer Probleme <ul style="list-style-type: none"><li>• Preprocessor für FE-Modelle</li><li>• Analytische Modelle</li><li>• Regressionsmodelle</li></ul>	The MathWorks GmbH Adalperostraße 45 85737 Ismaning <a href="http://www.mathworks.de">www.mathworks.de</a>
SYSWELD	Schweiß- und wärmebehandlungsspezifische Simulationssoftware (FEM) <ul style="list-style-type: none"><li>• Solver für FE-Modelle</li><li>• Postprocessor für FE-Modelle</li></ul>	ESI GmbH Mergenthalerallee 15-21 65760 Eschborn <a href="http://www.esigmbh.de">www.esigmbh.de</a>



# Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlussseminar**  
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablausimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**  
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablausimulation**  
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch – Realität – Technologien  
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen – Umsetzung – Werkzeuge  
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen  
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlank im Mittelstand  
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt  
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion – Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag,  
Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden  
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schiffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehmer:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilerbereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fährer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weissenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roggeder:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingner:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohn:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patran:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickeneder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oerli:** Strukturmehranalytische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlinterns  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfester basierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Münzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Sharif Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sharif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Bau:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glongerger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahner:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens  
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3

