

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

Boris Matuschka

**Energieeffizienz in Prozessketten:  
Analyse und Optimierung von  
Energieflüssen bei der Herstellung eines  
PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5**

Band 262



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

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

Boris Matuschka

**Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und  
Optimierung von Energieflüssen bei der  
Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus  
16MnCr5**

Band 262



**Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung  
von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-  
Getriebebauteils aus 16MnCr5**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Dipl.-Ing. Boris Matuschka  
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 28.09.2022  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8831-1

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

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

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Kurzfassung**

Die mediale Präsenz des Klimawandels führt zu einem wachsenden Bewusstsein für den stetig steigenden Energie- und Ressourcenverbrauch unserer Gesellschaft. Getrieben durch immer strengere politische Forderungen zur nachhaltigen Produktion, steht die Industrie vor der Herausforderung gesetzliche Ziele innerhalb der kommenden beiden Dekaden umzusetzen. Der angestrebte Wandel zur Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung kann durch Investitionen in innovative Fertigungsprozesse vorangetrieben werden. Aus Analysen von Fertigungsschritten und Fertigungsverfahren können effiziente Ansätze und Lösungen hervorgehen, die in geeigneter Kombination die Senkung des Energieverbrauchs ermöglichen. Aufgrund der verbesserten Wirtschaftlichkeit ist zudem langfristig gesehen eine vollständige Amortisation der Investitionskosten zu erwarten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher exemplarisch mit der Analyse und Bewertung der Prozesskette zur Herstellung einer Schalmuffe eines manuellen PKW-Getriebes. Die verkettete Herstellung wird auf den Energiefluss zur Erzeugung des Bauteils hin untersucht und ein Ansatz zur Fragestellung generiert, wie die eingesetzte Energie effizienter genutzt werden kann, um diese bei der Herstellung einzusparen. Der Ansatz beinhaltet eine Anpassung der Prozesskette durch Kombination von Fertigungsverfahren und zeigt gleichzeitig Potentiale zur Erhöhung der Werkzeugstandzeiten und Senkung von Produktionswerkzeugkosten auf.



## **Abstract**

Today's thinking is characterized by a growing awareness of the increasing consumption of energy and resources in our society. The industrial branch in particular makes a major contribution to this. Most of the raw materials, from which products for consumer or industrial applications are made of, consist of these resources and are made with machines, which require large amounts of energy for the production cycle. Because of this, a constant process is taking place, which on the one hand appeals to the handling of raw material savings and on the other hand propagates awareness for the most efficient use of the available and to be used energy.

The present work deals with a component from a manual car gearbox and the process chain for its manufacture. The interlinked production is examined for the energy flow, while the production of the part and an approach is generated, how the used energy can be better utilized in order to save energy during production. The approach includes an adaptation of the process chain and a combination of manufacturing processes in order, not only to make better use of the energy, but also to improve the service life and costs of the production tools at the same time.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>2</b>
2.1 Energieeffizienz im industriellen Sektor	2
2.1.1 Gebäudetechnik	5
2.1.2 Werkzeugmaschinen	6
2.2 Zerspanung	9
2.2.1 Grundlagen	9
2.2.2 Spanbildung	12
2.2.3 Wärmeentstehung und -ausbreitung beim Zerspanen	14
2.2.4 Räumen	16
2.3 Warmzerspanung	25
2.4 Wärmebehandlung	28
2.4.1 Grundlagen	28
2.4.2 Einsatzhärten von 16MnCr5	31
2.4.3 Induktives Härten	36
2.5 Strahlen (Verfestigungsstrahlen)	40
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>44</b>
3.1 Zielsetzung	44
3.2 Vorgehensweise	46
3.2.1 Energiebilanz	46
3.2.2 Ableiten von Effizienzmaßnahmen	49
3.2.3 Zerspanungsuntersuchungen	50
3.2.4 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion	50
<b>4 Prozesskettenanalyse und energetische Bewertung</b>	<b>51</b>
4.1 Demonstrator-Bauteil	51

---

4.2	Prozesskettenanalyse	55
4.3	Weichräumen	57
4.4	Einsatzhärten	63
4.5	Induktionshärten	74
4.6	Harträumen	79
4.7	Strahlen	84
4.8	Zusammenfassung der Energieaufwände	86
4.9	Kosten - Einbeziehen von Energie- und Werkzeugkosten	89
<b>5</b>	<b>Effizienzmaßnahmen</b>	<b>92</b>
5.1	Warmzerspannung	93
5.2	Anpassen der Prozesskette	96
5.3	Versuchsdurchführung	98
5.4	Versuchsergebnisse	105
5.5	Auswirkung auf Energie- und Kosteneffizienz	123
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>126</b>
6.1	Zusammenfassung	126
6.2	Ausblick	128
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>129</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>136</b>
<b>9</b>	<b>Beruflicher / wissenschaftlicher Werdegang</b>	<b>153</b>

## Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\alpha$	Freiwinkel	[°]
$\beta$	Keilwinkel	[°]
$\gamma$	Spanwinkel	[°]
$\delta$	Wirbelstromeindringtiefe	[mm]
$\varepsilon$	Emissionsgrad	[ ]
$\eta$	Wirkungsgrad	[ ]
$\vartheta$	Temperatur	[°C bzw. K]
$\lambda$	Neigungswinkel	[°]
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante	[N/A <sup>2</sup> ]
$\mu_r$	Permeabilitätszahl	[ ]
$\varphi$	Differenzphasenwinkel von Spannung und Strom	[°]
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand	[ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	[W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> ]
$a_p$	Schnittbreite	[mm]
$b$	Spannungsbreite	[mm]
$c$	Spankammertiefe	[mm]
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	[J/kg·K]
$\bar{c}_S$	Mittlere spezifische Wärmekapazität niedriglegierter Stähle	[J/kg·K]
$d$	Korndurchmesser	[mm]
$e$	Zahnrücklänge	[mm]
$f$	Wechselstromfrequenz	[Hz]
$f_z$	Zahnvorschub	[mm]
$h$	Spannungsdicke	[mm]
$h_u$	Heizwert des Brennstoffs (Erdgas)	[MJ/m <sup>3</sup> ]
$i$	Momentanwert der Stromstärke	[A]
$k_c$	Spezifische Schnittkraft	[N/mm <sup>2</sup> ]
$k_{c1.1}$	Hauptwert der spezifischen Schnittkraft	[N/mm <sup>2</sup> ]
$l_c$	Schnittweg	[mm]
$m_c$	Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft	[ ]
$\dot{m}_{WS}$	Werkstückmassenstrom	[kg/h]
$\dot{m}_{WST}$	Werkstückträgermassenstrom	[kg/h]
$t$	Zahnteilung	[mm]

---

$u$	Momentanwert der Spannung	[V]
$v_{ab}$	Abwurfgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{krit}$	Kritische Abkühlgeschwindigkeit für die Martensitbildung	[K/s]
$A_{c1}$	Starttemperatur der Austenitbildung beim Erhitzen	[°C]
$A_{c3}$	Endtemperatur der Austenitbildung beim Erhitzen	[°C]
$F$	Zerspanungskraft	[N]
$F_c$	Schnittkraft	[N]
$F_{cN}$	Schnittnormalkraft	[N]
$F_p$	Passivkraft	[N]
$F_e$	Wirkkraft	[N]
$\Delta\dot{H}$	Heizleistung	[kW]
$I$	Effektivwert der Stromstärke	[A]
$L_1, L_2, L_3$	Außenleiter im dreiphasigen Drehstromsystem	[ ]
$M_S$	Martensit-Start-Temperatur	[°C]
$M_F$	Martensit-Finish-Temperatur	[°C]
$N$	Nullleiter im dreiphasigen Drehstromsystem	[ ]
$P$	Leistung	[kW]
$Q$	Thermische Energie	[kJ]
$\dot{Q}_V$	Verlustwärmestrom	[kW]
$R_{eS}$	Streckgrenze	[N/mm <sup>2</sup> ]
$RMS$	Root-Mean-Square-Value (Effektivwert)	[V] bzw. [A]
$T$	Temperatur	[K]
$U$	Effektivwert der Wechselspannung	[V]
$\dot{V}_B$	Brennstoffvolumenstrom	[m <sup>3</sup> /h]
$W$	Arbeit	[J]

---

# 1 Einleitung

Das Graduiertenkolleg 1483 mit dem Titel „Prozessketten in der Fertigung: Wechselwirkung, Modellbildung und Bewertung von Prozesszonen“ verfolgte das Ziel, Produktionsprozesse ausgehend vom Halbzeug bis zum fertigen Bauteil simulativ mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) abzubilden und die Bauteileigenschaften gezielt durch die mechanische Bearbeitung einstellen zu können. Zur Verifizierung der Simulationsmodelle bzw. deren Ergebnissen werden praktische Untersuchungen durchgeführt, die einen Vergleich zwischen Versuch und Simulation ermöglichen. Auf dieser Basis können die Modelle weiter verbessert und die Produktion des herzustellenden Teils optimiert werden. Hierfür kommen als Demonstrator eine KFZ-Getriebeschaltmuffe und die damit verbundenen Fertigungsverfahren der Herstellungsprozesskette zum Einsatz. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einem Projekt des Kollegs aus dem Bereich der Kombination unterschiedlicher Fertigungsprozesse für Massivbauteile und wird im Folgenden näher erläutert.

Die Gesellschaft erlebt aktuell einen Wandel in der Energiepolitik auf vielen Ebenen. Die stetig steigenden Energiemengen, welche das moderne Leben bei gleichzeitig begrenzten Ressourcen fordert, macht es notwendig, ein Bewusstsein für Energieeffizienz zu entwickeln. Es ist von entscheidender Bedeutung, die eingesetzte Energie so effizient wie möglich zu nutzen. Gerade in der Industrie, deren Produktionen einen Großteil der weltweit verbrauchten Energiemenge ausmachen, spielt dieser Faktor eine bedeutende Rolle. Neben erforderlichen Umwelanforderungen bzw. Zertifizierungen für „Green Machining“ wirkt sich der Energieverbrauch unmittelbar auf die Kosten und somit die Konkurrenzfähigkeit der Firmen am Markt aus.

Die vorliegende Arbeit greift diese Gelegenheit auf und untersucht die Energieeffizienz in den notwendigen Prozessketten zur Herstellung des Demonstratorbauteils. Die Herstellung der Schaltmuffe geschieht entlang mehrerer Stationen und unterschiedlicher Fertigungsverfahren, deren Effizienz im Hinblick auf den Gesamtverbrauch an Energie und die daraus resultierenden Kosten analysiert wird. Aus diesen Untersuchungen wird ein Ansatz zur Optimierung generiert, der basierend auf dem aktuellen Produktionsprozess vom Halbzeug bis hin zum fertigen Bauteil eine Lösung zur Effizienzsteigerung der Prozesskette bereitstellt.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Prozesse aufgeführt, die für die Herstellung des einer PKW-Getriebebeschaltmuffe notwendig sind. Darunter fallen die Themenfelder der Energieeffizienz im industriellen Sektor, die Zerspanung und Wärmebehandlung.

### 2.1 Energieeffizienz im industriellen Sektor

Eine Abgrenzung der verwendeten Begriffe Energie und Energieeffizienz soll dabei unterstützen, die im Folgenden verwendeten Ausdrücke im korrekten Umfeld einzuordnen.

Energie ist die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. Sie ist daher als eine Zustandsgröße eines Systems zu betrachten. Eine Zustandsänderung des Systems erfordert immer die Wandlung von Energie in Arbeit oder umgekehrt (Pehnt, 2010). Es kann daher unterschieden werden, ob einem System Energie zugeführt wird, um Arbeit zu verrichten, oder die verrichtete Arbeit Energie freisetzt. Als Beispiel kann ein Synchronmotor dienen, der durch seine Permanenterregung sowohl durch Zuführung von elektrischem Strom in Rotation versetzt werden als auch durch externes Antreiben des Läufers elektrische Energie erzeugen kann. (Müller et al., 2009)

Mathematisch wird die Arbeit als Integral der Kraft  $F$  über die Strecke  $s$  beschrieben,

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F(s) ds \quad \text{Formel 2-1}$$

wobei  $W$  in der SI-Einheit Joule [J] gemessen wird.

Es ist weiterhin wichtig zu erwähnen, dass Energie weder erzeugt noch verbraucht werden kann. Sie wird stets in andere Energieformen umgewandelt. Dadurch kann sie auch zwischen unterschiedlichen Systemen ausgetauscht werden, ausgedrückt im ersten Hauptsatz der Thermodynamik. (Baehr & Kabelac, 2012)

Die Energie kann dabei in unterschiedlichen Formen auftreten. Die nachfolgende Tabelle listet einige Möglichkeiten auf:

Tabelle 2-1: Energieformen (Müller et al., 2009)

<b>Energieform</b>	<b>Erläuterung</b>
Mechanische Energie	
- Potentielle Energie (Lageenergie)	Energie in Körpern durch Lage und Position in einem Kraftfeld
- Kinetische Energie (Bewegungsenergie)	Energie in bewegten Massen und Körpern.
Thermische Energie	Energie durch ungeordnete Bewegung von Atomen und Molekülen
Elektrische Energie	Energie im elektrostatischen Feld elektrischer Ladungen
Magnetische Energie	Energie im magnetischen Feld
Chemische Energie	Energie in chemischen Bindungen von Atomen und Molekülen
Kernenergie	Energie der Bindung von Protonen und Neutronen im Atomkern
Strahlungsenergie	Energie im elektromagnetischen Feld

In industriellen Anlagen wird Energie meist in Form von Brennstoffen oder Elektrizität zur Verfügung gestellt. Bis dahin müssen mehrere Schritte von der sogenannten Primärenergie bis zur Nutzenergie durchlaufen werden. Die Primärenergie kann durch fossile Brennstoffe, erneuerbare Energien oder Kernenergie gewonnen und schrittweise durch verlustbehaftete Prozesse in Nutzenergie gewandelt werden. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert in seiner Richtlinie 4608 Nutzenergie als Energieformen wie z. B. Licht, Wärme oder mechanische Energie, die der Verbraucher benötigt. Vielfach ist davon auszugehen, dass etwa nur 30 % der Primärenergie beim Verbraucher als Nutzenergie zur Verfügung gestellt werden. Verantwortlich hierfür sind Verluste bei der Wandlung, dem Eigenverbrauch, elektrische Leistungsverluste etc. Umso wichtiger ist es, die Nutzenergie so effizient wie möglich einzusetzen. Die folgende Abbildung 2-1 visualisiert diesen Sachverhalt. Es wird darin verdeutlicht, durch welche einzelnen Schritte die Primärenergie stufenweise durch Nebenprozesse gewandelt wird und welche Menge prozentual gesehen beim Endverbraucher zur Verfügung steht.

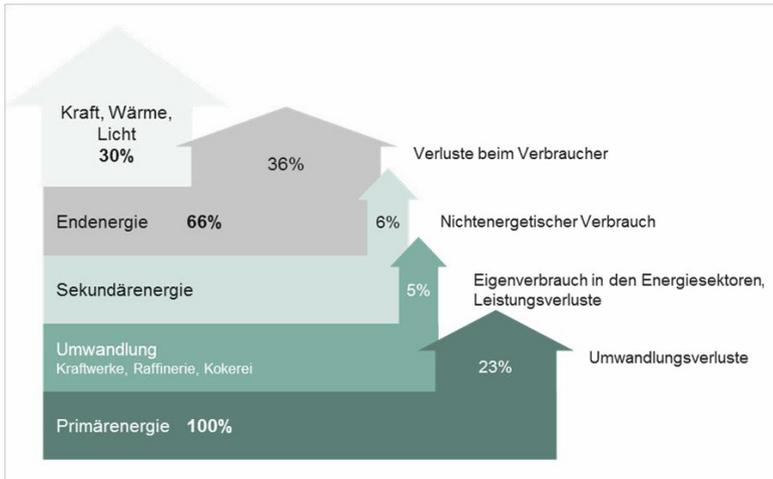


Abbildung 2-1: Von der Primärenergie zur Nutzenergie (Pehnt, 2010)

Der Begriff Energieeffizienz ist nicht allgemein definiert. Er beschreibt vielmehr einen Prozess, durch den eine Wirkung erreicht wird. Die Beschreibung geschieht dadurch, dass die erreichte Wirkung mit den eingesetzten Mitteln ins Verhältnis gesetzt werden. Dies könnte beispielsweise die eingesetzte Treibstoff- oder Energiemenge sein, um ein Fahrzeug 100 km weit zu bewegen. Effizient ist ein Prozess dann, wenn der gewünschte Nutzen mit möglichst geringem Einsatz erreicht wird (Müller et al., 2009).

Der ökonomische Ansatz der Betriebswirtschaftslehre beschreibt dies dadurch, dass zum Erreichen eines Ziels der Einsatz von unnützen Mitteln vermieden und entweder der Mitteleinsatz minimiert (Minimumprinzip) oder der Output maximiert (Maximumprinzip) werden soll. (Pehnt, 2010)

Effizienz ist jedoch nicht mit Effektivität gleichzusetzen. Wird ein bestimmtes Ziel oder der Nutzen so gut wie möglich erreicht, wurde der Prozess effektiv umgesetzt. Bei der Effizienz ist rein der Mitteleinsatz oder der erreichte Output relevant. Vereinfacht ausgedrückt beschreibt die Effektivität die Wirksamkeit eines Prozesses oder einer Methode, während die Effizienz die Leistungsfähigkeit oder Wirtschaftlichkeit ausdrückt. (Blesl & Kessler, 2013)

Bei der Betrachtung der Energieeffizienz müssen daher neben dem Nutzen immer auch der Aufwand und die damit verbundenen Mittel mit einbezogen werden.

Bei der energetischen Bewertung von industriellen Prozessen oder Anlagen wird meistens keine direkte Messung der Energieeffizienz angegeben, sondern die prozentuale bzw. absolute Energieeinsparung gegenüber einem Vergleichsprozess oder einer vergleichbaren Anlage. Es lässt sich daher sagen, dass die Energieeffizienz immer eine Teilmenge des Energiesparens ist.

Das Energiesparen setzt sich nach Pehnt aus der Effizienz, also der Reduktion des Energieeinsatzes und dem teilweisen oder vollständigen Verzicht von Inanspruchnahme von Energie, zusammen.

### **Effizienzmaßnahmen in der Industrie**

Das Gesamtsystem der Energieflüsse in einem produzierenden Unternehmen teilt sich neben der Bereitstellung in drei Hauptkategorien auf. Die Energieumwandlung und -verteilung stehen für die peripheren Systeme, die das gesamte Gebäude betreffen, Energieverluste und -rückgewinnung hingegen für Verluste, Abwärme und mögliche Rückgewinnungsmethoden zur Energierückführung. Die Energieanwendung stellt den wichtigsten Teil des Gesamtsystems für diese Arbeit dar. In diesem Teilsystem findet der größte Teil der Wandlung statt. Die Arbeit für erforderliche Prozesse und Anwendungen wird dabei mittels der Energie verrichtet. Daher müssen in diesem Bereich geeignete Effizienzmaßnahmen eingesetzt werden, die für die jeweilige Anwendung geeignet ist.

Im folgenden Unterkapitel werden diese Teilbereiche näher erläutert.

#### **2.1.1 Gebäudetechnik**

Die Gebäude eines jeden produzierenden Unternehmens stellen die Abgrenzung zur Umwelt der Produktion dar. Diese Gebäude beinhalten Büros, Werkstätten und Produktionshallen und sind in Europa für ca. 40 % des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich. Dies hat zur Folge, dass Mindestanforderungen an die Gesamteffizienz von Anlagen, die die Gebäudetechnik betreffen, in einer europäischen Richtlinie formuliert wurden. (EnergieAgentur.NRW, 2005)

Die Modernisierung von Industriegebäuden kann eine Ersparnis von bis zu 80 % des Energieverbrauchs durch die Grundsysteme, wie Heizung und Kälteerzeugung, Licht,

Druckluftversorgung, Pumpen, Belüftung etc. erreichen. Es ist daher wichtig, alle Bereiche der Gebäudetechnik mit in die Betrachtungen einzubeziehen. Die Unternehmen sind angewiesen, Systeme zur Kraft-Kälte-/Wärmekopplung oder den Einsatz von regenerativen Energien in die Gebäude zu integrieren und die Anlagen für Beleuchtung sowie der Informations- und Kommunikationstechnologie für eine effiziente Nutzung anzupassen. (Kuttkat, 2012)

Neben der energetischen Betrachtung der einzelnen Anlagen bzw. Teilbereiche des Gebäudekomplexes spielen auch gegenseitige Wechselwirkungen eine entscheidende Rolle. Dieser Faktor kann ein Gesamtergebnis signifikant positiv oder negativ beeinflussen, was sich direkt auf die Gesamteffizienz der Energienutzung auswirkt. Eine optimale Abstimmung der Teilsysteme untereinander ist daher zwingend erforderlich.

Bei Neuplanungen von Fabriken bestehen daher erheblich größere Freiheitsgrade, was die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen angeht. Die Erarbeitung eines umfassenden Energiekonzeptes in der Planungsphase ermöglicht die optimale Abstimmung der effizienten Komponenten untereinander, woraus ein wirtschaftlicheres und energieoptimiertes Gesamtkonzept resultieren kann. (Karsten, 2010)

### **2.1.2 Werkzeugmaschinen**

Zur Fertigung von mechanischen Komponenten werden Maschinen eingesetzt, die Teile in reproduzierbarer Form mit der Hilfe von Werkzeugen durch eine mechanisiert angetriebene und geführte Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück bearbeiten. Bei Zerspanprozessen kann die Relativbewegung dabei in eine Trenn- und eine Vorschubbewegung unterteilt werden, die sich auch überlagern können. Zur Umsetzung von linearen, rotatorischen oder bahnförmigen Bewegungen wird Energie in Form von elektrischer, hydraulischer, pneumatischer und nicht ausschließlich manueller Art zugeführt. Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die Maschinen zu klassifizieren (Kalhöfer & Kress, 2013). Eine Einteilung nach Fertigungsverfahren und Automatisierungsgrad wird durch die DIN 69651 vorgenommen. (R. Neugebauer, 2012)

Bei der energetischen Betrachtung einer Werkzeugmaschine spielt der Automatisierungsgrad der Maschine eine entscheidende Rolle. Durch den Vergleich einer halbmanuellen Fräsmaschine mit einem Bearbeitungszentrum, das Werkzeugwechsel, Transferbewegungen, Palettenwechsel, Dreh- und Fräsbearbeitungen etc. durchführen kann,

wird deutlich, dass jeweils eigene Antriebe für jede Funktion benötigt werden. Der Energieverbrauch der Gesamtmaschine summiert sich daher aus dem jeweiligen Verbrauch eines jeden Teilsystems bzw. Einzelfunktionen und ist für den größten Anteil am Gesamtenergieverbrauch der Maschine verantwortlich (Abele & Eisele, 2010). Das Augenmerk bei der Auslegung einer solchen Maschine liegt meist auf der Prozessfähigkeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Achsantriebe sowie ihrer Präzision. Die Effizienz der eingesetzten Antriebssysteme spielt dahingegen nur eine untergeordnete Rolle. (Mayer, 2014)

Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt, wenn die Lebenszykluskosten einer Werkzeugmaschine betrachtet werden. Der Anteil von Energie und Medien an den Betriebskosten kann bis zu 40 % verursachen. (Schürmann, 2012)

Richtlinien für Effizienzmaßnahmen bei Werkzeugmaschinen können nicht allgemeingültig erstellt werden, da die große Anzahl an Anwendungsfeldern dies verhindert. Es gilt daher den Fokus auf die einzelnen Verbraucher einer Maschine zu legen. Wird der Anteil eines Aggregats wie z. B. der Kühlmittelpumpe am Gesamtenergieverbrauch der Maschine ermittelt, kann sich hieraus ableiten lassen, wie sehr sich mögliche Einsparungen auf die Gesamteffizienz auswirken. Nach (Braun 2012) lässt sich ein Energiebilanzraum um eine Werkzeugmaschine bilden, der bei der Analyse von Energieflüssen helfen kann, Abbildung 2-2.

Zur Vereinfachung wird das Gesamtsystem Werkzeugmaschine in zwei Bilanzierungsräume aufgeteilt. Einerseits der Bilanzraum Prozess und Werkzeugmaschine, in dem alle die Bearbeitung betreffenden Prozesse ablaufen und den Bilanzraum Anlagen und Peripheriegeräte, der alle Aggregate und Anlagen zusammenfasst, die für die Umsetzung der Abläufe im Bilanzraum Prozess und Werkzeugmaschine notwendig sind. Nun kann genauer analysiert werden, welche Energieströme in Form von elektrischer oder mechanischer Energie in- und aus den Bilanzräumen fließen. Es wird deutlich, dass der die Peripherie betreffende Raum größer ist als jener für die Bearbeitung. Die Vielzahl an unterschiedlichen Aggregaten mit ihren energetischen Verlusten hat daher einen direkten Einfluss auf die Effizienz der Maschine.



gefördert wurde, ergab sich, dass durch die Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb fallweise ein Einsparpotential von 30 % möglich ist.

Zusammengefasst lassen sich zur energetischen Optimierung von Werkzeugmaschinen und Komponenten folgende Teilsysteme identifizieren:

- Einsatz energetisch verlustarmer Antriebsmaschinen und Steuerungstechnik
- Effiziente, auf die Bearbeitungsstrategie optimierte Regelung der Antriebe
- Reduzierung bzw. Abschaltung nicht benötigter Systeme im Standby

## 2.2 Zerspanung

Die Zerspanung ist ein Vorgang, bei dem der feste Zusammenhalt eines Materials lokal aufgehoben wird und durch die Einwirkung einer Kraft mit Hilfe eines Werkzeuges abgetrennt wird. Ziel ist eine definierte Formänderung zur Erfüllung spezifischer Aufgaben, wie z. B. das Einstellen eines bestimmten Maßes oder die Herstellung von formschlüssigen Verbindungen. Beinahe jedes Rohmaterial, welches mit Hilfe urformender Verfahren produziert wird, muss einer Bearbeitung unterzogen werden, um ein Halbzeug mit festgelegten Maßen zu erzeugen, das daraufhin in seine Endform gebracht werden kann. Das Werkzeug muss dabei über eine Schneide verfügen, die die Zerspanungskraft in das Material einleitet. Die Geometrie der Schneide kann sowohl bestimmt als auch unbestimmt ausfallen. Als Beispiel seien an dieser Stelle ein Drehmeißel mit geometrisch bestimmter und Schleifkörner auf Schleifpapier mit unbestimmter Schneide genannt. (Dietrich & Tschätsch, 2014)

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide und vorrangig das Verfahren Räumen näher erläutert, welches zur geometrischen Formgebung der Schaltmuffe eingesetzt wird.

### 2.2.1 Grundlagen

Die DIN 6580/81 legt die Begrifflichkeiten, welche die Geometrie einer zur Zerspanung verwendeten Schneide exakt beschreiben, fest. Ausgehend von einem einfachen Drehmeißel werden nun die Bestandteile des sogenannten Schneidteils erläutert. Die Bezeichnungen lassen sich auf alle Schneiden bei z. B. Fräsern, Wendeschneidplatten und Räumwerkzeugen übertragen. (Deutsches Institut für Normung e. V., 1985)

Die Schneide ist zwischen der Span- und Freifläche lokalisiert. Auf der Spanfläche wird der Span abgeleitet, während die Freifläche gegenüber der Schnittfläche liegt. In der Schneidenecke laufen die Haupt- und Nebenschneide zusammen. Die Nebenschneide ist beim Werkzeug immer der gefertigten Fläche zugeneigt. Als Beispiel sei ein Spiralbohrer genannt, bei dem die Nebenschneide parallel zum gefertigten Bohrloch und die Hauptschneide das eigentliche Loch in axialer Richtung erzeugt.

Die in diesem Absatz beschriebenen Schneiden sind jedoch nicht als ideal scharfe Schneiden ausgeführt, sondern verfügen über den sogenannten Schneidkantenradius. Der Schneidkantenradius dient zur Steigerung der Stabilität der Schneide und wird durch Verschleißvorgänge vergrößert. Der Radius hat einen direkten Einfluss auf den Zerspanungsprozess, da durch ihn beispielsweise die Mindestspanungsdicke festgelegt wird oder als Verschleißmarker herangezogen werden kann. (Kühn, 2010)

Die geometrischen Abhängigkeiten der Flächen am Schneidteil werden durch eindeutig definierte Winkel bestimmt und bilden die Grundlage der unterschiedlichen Werkzeuggeometrien, welche für die Bearbeitung verschiedener Werkstoffe notwendig sind. Zur Beschreibung der Winkel gibt es das Werkzeug- und das Wirk-Bezugssystem, die in Abbildung 2-3 dargestellt sind. Für die Beschreibung des Zerspanungsvorgangs wird das Wirk-Bezugssystem und für die Konstruktion, Herstellung und Prüfung das Werkzeug-Bezugssystem verwendet. Sind Wirkrichtung und Schnittrichtung identisch, so sind auch die beiden Bezugssysteme identisch. In der Produktion kommt dies allerdings eher selten vor, da die Wirkrichtung meist durch mehrere Komponenten wie Vorschub und Rotation beschrieben werden muss. Die Bezugssysteme sind um den Wirkrichtungswinkel  $\eta$  gegeneinander verdreht. Dieser lässt sich wie folgt visualisieren: (Fritz & Schulze, 2015)

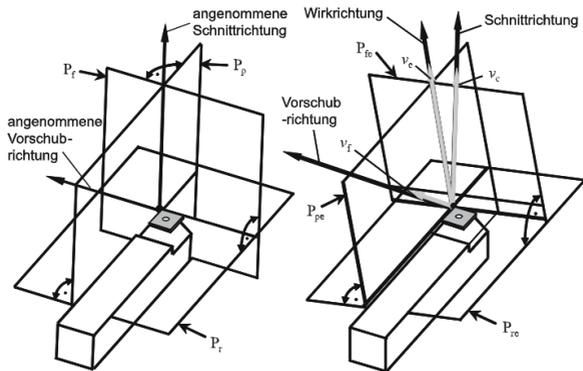


Abbildung 2-3: Werkzeug-Bezugssystem (links) und Wirk-Bezugssystem (rechts), (DIN 6581)

Das in dieser Arbeit näher betrachtete Räumen weist jedoch identische Bezugssysteme auf.

Die wichtigsten Winkel am Schneidteil sind der Spanwinkel  $\gamma$ , der Freiwinkel  $\alpha$  und der Keilwinkel  $\beta$ . Diese drei Winkel addiert ergeben immer  $90^\circ$ . Zwischen Freifläche und Schneidenebene befindet sich der Freiwinkel  $\alpha$ . Der Keilwinkel  $\beta$  wird zwischen Span- und Freifläche gemessen.  $\gamma$  ist zwischen Spanfläche und Werkzeug Bezugsebene zu finden, Abbildung 2-4. (Fritz & Schulze, 2015)

Der Neigungswinkel wird  $\lambda$  genannt und in der Schneidenebene gemessen. Von ihm ist abhängig, welcher Teil der Schneide zuerst in Kontakt mit dem Werkstück tritt. Der Winkel ist positiv, wenn die Schneidenecke der Hauptschneide bezogen auf die Schnitttrichtung vorseilt.

Die Winkel  $\kappa$  und  $\epsilon$  als Einstell- und Eckenwinkel sind auf Grundlage des Werkzeugbezugsebene zu messen. Erster definiert die Lage der Schneide zum Werkstück. Im Sonderfall  $\kappa = 90^\circ$  gilt  $a_p = h$  und in diesem Fall tritt keine Passivkraft auf. Der Eckenwinkel liegt zwischen Haupt- und Nebenschneide. Er ist ausschlaggebend für die Schneidkantenstabilität und muss bei höherer Belastung entsprechend vergrößert werden. In Abbildung 2-4 werden die in diesem Abschnitt erläuterten Zusammenhänge dargestellt. (Fritz & Schulze, 2015)

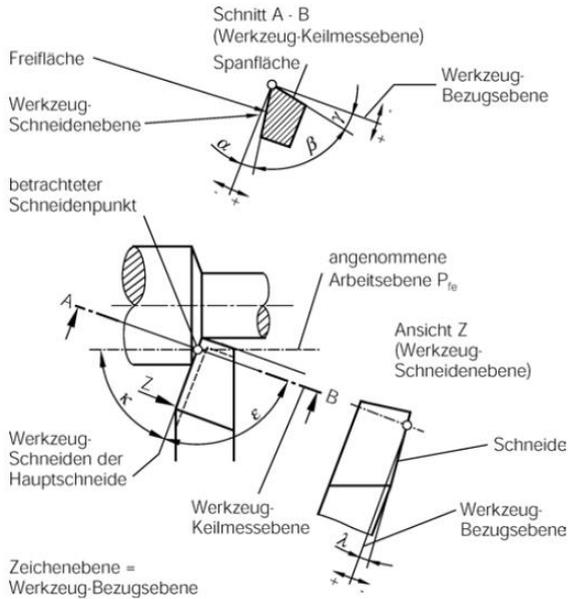


Abbildung 2-4: Werkzeugwinkel punktbefug an der Hauptschneide des Werkzeugs (DIN 6581)

## 2.2.2 Spanbildung

Der Mechanismus der Zerspanung geschieht auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene. Der Materialzusammenhalt bzw. die Festigkeit und das Materialverhalten werden durch die atomare Gitterstruktur und die Gefügeausbildungen geschaffen. Sie entstehen bei der Erstarrung von Schmelze infolge der Wärmebehandlung. Die Ausprägung der Gefüge beeinflusst hierbei die Grundeigenschaften des Werkstoffes und folglich die Zerspanbarkeit des Werkstoffes. Ausgehend vom Spannungs-Dehnungsdiagramm lassen sich die Vorgänge im Material beschreiben. Der Hauptkontakt zwischen Werkzeug und Werkstoff wird durch die Schneidkante und die Spanfläche der Schneide repräsentiert. Die Schneidkante oder auch Hauptschneide stellt den wichtigsten Kontakt zwischen Werkzeug und Material dar, da sie direkt am Zerspanvorgang beteiligt ist und die Bearbeitungskräfte in das Werkstück überträgt. Unterschieden werden kann der kontinuierliche Schnitt, z. B. „Drehen“, und der unterbrochene Schnitt, z. B.

„Fräsen“. Der unterbrochene Schnitt stellt eine erhöhte Anforderung an die Schneide dar, da sich die Eingriffsverhältnisse permanent ändern. Während sich beim durchgängigen Schnitt nach dem Materialeintritt meist stabile Zustände über den Schnitt hinweg bilden, wird die Schneide beim unterbrochenen Schnitt zyklisch mit einer stoßenden Belastung und wechselnden thermischen Bedingungen gefordert. (Spur, 2014)

Die Spanentstehung wird durch das Modell von Warnecke erläutert, Abbildung 2-5. Warnecke unterteilt das an der Spanbildung beteiligte Volumen in mehrere Zonen, anhand derer die einzelnen Zustände erläutert werden können. (Warnecke, 1974)

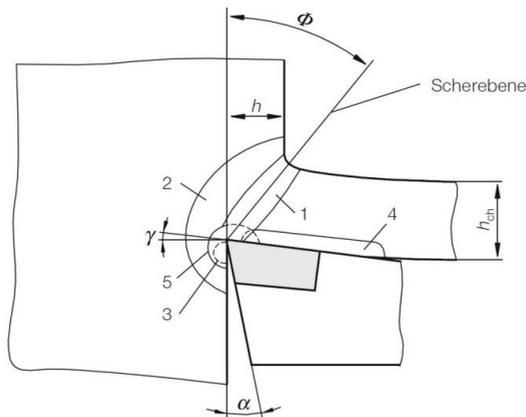


Abbildung 2-5: Spanbildungsmodell nach Warnecke (Warnecke, 1974)

In der Verformungsvorlaufzone (2) wird das Material zunächst elastisch, dann plastisch verformt. Die Spanbildung geschieht in der primären Scherzone (1). Der Trennvorgang des Spans vom Basismaterial findet an der Schneidkante statt. Durch Reibung wird eine hohe Temperaturentwicklung an der Spanober- und Unterseite sowie an den korrespondierenden Flächen des Schneidkeils (3 & 4) hervorgerufen. Die Temperaturen und Spannungen im Material tragen in der sogenannten Fließzone (4) zur Entstehung der unterschiedlichen Spanarten bei. (Warnecke, 1974)

Energetisch betrachtet werden bei der Zerspanung Kräfte in Verformungsarbeit und schlussendlich in Wärme umgewandelt. Diese besteht aus der Scher-, Trenn- und Reibungsarbeit, welche aus der Span- und Freiflächenreibung resultiert. 75 % der Wärme werden mit dem Span, 18 % vom Werkzeug abtransportiert und 7 % vom Werkstück absorbiert. Davon resultieren 5% der Wärme aus der Scherebene und lediglich 2% aus

der eigentlichen Materialtrennung. Die höchste Temperatur entsteht durch die hohe Reibung zwischen Span und Spanfläche auf dieser und trägt auch maßgeblich zum Verschleiß der Schneide bei. (Spur, 2014)

### 2.2.3 Wärmeentstehung und -ausbreitung beim Zerspanen

Die Werkzeugmaschine verrichtet mittels des Werkzeuges Arbeit am Werkstück. Diese Energie dient zur Abtrennung des Spans vom Werkstück. Die in Form von Bewegungsenergie zugeführte Arbeit wandelt sich während der Zerspanung in Wärme. Die hierfür ursächlichen Prozesse sind die plastische Verformung während des Scherens, Trennens und Stauchens des Materials sowie auf Basis von Reibung zwischen Material bzw. dem entstehenden Span und der Spanfläche des Werkzeugs. Je größer die Umformzone und je mehr Reibung entsteht, desto mehr Wärme wird erzeugt. (Klocke & König, 2008)

Die Energie kann rechnerisch mit folgender Formel 2-2 ausgedrückt werden. Basierend auf der Gleichsetzung der eingebrachten Zerspanungsleistung  $P_c$  und der erzeugten Wärmeenergie  $Q_{gesamt}$ . Die Zerspanungsleistung kann als Produkt der Schnittkraft  $F_c$  und der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  berechnet werden.

$$\dot{Q}_{gesamt} = P_c = F_c * v_c \quad \text{Formel 2-2}$$

Abbildung 2-6 visualisiert die unterschiedlichen Temperaturzonen beim Zerspanungsvorgang. Der Bereich auf der Schneide ist als der heißeste Bereich mit bis zu 700 °C erkennbar. Der Span selbst bewegt sich in Temperaturbereichen von 300 – 500 °C und sinkt, je weiter er von der Spanfläche entfernt ist. In der Werkstückoberfläche selbst ist nur eine sehr geringe Einflusszone sichtbar. Je größer die Entfernung zur Schneide bzw. zum Span, desto schneller sinkt die Temperatur.

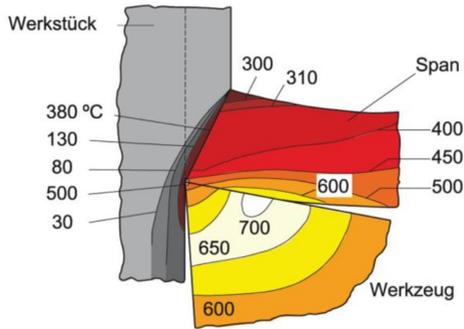


Abbildung 2-6: Temperaturverteilung bei der Zerspangung (Klocke & König, 2008)

Es ist deutlich erkennbar, dass ein Großteil der Wärmeenergie, die bei der Zerspangung entsteht, in den Span fließt und damit vom Werkstück abgeführt wird. Je nach Zerspangungsmethode schwankt die Energiemenge von ca. 60 % beim Bohren bis zu 95 % beim Drehen und wird zusätzlich durch die angewendeten Schnittparameter beeinflusst (Fleischer et al., 2007). Die übrige Wärmeenergie verbleibt im Werkzeug und Werkstück. Der jeweilige Anteil ist abhängig von den Werkstoffen und Temperaturen im Hinblick auf die Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten der in Kontakt befindlichen Materialien (Paucksch et al., 2008).

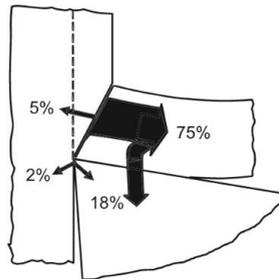


Abbildung 2-7: Wärmeenergieverteilung bei der Zerspangung (Klocke & König, 2008)

In Abbildung 2-7 wird eine schematische Darstellung der Energieverteilung in Bezug auf die Wärmeenergie während der Zerspangung aufgeführt. In diesem Beispiel fließen 75 % der Wärme mit dem Span über die Spanfläche ab, während die Spanfläche vom Span bzw. der Reibung zwischen Span und Spanfläche aufgeheizt wird. Gerade einmal

7 % der Energie verbleiben im Werkstück. Für die Vorhersage der Temperatur an der Schneide ist es daher wichtig, die Verteilung der Wärmemenge zwischen Schneide und Werkstück zu kennen.

Die Wärmeverteilung  $R_w$  kann mit Hilfe der thermischen Leitfähigkeit  $\kappa$ , der Dichte  $\rho$  und der Wärmekapazität  $c_p$  der Kontaktpartner berechnet werden (Tian & Shin, 2006).

In Formel 2-3 sind diese Zusammenhänge dargestellt. Die korrespondierenden Werte tragen den Index t für das Werkzeug und w für das Werkstück.

$$R_w = \frac{(k_w \rho_w c_{pw})^{1/2}}{(k_w \rho_w c_{pw})^{1/2} + (k_t \rho_t c_{pt})^{1/2}} \quad \text{Formel 2-3}$$

Mittels dieser Gleichung kann die Wärmeverteilung zwischen Werkzeug und Werkstück berechnet werden. Im letzten Schritt ist die abgestrahlte Energie des Werkzeuges in Form von Wärmestrahlung notwendig. Mittels dieser Energieflüsse kann eine Energiebilanz aufgestellt werden und die Temperatur der Schneide vorhergesagt werden.

## 2.2.4 Räumen



Abbildung 2-8: Klassifizierung des Fertigungsverfahrens Trennen und dessen Untergruppen (Deutsches Institut für Normung e. V., 2003)

DIN 8589-5 beschreibt Räumen als ein Zerspanungsverfahren mit mehrschneidigem Werkzeug, welches die Schnittbewegung ausführt. Die Schneiden sind hierbei gestaffelt angeordnet und nähern sich über die Werkzeuglängen hinweg der inversen Endkon-

tur an. Die Endkontur wird beim Räumen innerhalb eines Bearbeitungszyklus hergestellt, indem das Werkzeug durch das Werkstück hindurch- oder an ihm entlanggezogen wird. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2003)

Abweichend zum Fräsen werden die Prozessparameter Spanungsdicke und Vorschub durch das Räumwerkzeug realisiert. Es können Werkstückgeometrien umgesetzt werden, die mit dem Fräsen nur schwer herzustellen sind. Komplexe Geometrien wie z. B. Profile lassen sich in nur einem Arbeitsschritt herstellen, was das Räumen zu einem sehr produktiven Verfahren macht. Enge Toleranzen über eine große Teilstückzahl sind ebenfalls möglich. Durch eine Kalibrierstrecke am Ende des Werkzeuges wird sichergestellt, dass die Endkontur auch nach vielen Bearbeitungshüben innerhalb der Toleranz bleibt. (Spur, 2014)

Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 visualisieren herstellbare Geometrien beim Räumen anhand des Plan- und Profilräumens.

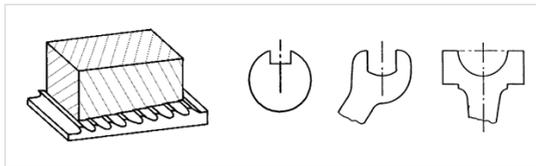


Abbildung 2-9: Planräumen (links) und Profile (rechts) nach (Fritz & Schulze, 2015)

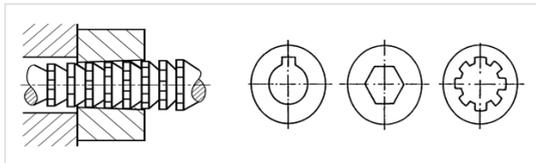


Abbildung 2-10: Innenprofilräumen (links) und Profile (rechts) nach (Fritz & Schulze, 2015)

Das Räumen selbst kann weiter in Innen- und Außenräumen unterteilt werden, wie in Abbildung 2-11 dargestellt. In der vorliegenden Arbeit kommt das Verfahren des Innenräumens zum Einsatz. Für jede Verfahrens-Ausprägung ist ein eigenes Werkzeug notwendig. Die Herstellung der Räumwerkzeuge ist sehr kostenintensiv und daher zumeist in der Serienfertigung zu finden.

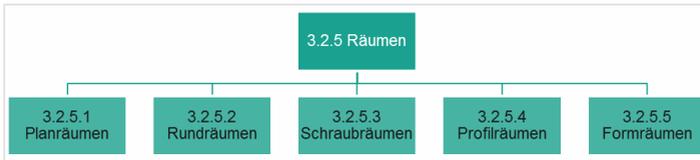


Abbildung 2-11: Verfahrensarten des Räumens nach (Deutsches Institut für Normung e. V., 2003)

### 2.2.4.1 Räumwerkzeug und Werkzeugparameter

Ein Räumwerkzeug kann in einem Bearbeitungsschritt das fertige Bauteil bzw. die Endgeometrie herstellen. Weiterhin ist für eine gesteigerte Teilezahl, die sich mit der Räumnadel fertigen lässt, ein Reserveteil vorgesehen, der mehrere Spanstufen mit identischen Abmessungen vorhält. Abbildung 2-12 stellt ein solches Werkzeug dar.

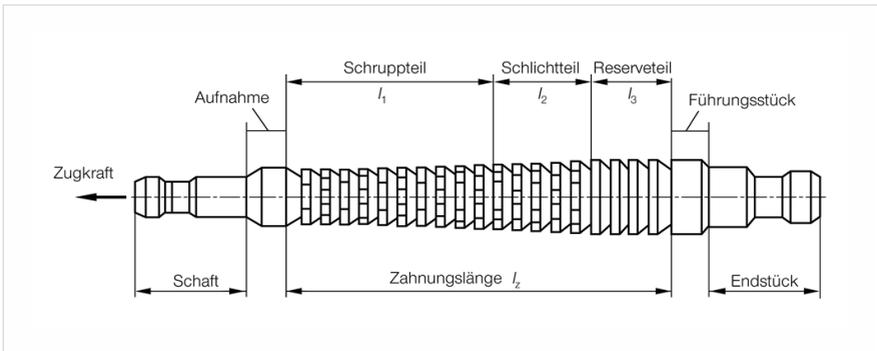


Abbildung 2-12: Aufbau eines Räumwerkzeuges nach (Kühn, 2010)

Das Werkzeug in Ausprägung einer Innenräumnadel ist in mehrere Abschnitte aufgeteilt. Am Schaft wird die Räumnadel in der Maschine gespannt und durch das Werkstück gezogen. Das Werkzeug muss daher die Bearbeitungsschritte Schruppen und Schlichten vereinen. Die gestaffelten Stufen unterteilen sich in den Schruppteil  $l_1$  mit größerer Spanndicke  $h$  und einem Schlichtteil  $l_2$  mit geringerer Spanndicke. Der Reserve- bzw. Kalibrierteil  $l_3$  ist vorgehalten, um Geometrietoleranzen am Ende des Bearbeitungsschritts herzustellen. Nach Entnahme des Werkstücks wird die Räumnadel am Endstück gespannt und wieder in Ausgangsposition in der Maschine bewegt.

Weitere Formen von Nadeln können in (Deutsches Institut für Normung e. V., 1973) eingesehen werden. (Spur, 2014)

Die Auslegung eines Räumwerkzeuges ist in (Deutsches Institut für Normung e. V., 1989) festgelegt. In der Norm lassen sich Werte für den Spanflächenradius  $r$ , die Spankammertiefe  $c$  und die Zahnrückendicke  $e$  finden. Der Zahnvorschub  $f_z$  eines Räumwerkzeuges wird durch die Steigerung der Durchmesser der einzelnen Staffeln festgelegt. Die Abbildung 2-13 visualisiert die unterschiedlichen Parameter der Werkzeuggeometrie. Die Größen Spannungsdicke, Zahnvorschub, Freiwinkel, Spanwinkel etc. sind analog der grundlegenden Schneidendefinition bei der Zerspangung zu erfassen.

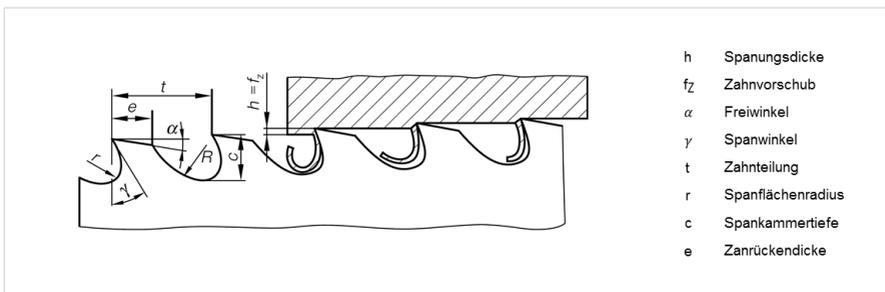


Abbildung 2-13: Schneidenparameter beim Räumen (Fritz & Schulze, 2015)

Abhängig von der Form des Räumwerkzeuges können vor allem beim Außenräumen die Schneiden nur teilweise oder vollständig im Eingriff sein. Dies ist abhängig von der Breite des zu bearbeitenden Werkstücks. Ist die Schneide  $s$  breiter als das Werkstück, wird nur ein Teil genutzt. Für die Auslegung eines Räumwerkzeuges müssen diese Betrachtungen einbezogen werden, da die Schneiden auch in einem Neigungswinkel  $\lambda$  zum Räumhub ausgerichtet sein können. In Abbildung 2-13 und Abbildung 2-14 wird diese Thematik dargestellt.

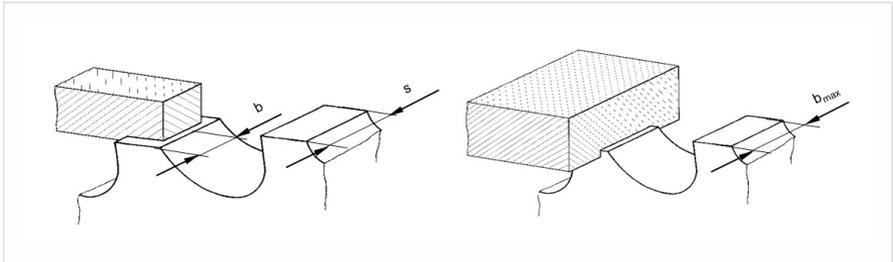


Abbildung 2-14: Spannungsbreite und Schneidenlänge beim Räumen nach (Pausch et al., 2008)

Als Grundlage für die Berechnung von Zerspanungskräften müssen die Parameter der Schneiden definiert sein. Im Falle einer Neigung der Schneiden lässt sich die Eingriffsbreite  $a_p$  folgendermaßen bestimmen:

$$a_p = b \cos \lambda \quad \text{Formel 2-4}$$

Die Teilung  $t$  der Stafflungen ist essenziell für die Gesamtlänge des Werkzeuges. Bei der Bestimmung bzw. Festlegung des Wertes wird zumeist auf empirisch ermittelte Werte zurückgegriffen. Besonders wichtig ist die Einbeziehung des Spankammerquerschnitts  $A_k$ . Andere Werte sind verfahrens- und werkstoffspezifisch. Entsprechende Werte sind beispielsweise in (Spur, 2014) zu finden.

Die Teilung  $t$  lässt sich mittels Tabelle 2-2 wie folgt bestimmen:

$$t = 2,5\sqrt{A_k} = 2,5\sqrt{h * l * x} \quad \text{Formel 2-5}$$

Mit:

Tabelle 2-2: Definitionen Variablen

$t$	= Teilung	[mm]
$A_k$	= Spannkammerquerschnitt	[mm <sup>2</sup> ]
$h$	= Spanungsdicke	[mm]
$l$	= Schnittweg (Spanungslänge, Raum- länge)	[mm]
$x$	= Spanraumfaktor	[ - ]

#### 2.2.4.2 Zerspanungskräfte und Leistungsbedarf

Die Zerspanungskraft beim Räumen wird aus den Teilkräften an den einzelnen Schneiden zusammengesetzt, welche sich im Eingriff befinden. Die Kenntnis der Kräfte ist essenziell für die Prozessauslegung. Entsprechend dem Fräsen oder Drehen greift an der Schneide einer Staffei die Zerspanungskraft  $F_z$  an (vgl. Abbildung 2-15), welche sich weiter unterteilen lässt:

- Schnittkraft  $F_c$  in Schnittrichtung
- Schnittnormalkraft  $F_{cN}$  senkrecht zur Werkstückoberfläche
- Querkraft  $F_p$  tangential Werkstückoberfläche

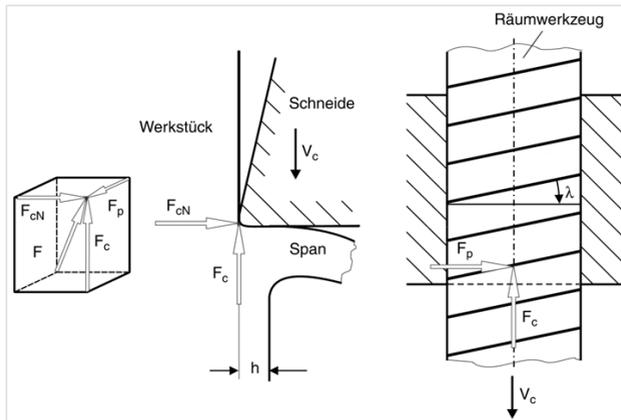


Abbildung 2-15: Zerspanungskräfte beim Räumen nach (Tönshoff & Denkena, 2011)

Die Aktivkraft  $F_a$  wird aus der Schnittkraft selbst und der Schnittnormalkraft zusammengesetzt. Da beim Räumen lediglich eine Hauptkraft, bestehend aus Zerspanungskraft und Reibungskraft in Zugrichtung des Werkzeugs leistungserzeugend ist, stellt diese gleichzeitig die Wirkkraft  $F_e$  dar. Ist der Neigungswinkel  $\lambda \neq 0$ , so tritt auch eine Passivkraft auf. (Deutsches Institut für Normung e. V., 1982)

Einen Sonderfall stellt das Innenräumen mit symmetrischen Werkzeugen dar. Die Schnittnormalkräfte heben sich bei diesem Verfahren gegenseitig auf und die entstehenden Prozesskräfte müssen von der Peripherie wie z. B. der Maschinenführung oder des Werkstückspannsystems aufgenommen werden.

Die Prozesskraft  $F_{PK}$  lässt sich wie folgt bestimmen:

$$F_{PK} = F_c + F_{R,cN} + F_{R,p} \quad \text{Formel 2-6}$$

Sie besteht aus der eigentlichen Schnittkraft  $F_c$  und den Reibkräften  $F_{R,cN}$  und  $F_{R,p}$ .

$$F_{R,cN} = \mu_{cN} * F_{cN} \quad \text{Formel 2-7}$$

$$F_{R,p} = \mu_p * F_p \quad \text{Formel 2-8}$$

Mit Hilfe des Ansatzes von Kienzle lässt sich die Schnittkraft  $F_c$  bestimmen:

$$k_c = \frac{P_c}{Q_w} = k_{c1,1} \left( \frac{h}{h_0} \right)^{-m_c} \quad \text{Formel 2-9}$$

$$F_c = k_c \sum_{j=1}^z b_j * h_j * z_j \quad \text{Formel 2-10}$$

Mit:

Tabelle 2-3: Definitionen Variablen

$F_c$	= Schnittkraft	[N]
$b$	= Spanungsbreite	[mm <sup>2</sup> ]
$h$	= Spanungsdicke bzw. Staffellung	[mm]
$k_c$	= spezifische Schnittkraft	[N/mm <sup>2</sup> ]
$z_c$	= Zähne im Eingriff	[ - ]

Die werkstoffabhängigen Werte  $k_{c1,1}$  und  $m_c$  sind hierbei Tabellenwerken zu entnehmen. Die Vergleichsgröße  $h_0$  wird allgemein zu  $h_0 = 1\text{mm}$  gesetzt. (Tönshoff & Denkena, 2011)

Die Gesamtschnittkraft beim Räumen ergibt sich als Summe aller Staffellungen. Da beim Zerspanungsprozess das Werkzeug durch das Bauteil gezogen wird, ist immer nur ein Teilbereich im Eingriff, dessen Momentaufnahme schematisch in Abbildung 2-16 dargestellt ist. Die Kraft steigt mit Eintritt der ersten Staffel sprungartig (rechts) oder linear (links) bei einem Neigungswinkel der Schneide  $\lambda > 0$  und steigt bzw. sinkt bei Schneidenaustritt mit jeder Staffel. Der Schrubb- und Schlichtbereich unterscheidet sich hierbei aufgrund der unterschiedlichen Spanungsdicken. (Tönshoff & Denkena, 2011)

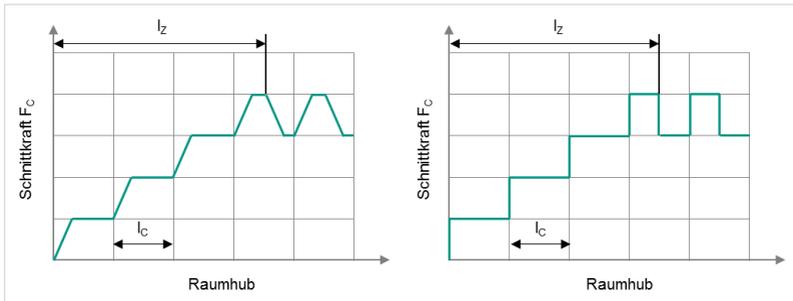


Abbildung 2-16: Schnittkraftverlauf beim Räumen nach (Spur, 2014)

Werden die einzelnen Schnittkräfte sowie die Reibungskräfte über das gesamte Werkzeug hinweg summiert, lässt sich die gesamte Prozesskraft bestimmen.

$$F_{c,ges}(s) = \sum_{i=1}^z F_{c,i} \quad \text{Formel 2-11}$$

$$F_{PK,ges}(s) = \sum_{i=1}^z F_{PK,i} \quad \text{Formel 2-12}$$

Die Kenntnis der Gesamtprozesskraft ist notwendig, um eine geeignete Maschine für die Zerspanung zu wählen bzw. die erforderliche Antriebskraft bestimmen zu können. Die erforderliche Arbeit – berechnet aus Schnitt- und Reibungskräften – lässt sich durch folgende Formel bestimmen:

$$W_{PK} = F_{PK} * l_c \quad \text{Formel 2-13}$$

Über die Länge des Werkzeuges oder die Prozessdauer lässt die Gesamtarbeit folgendermaßen berechnen:

$$\begin{aligned} W_{PK,ges} &= \int_{s=0}^{l_c} F_{PK,ges}(s) ds \\ &= \int_{t=0}^{t_c} P_{PK,ges}(t) dt \end{aligned} \quad \text{Formel 2-14}$$

Eine weitere wichtige Größe ist die erforderliche Gesamtleistung. Diese lässt sich mit Hilfe der Schnittgeschwindigkeit im Zerspanungsprozess approximieren:

$$P_{PK,ges}(t) = F_{PK,ges}(t) * v_c$$

Formel 2-15

## 2.3 Warmzerspanung

Die Warmzerspanung beschreibt einen Prozess, bei dem Werkstücke unter der Zuhilfenahme von zusätzlicher Wärme spanend bearbeitet werden. Die Wärme soll dabei möglichst punktuell und oberflächennah eingebracht werden, damit die Stoffeigenschaften des gesamten Werkstücks nicht erheblich vom Ausgangszustand abweichen. Die Wärme wird möglichst nahe der Scherebene eingebracht mit dem Ziel, die Materialfestigkeit an dieser Position zu senken. Das Resultat ist eine reduzierte Zerspanungsleistung, die sich wiederum positiv auf den Verschleiß des Werkzeugs bzw. der Schneide auswirkt. (König & Klocke, 1997)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden erste Versuche bezüglich der Warmzerspanung unternommen. Die Vorwärmung der Materialien ist per Flammen-, Reibungs-, Widerstands- und Plasmaerwärmung erfolgt. Als zu bearbeitende Materialien kommen dabei hochwärmefeste Legierungen auf Co-, Fe-, Ni-, Ti-Basis und Hochleistungskeramiken zum Einsatz. All diese Werkstoffe sind schwer zerspanbar und rufen einen sehr hohen Werkzeugverschleiß an den Schneiden der Werkzeuge hervor. Ein Nachteil der großflächigen Erhitzung der Werkstücke liegt darin, dass die Temperatur großen Einfluss auf die Materialeigenschaften nimmt. Festigkeiten können herabgesetzt werden oder Anlauffarben etc. entstehen, welche einen nachträglichen Prozessschritt wie z. B. eine zusätzliche Wärmebehandlung erfordern, um das Material wieder in den Ursprungszustand zu versetzen. Die Energiequelle, welche in der Lage ist, ein Material sehr schnell und nur punktuell zu erhitzen, erfordert eine sehr hohe Energiedichte. Laser eignen sich hierfür in besonderem Maße, da Energiedichten von  $10^7 \text{ W/cm}^2$  und mehr erreicht werden können. Weitere Untersuchungen haben sich daher mit dem Einsatz von  $\text{CO}_2$ - und Nd:YAG-Lasern bei der laserunterstützten Zerspanung auseinandergesetzt. Diese Laser erfüllen die Anforderungen an die hohe Energiedichte in idealer Weise (Herziger et al., 1993). Abbildung 2-17 veranschaulicht eine solche Bearbeitung schematisch (links) und im Versuch (rechts). Der Laserstrahl wird mittels eines flexiblen Lichtleiters oder Spiegeln möglichst nah an die Schneide des Werkstücks geführt und daraufhin mit Hilfe einer Optik auf die Werkstückoberfläche unmittelbar vor der Schneide fokussiert.

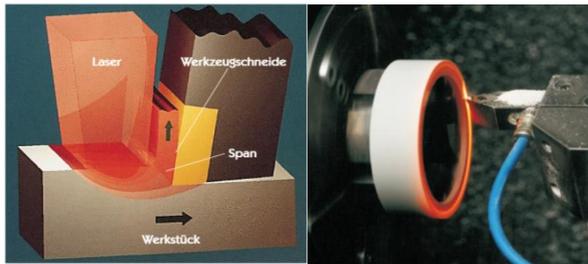


Abbildung 2-17: Laserunterstützte Zerspaltung schematisch (links) (Klocke & Bergs, 1999), laserunterstützte Zerspaltung von Siliziumnitrid-Keramik (rechts) (Zaboklicki, 1998)

Dadurch wird die Scherzone auf Temperaturen von bis zu 1100 °C partiell aufgeheizt und direkt zerspaltet. Es ist anzumerken, dass in dem Beispiel auf der rechten Seite der Abbildung Siliziumnitrid-Keramik als Werkstückmaterial und eine keramische Wendeschneidplatte aus polykristallinem kubischem Bornitrid (PKB) zum Einsatz kommt. Diese Art der Zerspaltung senkt die Bearbeitungskräfte (Klocke et al., 2005) und damit auch den Verschleiß des Werkzeuges um 20 % bis 50 %. (Thomas, 1995)

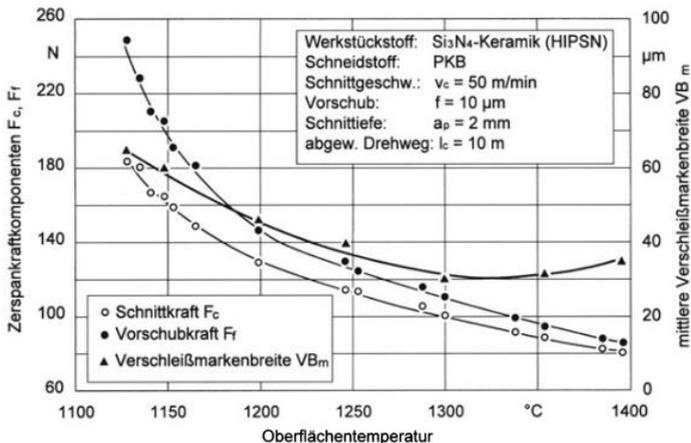


Abbildung 2-18: Zerspaltungskräfte und Werkzeugverschleiß beim laserunterstützten Drehen (IPT, FhG Aachen, 1991)

Das Schaubild in Abbildung 2-18 stellt die Kurven der Schnittkraft  $F_c$ , der Vorschubkraft  $F_f$  und der Verschleißmarkenbreite  $VB_m$  über die Oberflächentemperatur dar. Es ist erkennbar, dass die Vorschubkräfte sich bei einer Temperaturerhöhung von 1100 auf 1400 °C fast halbieren. Auch die Schnittkraft und die Verschleißmarkenbreite nehmen erheblich ab. Diese Beobachtungen lassen sich auf die Vorheizung mittels Laser zurückführen. (König & Zaboklicki, 1994)

Auch beim Fräsen gibt es entsprechende Untersuchungen zur laserunterstützten Zerspanung. In diesem Fall wird ein schwer zerspanbarer Stahl (35NCD16  $R_m = 1800 \text{ N/mm}^2$ ) mit einem Messerkopf zerspannt, der mit Hartmetallschneidplatten ausgestattet ist. Die Schnittwerte betragen  $f_z = 0,2 \text{ mm}$  und  $a_p = 1 \text{ mm}$  bei einer Schnittgeschwindigkeit von 170 m/min, Abbildung 2-19. (IPT, FhG Aachen, 1991)

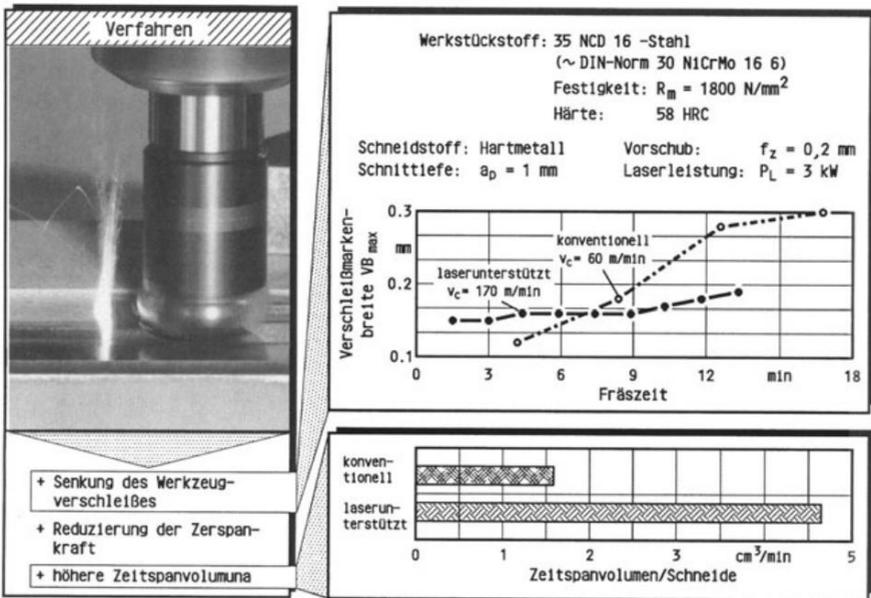


Abbildung 2-19: Laserunterstütztes Fräsen von hochfestem Stahl (IPT, FhG Aachen, 1991)

Aus der vorstehenden Abbildung 2-19 ist ersichtlich, dass die Kurve der Verschleißmarkenbreite bei der laserunterstützten Zerspanung eine viel geringere Steigung aufweist als bei der konventionellen Zerspanung dieses Werkstoffes bei 60 m/min. Neben

dem reduzierten Verschleiß von fast 90 % fällt auf, dass zusätzlich ein um 300 % höheres Zerspanungsvolumen möglich wird. (IPT, FhG Aachen, 1991)

Durch die laserunterstützte Bearbeitung lassen sich Werkstoffe zerspanen, die meist nur durch Schleifen oder chemische Prozesse bearbeitet werden können. Der notwendige Aufwand und Maschineneinsatz ist jedoch erheblich. Neben der Bearbeitungsmaschine kommen Laserquellen, spezielle Optiken und Schneidstoffe zum Einsatz. Auch der Sicherheitsaspekt ist mit in Betracht zu ziehen, da gesonderte Einhausungen der Maschinen als Schutz gegen austretende Laserstrahlung notwendig sind. Die Warmzerspannung wird aufgrund dieser Gegebenheit daher meist nur selten eingesetzt. (Loosen et al., 1995)

## **2.4 Wärmebehandlung**

In der vorliegenden Arbeit sind insbesondere die Wärmebehandlungsschritte des Einsatzstahls 16MnCr5 und des Vergütungsstahls 42CrMo4 von zentraler Bedeutung, weswegen sich auf den dafür notwendigen Umfang der Grundlagen fokussiert wird.

### **2.4.1 Grundlagen**

Die Wärmebehandlung ist eine Technik, um die Eigenschaften metallischer Bauteile an ihren Einsatzzweck anzupassen. Im vorliegenden Fall sind die Methoden insbesondere für die Werkstoffe 16MnCr5 und 42CrMo4 von großem Interesse. Die Werkstücke weisen einen definierten Gefügestand auf und werden nacheinander festgelegten Zeit-Temperatur-Folgen ausgesetzt, bei denen sich die Mikrostrukturen im Material ändern. Dadurch kann das Werkstück an die notwendigen Eigenschaften für die spätere Verwendung angepasst werden (Deutsches Institut für Normung e. V., 1994b).

Die Wärmebehandlung wird durchgeführt, um die Werkstückoberfläche verschleißfester einzustellen und Spannungen durch mechanische oder thermische Belastungen abzubauen. Das Bauteil wird durch Definition des Verhältnisses zwischen Beanspruchbarkeit, Werkstückgeometrie und Abmessungen derart optimiert, dass eine hohe Lebensdauer gewährleistet wird (Liedtke, 2008). Die Wärmebehandlung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Zerspanbarkeit des Werkstoffes und wird daher meist am

Ende der Bearbeitungskette, wenn das Werkstück einen endkonturnahen Zustand erreicht hat, durchgeführt. (Läpple, 2014)

Das Härten basiert auf einer oberflächlichen oder durchgreifenden Martensitbildung im Ausgangsmaterial auf Eisenbasis. Der Ablauf wird durch ein Erwärmen auf Härtetemperatur, die abhängig vom Kohlenstoffgehalt ist und nachgeschaltetes Abschrecken charakterisiert. Die Abschreckgeschwindigkeit muss dabei höher gewählt werden als dies an ruhender Atmosphäre geschehen würde (Deutsches Institut für Normung e. V., 1994a).

Die Gefügestruktur bei unterschiedlichen Temperaturen von Eisenmetallen über deren Kohlenstoffgehalt sind im  $\text{Fe}_3\text{C}$ -Diagramm, Abbildung 2-20 dargestellt. Ein untereutektoider Stahl besitzt bei Raumtemperatur ein ferritisch-perlitisches Gefüge, wobei der Perlit aus plattenförmigen Ferrit- und Zementitkristallen ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) besteht. Wird das Material erwärmt, löst sich zunächst das Zementit. Nach Erreichen der  $A_{c1}$  (P-S) Linie beginnt die Umwandlung in feinkörnigen Austenit, aufgrund der plattenförmigen Anordnung des Perlits ausgehend von den Korngrenzen, die als Kristallisationskeime dienen. Es liegt nun ein ferritisch-austenitisches Gefüge vor, wobei die Kohlenstoffatome des Zementits im Austenit gelöst sind. Wird die  $A_{c3}$  (G-S) Linie erreicht, wandelt sich auch das atomare Gitter des verbleibenden Ferrits in eine kubisch-flächenzentrierte Anordnung um. Die Kohlenstoffatome werden nun vollständig in den Zwischengitterplätzen des Austenits eingelagert, weshalb der Vorgang auch als Austenitisieren bezeichnet wird. (Läpple, 2014)

Damit eine vollständige Auflösung des Zementits und eine gleichmäßige Kohlenstoffverteilung sichergestellt sind, muss das Material lange genug auf einer Härtetemperatur von ca. 890 °C gehalten werden. Die korrespondierenden Härtetemperaturen variieren je nach chemischer Zusammensetzung des Materials und können mit Hilfe des ZTA-Schaubilds (Zeit-Temperatur-Austenitisierung) für Stahlwerkstoffe abgelesen werden.

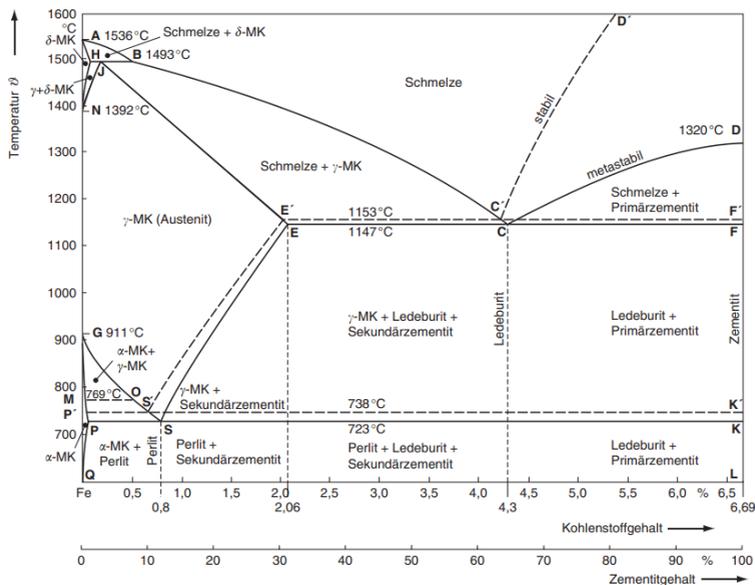


Abbildung 2-20: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm für unlegierte Stähle (Bargel, 2018)

Abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit stellen sich unterschiedliche Gefüge ein. Ausschlaggebend für die Steigerung der Härte des Bauteils bzw. der Oberfläche ist das Martensit, welches durch das Abschrecken von der Austenitisierungstemperatur gebildet wird. Beträgt die Abkühlgeschwindigkeit weniger als 1 K/s, laufen die Umwandlungsprozesse analog zur Erwärmung ab. Es entsteht die sogenannte Perlitstufe. Mit zunehmender Geschwindigkeit werden die Zeitfenster für die Diffusionsvorgänge enger und die Grenzlinien werden zu tieferen Temperaturen verschoben. Die Diffusion von Fe-Atomen ist nicht mehr möglich sowie die der C-Atome erheblich erschwert. Es bildet sich die Bainit-Stufe. Diese Stufe zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Zähigkeit aus. Diese Gefügeart wird oft in Kernbereichen voluminöser Bauteile gebildet, da die Abkühlgeschwindigkeiten im Kern stärker durch die Wärmeleitung begrenzt werden. Ist die Abkühlgeschwindigkeit  $K_m$  groß genug, so wird der Diffusionsvorgang von Fe- und C-Atomen nicht mehr möglich. Die Kohlenstoffatome sind somit im Gitter zwangsgelöst. Die Martensitbildung basiert daher auf der Bewegung ganzer Atomgruppen, welche durch die zwangsgelösten Kohlenstoffatome verspannt sind.

Dies ist der Grund für die gesteigerte Festigkeit des Martensits. Die Versetzungsbewegungen sind aufgrund der Gitterspannungen behindert, was zu einer hohen Härte und geringer Zähigkeit der Martensitstufe führt. (Läpple, 2014)

### 2.4.2 Einsatzhärten von 16MnCr5

Das Einsatzhärten beschreibt ein Härteverfahren, bei dem nicht härtbare Stähle durch Zuführung von Kohlenstoff in die Randschicht härtbar eingestellt werden können. Das Verfahren ermöglicht die Steigerung der Verschleißfestigkeit der Bauteiloberfläche bei gleichzeitig zähem Kern. Weiterhin kann die Dauerschwingfestigkeit durch die Bildung von Druckeigenspannungen an der Oberfläche gesteigert werden. (Kohtz, 1994)

Das Einsatzhärten besteht aus den drei Schritten Aufkohlen, Härten (Abschrecken) und Anlassen.

Der wichtigste Schritt wird durch die Einlagerung des Kohlenstoffs in die Bauteiloberfläche und das Abschrecken repräsentiert. Dies kann durch Kohlenstoffträger in festen, flüssigen und gasförmigen Medien geschehen. In der vorliegenden Arbeit wird sich auf die Aufkohlung mit gasförmigen Medien beschränkt. (Kohtz, 1994)

#### **Aufkohlen:**

Damit der Kohlenstoff in die Werkstoffoberfläche diffundieren kann, muss das Bauteil bei 880 – 1050 °C im Austenit-Gebiet ( $Ac_3$ ) geglüht werden, wobei die Erwärmung stufenweise und über einen längeren Zeitraum erfolgt. Dies dient dazu, Spannungen durch zu große Temperaturgefälle der Randschicht gegenüber dem Kern zu vermeiden. Es erfolgt ein thermochemischer Prozess, bei dem das Aufkohlungsmittel an der Werkstückoberfläche durch die katalytische Wirkung des Eisens chemisch umgesetzt wird. Die dadurch freigesetzten Kohlenstoffatome werden von der Materialoberfläche absorbiert und die Phasengrenzreaktion tritt ein. Das ermöglicht eine Einlagerung des Kohlenstoffs im Austenitgitter. Entlang der Korngrenzen diffundieren die Atome im Randbereich des Werkstücks, wodurch sich ein Kohlenstoffprofil einstellt. Als gasförmiges Aufkohlungsmedium kann Kohlenmonoxid gemeinsam mit Kohlendioxid, Methan, Methanol, Endogas und Stickstoff mit Methan zum Einsatz kommen. Die Gase stellen unterschiedlich starke Kohlenstoffkonzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen

beim Aufkohlen zur Verfügung, Abbildung 2-21. (Deutsches Institut für Normung e. V., 1994b)

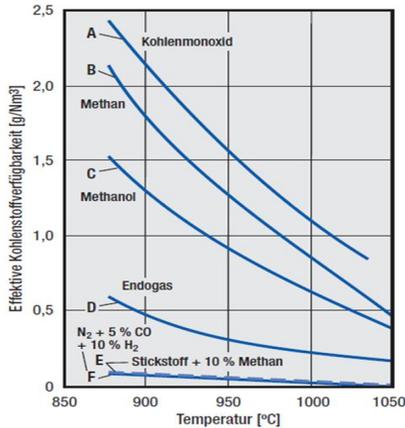


Abbildung 2-21: Kohlenstoff-Verfügbarkeit von Gasen in Abhängigkeit der Temperatur (Liedtke, 2008)

Die Löslichkeit des Kohlenstoffs im austenitischen Gefüge ist aufgrund des kubisch-flächenzentrierten Gitter höher als die im ursprünglichen Gefügezustand bei Raumtemperatur, weswegen der Kohlenstoff aus dem Trägermedium in die Werkstückoberfläche diffundiert. Mit steigender Konzentration im Rand beginnt die Durchwanderung in tiefere Bereiche der Oberfläche. Die dadurch entstehende Verteilung ist für den späteren Härteverlauf verantwortlich. Die Diffusionsgeschwindigkeit und die letztendliche Tiefe, in die die Atome vordringen, hängt von dem Konzentrationsgefälle von Randschicht und Kern sowie der Aufkohlungstemperatur ab. Abbildung 2-22 stellt den Prozess schematisch dar. (Liedtke, 2009), (Grosch, 2016)

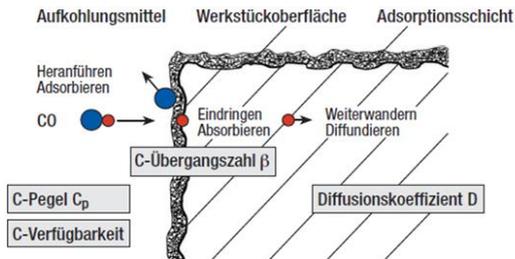


Abbildung 2-22: Schematische Darstellung des Aufkohlungsprozesses (Liedtke, 2008)

Übliche Werte für Kohlenstoffeinlagerungen im Randbereich liegen zwischen 0,7 - 0,9 Ma.-%. Höhere Konzentrationen im Randbereich führen zu Zementitausscheidungen an den Korngrenzen oder erhöhtem Restaustenit, was eine Versprödung zur Folge hat. Bei Werten unter 0,7 Ma.-% nimmt die Härte deutlich ab. (Läpple, 2014)

Das für den Aufkohlungsprozess notwendige Trägermedium besteht meist aus Kohlenwasserstoff-Spaltprodukten von flüssigen und gasförmigen C-O-H-Verbindungen. Reines Methan und Propan wird bevorzugt beim sogenannten Normalverfahren unter Atmosphärendruck eingesetzt, da die Nutzung reiner Kohlenwasserstoffgase einige Vorteile wie z. B. keine Randoxidation des Bauteils, kurze Taktzeiten, geringerer Gasverbrauch und gleichmäßiger Prozessablauf gewährleistet. Es bieten sich zwei Möglichkeiten zur Herstellung der Gase an, einerseits unter Verwendung einer sogenannten Spaltretorte, welche sich innerhalb oder außerhalb des Durchstoßofens befinden kann und dem Ofengas die Spaltprodukte (CH-Verbindungen) zuführt, oder andererseits der direkten Zuführung von kohlenstoffhaltigen Gasen in die Ofenatmosphäre. Am wirtschaftlichsten geschieht die Gaserzeugung in Form einer externen Teilverbrennung bei etwa 1000 °C in Gasgeneratoren. Dem Prozess muss hierfür Energie zugeführt werden, weswegen das erzeugte Trägergas auch Endoträgergas genannt wird. Es nimmt ca. 20 - 35 Vol.-% des Prozessmediums ein. Zur Regelung des Kohlenstoffpegels im Ofen wird permanent das Aufkohlungsmedium (Propan 3 Vol.-%, Methan 10 Vol.-%) beigesteuert, da permanente Druckverluste und somit auch C-Verluste durch Chargieröffnungen etc. des Ofens ausgeglichen werden müssen. (Grosch, 2016)

Die folgende Tabelle gibt eine kurze Übersicht über mögliche Ofenatmosphären.

Tabelle 2-4: Zusammensetzung von Endoträgergasen und Methanolsplattgas (Deutsches Institut für Normung e. V., 1989)

Ausgangsgas	Zusammensetzung des Trägergases
Propan	CO: 23,7 Vol.-%; H <sub>2</sub> : 31,5 Vol.-%; Rest: N <sub>2</sub>
Methan	CO: 20,5 Vol.-%; H <sub>2</sub> : 40,5 Vol.-%; Rest: N <sub>2</sub>
Methanol	CO: 33,3 Vol.-%; H <sub>2</sub> : 66,7 Vol.-%
Stickstoff (60 %) und Methanol (40 %)	CO: 20,0 Vol.-%; H <sub>2</sub> : 40,0 Vol.-%; Rest: N <sub>2</sub>

### Härten:

Durch das Abschrecken des heißen Werkstücks auf Raumtemperatur entstehen Gefüge im Material, die durch den eingelagerten Kohlenstoff „verspannt“ werden. Es stellt sich dadurch ein Härteverlauf von der Randschicht senkrecht Richtung Kern ein. Je nach Anwendung kann das Bauteil direkt im Anschluss an den Aufkohlungsprozess abgeschreckt werden, wobei jedoch die Härtetemperatur der Aufkohlungstemperatur entsprechen muss. Das Härten durch Abschrecken kann auch zu einem späteren Zeitpunkt stattfinden. Dazu muss das Material wieder erhitzt und anschließend abgeschreckt werden. Die zu wählenden Temperaturen liegen im Bereich von 780 – 820 °C beim Randschichthärten und zwischen 860 – 900 °C im Falle des Kernhärtens, bezogen auf Stähle aus Mn-Cr Legierungen. (Läpple, 2014)

### Anlassen:

Der letzte Schritt im Prozessablauf des Einsatzhärten ist das optionale Anlassen. Es dient der Reduzierung von Eigenspannungen ohne Beeinflussung der Randschichthärte, der Erhöhung von Duktilität und Zähigkeit des martensitischen Gefüges und der Verringerung des Restaustenitgehalts. Dadurch lässt sich beispielsweise die Bauteiloberfläche durch Reduzierung der Rissbildungsgefahr besser Schleifen. Der zu wählende Temperaturbereich für das Anlassen liegt bei ca. 150 - 180 °C (unlegiert) und 160 - 200 °C (legierte Stähle). Der Vorgang kann je nach gefordertem Ergebnis an Luft, im Ölbad oder anderen Wärmebädern durchgeführt werden. Nach Erreichen der Anlass-

temperatur wird diese isotherm gehalten und danach das Bauteil langsam wieder abgekühlt. Die Haltedauer ist abhängig von der Bauteilgeometrie und beträgt meist 1,5 - 4 Stunden (Läpple, 2014). Da sich beim Anlassen eine geringfügig verminderte Gesamthärte einstellt, sollte der Verlust schon beim Härtevorgang berücksichtigt werden. Die Abbildung 2-23 ermöglicht eine Vorhersage des Härteverlusts auf Basis der Temperatur oder Haltedauer. Auf der linken Seite wird der Härteverlust in Abhängigkeit der Anlasstemperatur, auf der rechten Seite der Verlust über die Anlassdauer dargestellt.

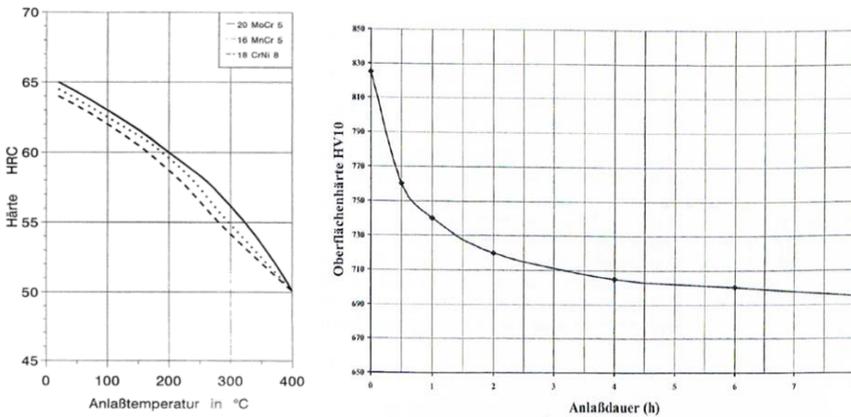


Abbildung 2-23: Härteverlust durch Anlassen über Temperatur (links) (Kerspe, 2000) und Anlassdauer (rechts) (Grosch, 2016)

**Anlagentechnik:**

Für das Gasaufkohlen kommen in der industriellen Serienfertigung meist sogenannte Durchstoßöfen zum Einsatz, bei dem mit Bauteilen beladene Gestelle durch den Ofen durchgestoßen werden. Die peripheren Prozesse wie die Prozessgaserzeugung, Teilverbereitung, Härtung und Nachbehandlung werden aus Platzgründen in einer großen Anlage kombiniert, bei der die fertig gehärteten Werkstücke entnommen und direkt weiterverarbeitet werden können. Abbildung 2-24 erläutert dies anhand einer schematischen Darstellung. Der Prozessablauf sieht vor, dass die Teile in einem ersten Schritt gereinigt werden müssen (1), damit die Oberfläche beim Aufkohlungsprozess gleichmäßig absorptionsfähig ist. Dem Reinigen wird das Vorwärmen (2) und Aufheizen (3) angeschlossen. Dies findet bei unterschiedlichen Temperaturniveaus statt, weswegen

hierzu verschiedene Ofenabschnitte verwendet werden müssen. Nach dem Aufheizen werden die Gestelle mit den Bauteilen in den Aufkühlungssofen (4) eingeschoben, in dem der eigentliche Aufkühlungsprozess und die Diffusion stattfindet. Direkt im Anschluss werden die Teile in Öl abgeschreckt (5) und daraufhin gereinigt (6). In diesem Zustand wird das Anlassen (7) durchgeführt und die Bauteile erhalten ihre angepassten Eigenschaften in Bezug auf Verschleißfestigkeit im Randbereich und Zähigkeit im Kern. In einer Speicherbahn (8) kann eine bestimmte Zahl an Bauteilen für den folgenden Weiterverarbeitungsprozess bevorratet werden.

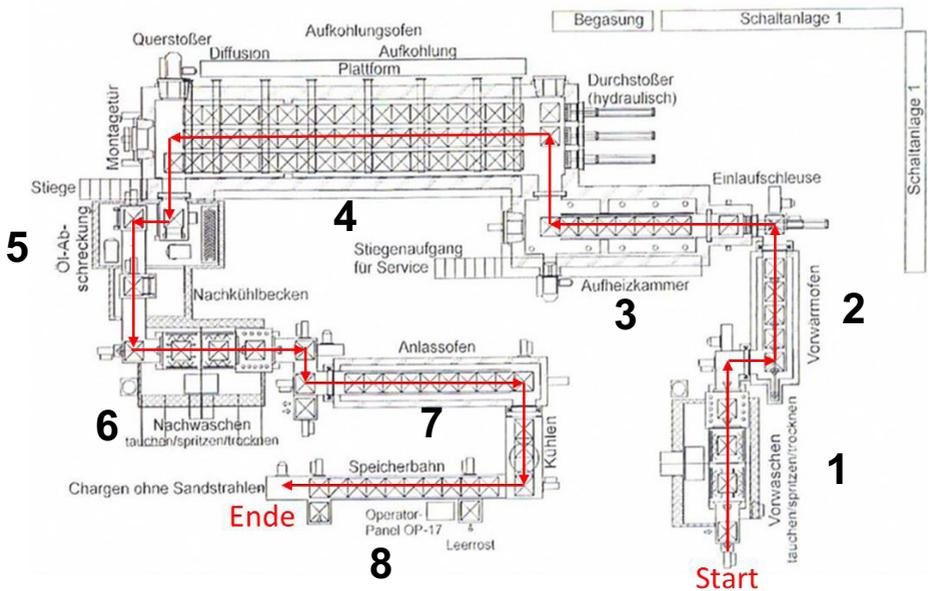


Abbildung 2-24: Durchstoßanlage zum Einsatzhärten (Starck et al., 2005)

### 2.4.3 Induktives Härten

Das induktive Härten verwendet wechselnde Magnetfelder zum Aufheizen der Randschicht eines Bauteils mit dem Vorhaben einer gezielten Härtung. Durch eine unmittelbare Energieeinwirkung in hoher Geschwindigkeit von  $> 1000$  K/s wird es möglich, nur

bestimmte Bereiche oder gesamte Oberflächen eines Werkstücks einer Wärmebehandlung zu unterziehen. Die dabei erreichbaren Einhärtetiefen können im Bereich von 0,1 - 30 mm liegen (Plaul et al., 1979-94). Gegenüber dem Einsatzhärten sind die Durchlaufzeiten sehr gering, da Aufheizen und Abschrecken direkt nacheinander durchgeführt werden und der Aufheizprozess nur wenige Sekunden betragen kann. (Deutsches Institut für Normung e. V., 1994a)

Weitere Vorteile des Induktionshärtens sind:

- Die werkstückangepasste (geometrieangepasst) Härtung
- Wenig Verzug durch partielles Härten
- Kurze Erwärmungszeiten
- Kaum Randoxidation
- Gleichmäßige Einhärtetiefe
- Keine zusätzlichen Prozessmedien
- Hohes Automatisierungspotential.

Das Induktionshärtens wird im industriellen Sektor zumeist beim Härten großer Stückzahlen gleichartiger Bauteile eingesetzt, die entweder ganz oder nur teilweise randschichtgehärtet werden sollen. (ALDUCTO AG, 1999)

Die Randschicht des Werkstücks wird durch elektromagnetische Induktion auf Temperaturen oberhalb der Austenitisierungstemperatur erwärmt. Die Wärme entsteht dabei im Material selbst, indem die Energie aus den Magnetfeldern Wirbelströme erzeugt. Durch die Frequenz der wechselnden Magnetfelder ist es weiterhin möglich, Einfluss auf die Bereiche der Wärmeerzeugung zu nehmen. So können z. B. bei einem Zahnrad entweder nur der Zahnkreis oder der Fußkreis erhitzt werden. Zeitlich gesehen läuft der Aufheizprozess innerhalb von wenigen Millisekunden bis mehreren Sekunden abhängig von der zu erreichenden Einhärtetiefe ab. Der Austenitisierungsvorgang wird auch als Kurzzeitaustenitisieren bezeichnet, weil der Vorgang sehr schnell abläuft. Da die sehr kurzen Haltezeiten dazu führen, dass sich Carbide nicht auflösen können und der Austenit nicht schnell genug homogenisiert werden kann, ist es notwendig, eine bis zu 150 °C erhöhte Härtetemperatur gegenüber dem z. B. Einsatzhärten zu wählen. Durch die höhere Temperatur wird die Diffusionsgeschwindigkeit des Kohlenstoffs gesteigert (Liedtke, 2009). Durch den ständigen Wechsel des Feldes bilden sich Wirbelströme, die die Randschicht durch Reibung der Elektronen an den Atomgittern (Ohm'sches und

Joule'sches Gesetz) aufheizen. Da die Wirbelströme nur in einem geschlossenen Leiterkreis an der Materialoberfläche (Skin-Effekt) fließen können, überlagern sich die Magnetfelder, welche wiederum durch die Wirbelströme hervorgerufen werden. Die Überlagerung bewirkt eine Verringerung der magnetischen Feldstärke zum Werkstückkern hin und kann durch Justage der Frequenz die Wärmeverteilung im Werkstück steuern. Da die Wärmeerzeugung direkt im Werkstück stattfindet, müssen verlustbehaftete Übertragungsformen wie Strahlung, Konvektion oder Wärmeleitung nicht weiter betrachtet werden. Die Wärmemenge ist maßgeblich vom elektrischen Widerstand des Werkstückmaterials abhängig. Weitere Faktoren wie das Quadrat des Stromes im Werkstück und die Haltedauer spielen ebenfalls eine signifikante Rolle. Dabei ist der Induktionsstrom im Werkstück stets proportional zum Wechselstrom im Magnetfeld erzeugenden Induktor.

Abbildung 2-25 stellt die Feldlinien um eine Spule und den Induktor im Schnitt schematisch dar. (Kegel, 1961)

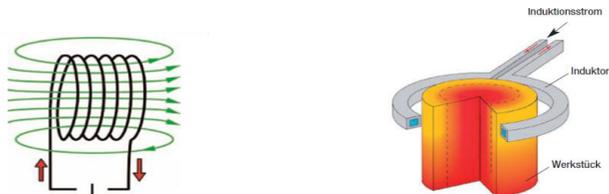


Abbildung 2-25: Spule mit elektromagnetischem Feld (links) und Erwärmungsprinzip eines Werkstücks mittels Induktion (rechts) (Liedtke, 2008)

Wie schon beim Einsatzhärten aufgeführt, ist der Kohlenstoff in der zu härtenden Randschicht bzw. dem Werkstückmaterial ausschlaggebend für den Härteverlauf. Der Kohlenstoffgehalt muss bei mindestens 0,35 Ma.-% liegen. Weiterhin muss das Ausgangsgefüge in homogener Form vorliegen, da die kurzen Taktzeiten keine langen Umwandlungsprozesse zulassen. Der Stahl sollte optimaler Weise kurze Diffusionswege an den Korngrenzen entlang und ein Gefüge mit leicht löslicher Carbidstruktur aufweisen, was bei Vergütungsgefügen, feinkörnigen Weichglühgefügen und normalisierten Gefügen in der Regel vorliegt. (Dmytro, 2013)

Die Werkstoffzusammensetzung verfügt weiterhin oft über einen sehr geringen Phosphorgehalt (weniger als 0,025 %) und maximal 2 % Chromanteil, da dies die Karbidbildung positiv beeinflusst und somit längere Aufheizzeiten erfordern würde. Die positiven

Eigenschaften von Chrom und Molybdän wirken sich auf den Kern mit gesteigerter Zähigkeit aus, Mangan und Silizium sorgen für die Verringerung der Rissempfindlichkeit. Jedoch erfordern die Legierungselemente meistens höhere Austenitisierungstemperaturen und -zeiten. Am geeignetsten für das Härteverfahren sind Vergütungsstähle nach (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018) oder Wälzlagerstähle nach (Deutsches Institut für Normung e. V., 2015). Einsatzstähle sind nach dem Aufkohlen ebenfalls durch Induktion härtbar. (Plaul et al., 1979-94)

Die Eindringtiefe  $\delta$  ist ein maßgeblicher Parameter zur Steuerung des induktiven Härteprozesses. Sie gibt basierend auf dem Skin-Effekt die Tiefe an der Materialoberfläche in senkrechter Richtung zum Kern hin an, bei der die Stromdichte 37 % der maximalen Stromdichte beträgt. An dieser Stelle werden 86 % der eingebrachten Energie in Wärme umgesetzt. Dies berechnet sich mit  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ] für den spezifischen Widerstand,  $\mu_r$  für die Permeabilitätszahl des zu erwärmenden Materials und  $f$  [1/s] für die Frequenz des Wechselstromes wie folgt:

$$\delta \approx 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad \text{Formel 2-16}$$

Die Werte  $\rho$  und  $\mu_r$  sind nicht direkt linear temperaturabhängig. Da weiterhin  $\mu_r$  nur sehr geringfügig über der Curie-Temperatur liegt, ist die Frequenz der bedeutsamste Parameter, um die Eindringtiefe einzustellen. Wird die Frequenz des Wechselstromes größer, so verschiebt sich die Eindringtiefe weiter in den Randbereich, wohingegen sie mit kleinerer Frequenz in Richtung Kern wandert. Tatsächlich ist  $\delta$  jedoch etwas größer als mit der Formel bestimmt, da die Wärmeleitung des Materials eine weitere Rolle spielt. Generell ist die Eindringtiefe nur halb so groß wie die des Stromes, was darin begründet wird, dass die Leistung proportional zum Quadrat des Stromes ist. Auch der Abstand des Induktors zum Werkstück beeinflusst die Energiekonzentration in der Randschicht des Werkstücks und die Energiekonzentration wirkt sich auf die Wärmeleitung im Werkstück aus. So führt ein größerer Abstand zu einer Verringerung der Energiekonzentration und somit zu einer größeren Einhärtetiefe. (Kegel, 1961), (Läpple, 2014)

Generell kann beim Induktionshärten von Fahrzeugkomponenten zwischen Mittelfrequenz-, Hochfrequenz- und Hochfrequenzimpulshärten unterschieden werden. Während das Mittelfrequenzhärten (100 W - 2500 kW) zum Durchwärmen von Werkstücken eingesetzt wird, kommt das Hochfrequenzimpulshärten nur für kleinere Bauteile zum

Einsatz. Die Impulsdauer beträgt dabei 1 - 100 ms. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass sich Parameter wie die Aufheizdauer, die Generatorleistung, Werkstückgeometrie und Induktor etc. ebenfalls auf die Einhärtetiefe auswirken und an den Prozess angepasst werden müssen. Die folgende Tabelle führt die Frequenzen gegenüber der erreichbaren Eindringtiefe auf.

Tabelle 2-5: Einhärtetiefe gegenüber Frequenz (Rodman, 2013)

	Frequenzbereich (kHz)	Einhärtetiefe (mm)
Mittelfrequenzhärten	3 - 10	2 – 8
Hochfrequenzhärten	400 – 2500	0,1 – 2
Hochfrequenzimpulshärten	27000	0,05 - 0,5

## 2.5 Strahlen (Verfestigungsstrahlen)

Das Strahlen beschreibt eine mechanische Oberflächenbehandlung von Bauteilen und wird nach (Deutsches Institut für Normung e. V., 2020) dem lokalen Umformen zugeordnet. Man kann das Reinigungs- und Verfestigungsstrahlen unterscheiden. Grundsätzlich wird ein Strahlmittel auf eine Geschwindigkeit von bis zu 300 m/s beschleunigt und auf die Werkstückoberfläche appliziert. Beim Auftreffen auf die Materialoberfläche wird die kinetische Energie der Teilchen genutzt, um den gewünschten Effekt zu erzielen. Abhängig vom eingesetzten Strahlmittel und der Beschleunigungsart ist der Prozess abrasiv zum Reinigen oder plastisch zum gezielten Ändern der Materialeigenschaften im Oberflächenbereich des Werkstücks. Die plastischen Deformationen nach dem Prinzip der Kaltverfestigung führen zu einer Umordnung bzw. Neubildung von Gitterstörungen und somit zu einem erhöhten Widerstand gegen erneute plastische Verformung. Zusätzlich werden in tieferen Schichten der Werkstückoberfläche die eingebrachten Druckeigenstressungen durch Zugeigenstressungen ausgeglichen. Je weicher der Grundwerkstoff, desto stärker wirkt sich der Kaltverfestigungsprozess aus. (Scholtes & Vöhringer, 1989)

Abbildung 2-26 stellt den Vergleich der Tiefen Härte von geschliffenen Proben aus vergütetem Ck45 im kugelgestrahlten und ungestrahlten Zustand dar. Es ist deutlich erkennbar, dass der Kugelgestrahlte Ck45 eine größere Einhärtetiefe aufweist.

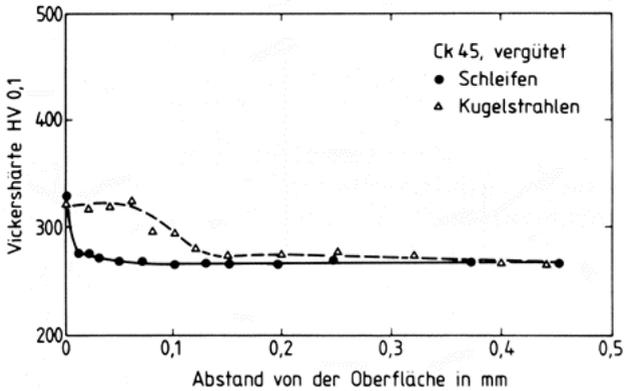


Abbildung 2-26: Vergleich des Tiefenhärteverlaufs Schleifen ggü. Kugelstrahlen (Scholtes & Vöhringer, 1989)

Die Kombination der entstehenden Spannungen in der Randschicht des Bauteils wirkt sich positiv auf die Beanspruchbarkeit mit zyklischen Lasten aus, da der zusätzliche Druck in der Oberfläche einer Rissbildung bei Zug entgegenwirkt. Durch diesen Mechanismus können Bauteile durch Strahlen in Bezug auf ihre Dauerschwingfestigkeit verbessert werden. (Wohlfahrt, 1989)

### Eigenspannungen

Beim Auftreffen des Strahlguts auf die Werkstückoberfläche entsteht ein mikroskopischer Krater, der durch eine Hertz'sche Pressung ausgebildet wird. Dies ruft Druckeigenspannungen in den unmittelbar angrenzenden Materialschichten hervor, die durch Zugeigenspannungen in den tiefer gelegenen Schichten ausgeglichen werden. Es bildet sich ein sogenanntes Eigenspannungstiefenprofil aus. Dieses Profil ist abhängig von den Prozessparametern und dem Werkstoff des Werkstücks selbst. Am Beispiel von 16MnCr5 ist ein solches Profil in Abbildung 2-27 dargestellt. Die Einflüsse der Strahlgeschwindigkeit auf den Tiefenverlauf der Spannungen sind deutlich zu erkennen.

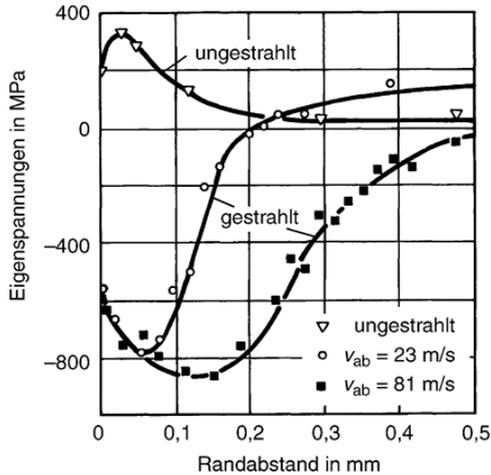


Abbildung 2-27: Eigenspannungsverlauf bei unterschiedlichen Strahlgeschwindigkeiten (Macherauch & Zoch, 2014)

## Strahlanlagen

Ausgehend von der Beschleunigung des Strahlmittels kann zwischen zwei Varianten unterschieden werden, dem Schleudern oder der Fluid-unterstützten Beschleunigung. Während beim Schleudern das Strahlgut selbst durch z. B. rotatorische Schleudermechanismen in Richtung des Werkstücks geschossen wird, kommt beim fluid-unterstützten Strahlen ein Massenstrom wie z. B. Druckluft oder Wasser zum Einsatz, welcher die Partikel mitreißt und die kinetische Energie überträgt. (Gramberg, 1978)

In der folgenden Abbildung 2-28 wird die schematische Darstellung verschiedener Anlagenkonzepte aufgezeigt. Linksseitig das Schleuderprinzip mit Hilfe eines Schleuderrades und Leitschaufeln. Die Strahlgeschwindigkeit wird direkt über die Drehzahl gesteuert. Mittig und rechtsseitig das Massenstromprinzip anhand des Druckkessel- und Injektorprinzips. Die Regelung der Strahlgeschwindigkeit erfolgt bei diesen Prinzipien anhand der der eingesetzten Düsen und dem Luftdruck. (Clausen, 1981)

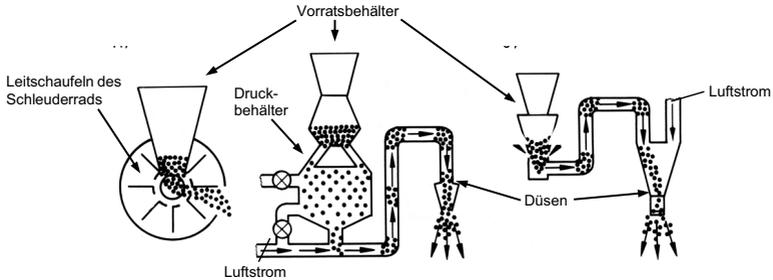


Abbildung 2-28 Prinzipieller Aufbau von Strahlanlagen (Clausen, 1981)

**Energetische Betrachtung:**

Um den notwendigen Energiebedarf für ein gestrahltes Bauteil zu bestimmen, ist hierfür maßgeblich, wie lange der Strahlvorgang dauert und mit welcher kinetischen Energie der Partikelstrom auf die Werkstückoberfläche geschossen wird. Unter der Annahme, dass der Partikelstrom  $\dot{m}$  und die Abwurfgeschwindigkeit  $v_a$  vorliegt, lässt sich mit der Zeit die notwendige Energie  $E$  mit Hilfe von  $P_{Besch}$  bestimmen

$$E = P_{Besch} \cdot t \quad \text{mit} \quad P_{Besch} = \frac{1}{2} \dot{m} v_a^2 \quad \text{Formel 5-13}$$

Ein alternativer Ansatz ist die Untersuchung der Primärenergie, welche die Strahlanlage verbraucht. Der Energieeinsatz ist dabei jedoch immer spezifisch für die eingesetzte Anlage und verbauten Komponenten. Jeder Energieverbraucher, der elektrischen Strom in eine Bewegung etc. umsetzt, ist wirkungsgradbehaftet. Dies bedeutet, dass zwei unterschiedliche Strahlanlagen von z. B. anderen Herstellern einen unterschiedlichen Primärenergiebedarf für den gleichen Bearbeitungsprozess haben. Daher ist die Betrachtung der Prozessenergie die besser vergleichbare Größe zur energetischen Betrachtung bzw. deren Übertragbarkeit.

### 3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im nachfolgenden Kapitel wird die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit dargelegt. Eine geschickte Kombination von einzelnen Prozessschritten mit Augenmerk auf eine energieeffiziente Herstellung generiert einen alternativen Ansatz zur Produktion des Demonstratorbauteils.

#### 3.1 Zielsetzung

Die Deckung des Energiebedarfs der Menschheit war noch nie so wichtig wie heute. Immer mehr Menschen verlangen nach neuen Produkten, die hergestellt werden müssen. Die dazu notwendige Energie wird vornehmlich in der Industrie zur Gewinnung der Rohstoffe, zur Herstellung von Halbzeugen aus den Rohstoffen und zum mechanischen Bearbeiten der Halbzeuge zum Endprodukt verbraucht. Steigende Rohstoffpreise aufgrund der Verknappung bzw. sich erschöpfenden Vorkommen an Erdöl und anderen fossilen Brennstoffen bei gleichzeitig steigendem Energieverbrauch erfordern eine effiziente Nutzung der Energie und somit energieeffiziente Herstellungsprozesse.

Die Herstellungsprozesse zur Erzeugung von Produkten erstrecken sich über mehrere Prozessschritte hinweg. Bei jedem Prozessschritt muss für eine Effizienzbetrachtung immer das gesamte System in Betracht gezogen werden. Das heißt, nicht nur der eigentliche Herstellungsprozess selbst, sondern auch die dafür notwendige Anlagentechnik und Gebäudetechnik muss analysiert werden. Im Stand der Technik finden sich hierfür unterschiedliche Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs. Jedoch sind diese Möglichkeiten meist nur auf den makroskopischen Sektor bezogen, in dem der Prozess zum Einsatz kommt. Dabei können bereits große Potentiale aufgezeigt werden, was nicht nur den Energieverbrauch selbst, sondern auch die nachhaltige Nutzung von Werkzeugen und Anlagen angeht. Die Betrachtung im Gesamtkontext aller involvierten Anlagen und Prozesse erfolgt jedoch nur selten.

Durch Untersuchungen im industriellen Umfeld war es in der vorliegenden Arbeit jedoch möglich eine solche Analyse der gesamten Prozesskette zur Herstellung eines Getriebebauteils aus einem PKW-Schaltgetriebe durchzuführen. Es ist dabei anzumerken, dass die Betrachtung auf die Prozessenergie der einzelnen Bearbeitungsschritte in den nachfolgenden Analysen beschränkt wird. Die Betrachtungsweise der verbrauchten Primärenergie ist stark abhängig von den eingesetzten Anlagen, deren technischem Stand

etc. Die unterschiedlichen Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten oder Analyse von Maschinen mehrerer Hersteller bergen zu viele nicht bestimmbare Variablen.

Bei dem Bauteil handelt es sich um eine Getriebeschaltmuffe des 5. Gangs eines manuellen Schaltgetriebes.

Die Prozesskette bzw. die Betrachtung der Energieflüsse beginnt mit dem Bearbeitungsschritt nach dem Schmieden des Rohlings. Es folgen mehrere Weichbearbeitungs-, Wärmebehandlungs- und Strahlschritte bis das fertige Bauteil im Getriebe verbaut werden kann. Die gesamte Prozesskette mit den einzelnen Stationen wird auf Energieflüsse für die Herstellung eines Bauteils untersucht und mit der Möglichkeit verglichen, eine andere Prozesskette mit einem anderen Werkstoff einzusetzen, dessen Bearbeitung sich positiv auf die Energie- und Kostenbilanz der Prozesskette auswirkt.

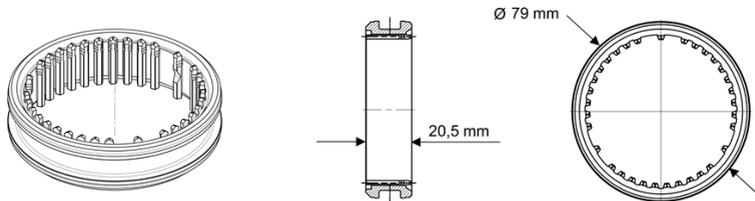


Abbildung 3-1: Demonstratorbauteil Getriebeschaltmuffe 5. Gang manuelles PKW Schaltgetriebe

Abbildung 3-1 stellt die Schaltmuffe dar. Das Bauteil ist als Teil eines manuellen Schaltgetriebes für PKW dafür verantwortlich, das vom Motor übertragene Drehmoment an die Antriebsräder weiterzuleiten. Die Verzahnungen im Inneren der Schaltmuffe stellen durch Verschieben beim Einlegen des Gangs eine kraftschlüssige Verbindung mit den Getriebewellen her und übertragen so das Drehmoment des Motors. Die Anforderungen an das Bauteil sind neben einer hohen Rundlaufgenauigkeit, Verschleißbeständigkeit der Zahnflanken, Zahnfußfestigkeit und die Kernzähigkeit.

Neben der theoretischen Untersuchung der einzelnen Bearbeitungsprozesse erfolgen praktische Versuche. In Hinblick auf den Energiebedarf zur mechanischen Herstellung werden im Rahmen der Arbeit Untersuchungen im industriellen Umfeld und der Versuchsumgebung des wbk Institut für Produktionstechnik durchgeführt. Mit Daten aus dem tatsächlichen Produktionsumfeld kann eine realitätsnahe Analyse der Energieflüsse sicherstellt werden.

Während der Analyse wird von zwei unterschiedlichen Prozessketten bzw. Werkstoffen ausgegangen, Einsatzhärten und 16MnCr5 als Serienwerkstoff und Induktionshärten mit 42CrMo4 als alternativer Werkstoff. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem vermeintlich energieintensivsten Bearbeitungsschritt – der Wärmebehandlung.

## **3.2 Vorgehensweise**

Die Vorgehensweise zur Analyse der Prozessketten in energetischer Hinsicht umfasst ein Ermitteln der notwendigen mechanischen und thermischen Arbeit, die in den einzelnen Stationen zum Einsatz kommt. Dabei spielen auch die Verluste der Anlagen und ihr Wirkungsgrad eine große Rolle. Im jeweiligen Prozessschritt wird ermittelt, wie viel Energie der Herstellungsprozess selbst benötigt und welche Auswirkung dies auf den Gesamtenergieverbrauch der Prozesskette hat. Dabei wird auch geprüft, in welcher Hinsicht Synergieeffekte für eine effizientere Herstellung genutzt werden könnten.

### **3.2.1 Energiebilanz**

Die Vorgehensweise orientiert sich an den beiden Prozessketten zur Herstellung der Werkstücke aus 16MnCr5 und 42CrMo4. Die Prozesskette umfasst die in der folgenden Abbildung 3-2 dargestellten Stationen. Während 16MnCr5 als Einsatzstahl die Prozessroute des Einsatzhärtens durchlaufen muss, kann 42CrMo4 als Vergütungsstahl induktiv wärmebehandelt werden. Da die induktive Wärmebehandlung sehr gezielt und nur auf die zu härtenden Bereiche des Bauteils beschränkt durchgeführt wird, ist der energetische Gewinn hierbei vielversprechend.



Abbildung 3-2: Prozessschritte Herstellung Schaltmuffe

Die Prozessrouten für beide Werkstoffe unterscheiden sich hauptsächlich in der Form ihrer Wärmebehandlung. Während 16MnCr5 einer Einsatz-Wärmebehandlung unterzogen wird, kommt beim Vergütungsstahl 42CrMo4 die induktive Wärmebehandlung zum Tragen. Beginnend mit dem geschmiedeten Rohteil, das in mehreren Weichbearbeitungsschritten in die geometrische Endform überführt wird, ist die Wärmebehandlung angeschlossen. Aufgrund der dabei auftretenden Temperaturgradienten im Prozess ist es möglich, dass die Geometrietreue des Bauteils darunter leidet. Ein Hartbearbeitungsprozess zum Ausgleich von möglichen Verzügen wird daher nachgeschaltet. Am Ende der Prozesskette steht ein Reinigungs- und Verfestigungsstrahlen, das zum einen Zunder und Anlaufspuren beseitigt und zum anderen die Materialeigenschaften in Hinsicht auf die Dauerschwingfestigkeit verbessert.

### Weichbearbeitung

Die Weichbearbeitung umfasst ein Vordrehen der weichgeglühten Rohlinge und das Räumen. Während sich für das Drehen – basierend auf dem entfernten Materialvolumen – die Energiebilanz über Formeln bestimmen lässt, stellt der Räumprozess eine größere Herausforderung dar. Die Berücksichtigung von Reibung, Materialinhomogenitäten, Abnutzung des Werkzeuges etc. erfordern eine experimentelle Zerspanungsuntersuchung. Dem Institut liegt aus dem Graduiertenkolleg 1483 eine Räumnadel vor, die dem Serienwerkzeug entspricht. Mit Hilfe einer hydraulischen Räummaschine und

einer Kraftmessplattform können daher in experimentellen Versuchen die Schnittkraftverläufe detailliert aufgezeichnet und ausgewertet werden. Dies geschieht unter Berücksichtigung des Serienprozesses und den damit verbundenen Zerspanungsparametern. Da das Werkzeug auch für Arbeiten anderer Kollegiaten genutzt wurde, muss ein erhöhter Verschleiß vermieden werden. Die Zerspanung von 42CrMo4 würde aufgrund der höheren Materialfestigkeit das Werkzeug stärker beanspruchen. Daher dienen Analogieversuche an einer elektrischen Außenräummaschine zur Bestimmung der korrespondierenden Werte für eine Schaltmuffe aus 42CrMo4.

### **Wärmebehandlung**

Die Wärmebehandlung unterteilt sich in zwei Varianten, das Einsatzhärten und das induktive Härten. Besonders das Einsatzhärten in einem Durchstoßofen erfordert die Einbeziehung von einer Vielzahl an Parametern, um einen möglichst realitätsnahen Wert bestimmen zu können. Auf Basis der theoretischen Grundlagen wird ein Ofenmodell erstellt und die zu ermittelnden Parameter festgelegt. Analysen aus dem industriellen Umfeld liefern die erforderlichen Werte zur Bestimmung der Energiebilanz. Der Bedarf an Energie für das induktive Härten lässt sich ebenfalls auf Basis von theoretischen Grundlagen und praktischen Analysen bestimmen. Hierbei ist der Aufwand jedoch erheblich geringer, da die Teile einzeln und gezielt wärmebehandelt werden. Der durch den Induktor induzierte Wirbelstrom hat im Gegensatz zum Durchstoßofen weniger Verluste und kann daher einfacher bestimmt und berechnet werden.

### **Hartbearbeitung**

Die Hartbearbeitung dient dem Beseitigen von Verzügen, welche durch die Wärmebehandlung im Bauteil entstehen. Für die Berechnung der Zerspanungskräfte von 16MnCr5 und 42CrMo4 kann im Falle des 16MnCr5 auf die Arbeit von (Meier, 2018) zurückgegriffen werden, die ebenfalls im Rahmen des Graduiertenkolleg 1483 entstanden ist und sich mit dem Bauteilzustand der Schaltmuffe beim Räumen beschäftigt. Für 42CrMo4 wird analog der Weichbearbeitung vorgegangen und mittels Analogieversuchen präparierte Proben, die den Materialparametern für das Serienteil entsprechen, auf einer elektrischen Räummaschine zerspannt und die für die Berechnung notwendigen Materialkennwerte ermittelt. Mit Hilfe der Bauteilverzüge bzw. des zu entfernenden

Materialvolumens lassen sich daraufhin die gesuchten Werte bestimmen. Eine Überprüfung der Werte im Produktionsumfeld kann nicht erfolgen, da die Prozesskette im Werk aufgrund von Maschinenverfügbarkeiten angepasst ist und ein Hartbearbeitungsschritt nicht durchgeführt wird.

## **Strahlen**

Das Strahlen als letzter Bearbeitungsschritt in der Prozesskette besteht aus dem Reinigungs- und Verfestigungsstrahlen. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Energieaufwands ist für beide Verfahren identisch. Basierend auf den Prozessparametern und den eingesetzten Strahlmitteln, lässt sich bestimmen, welche Energieaufwände erforderlich sind. Zur Evaluation der berechneten Ergebnisse werden zudem Analysen der Anlagen des OEM herangezogen und auf die Berechnungen angewendet.

### **3.2.2 Ableiten von Effizienzmaßnahmen**

Nach dem Aufstellen der gesamten Energiebilanz und der Analyse der einzelnen Prozessschritte in Hinsicht auf Einsparungspotentiale wird ein Ansatz generiert, wie die Prozesskette angepasst werden sollte, um die Energieeffizienz zu steigern. Dabei werden nicht nur energetische Einsparungen berücksichtigt, sondern auch monetäre Einsparungen angestrebt. Das Einsparpotential soll möglichst prozessbezogen und im Kontext zu den Folgeprozessen analysiert werden, weil eine Reduzierung der Herstellkosten der Bauteile auch automatisch zu einem verringerten Produktionsaufwand führt. Da die Wärmebehandlung als energetisch aufwändigster Produktionsschritt zu sehen ist, gilt hier höchste Beachtung. Der Vergleich von 16MnCr5 und 42CrMo4 als Basiswerkstoff steht dabei im Vordergrund.

Basierend auf den eruierten Einsparpotentialen wird die Prozesskette neugestaltet. Die Einsparpotentialen der neuen Prozesskette können dabei auf abgeleiteten Annahmen bestehen, welche durch weitere Untersuchungen evaluiert werden müssen. Daher schließt die Neugestaltung der Prozesskette gleichzeitig die Planung von weiteren experimentellen Untersuchungen ein, um die Annahmen zu untermauern.

### **3.2.3 Zerspanungsuntersuchungen**

Als Ergebnis der Analyse von Energiebilanz und den einzelnen Prozessen wird ein neuer Zerspanungsansatz generiert. Mit Hilfe der Materialentfestigung durch Wärme soll die Standzeit der Werkzeuge bei gleichzeitig verkürzter Prozesskette erhöht werden. Die Analyse der Warmzerspanungsuntersuchungen soll darüber Aufschluss geben, inwiefern ein Benefit erzielt und in welcher Weise sich der Prozess in eine serien-nahe Prozesskette integrieren lässt. Die dazu notwendigen Versuche werden basierend auf den Bauteilanforderungen aus dem Serienprozess der Schaltmuffe abgeleitet und entsprechend angepasst. Experimente auf einer elektrischen Räummaschine, untersuchen dabei den neuen Zerspanungsansatz bei gleichzeitiger Analyse der Zerspanung mit Hilfe von Kraftschrieben, Thermografieaufnahmen und Temperaturmessungen.

### **3.2.4 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion**

Im letzten Schritt der Arbeit werden die Einsparpotentiale zusammen dargestellt und geprüft, inwiefern sich die neue Prozesskette im industriellen Bereich realisieren lässt.

Die Ergebnisse werden nicht nur auf ihren reinen Energieverbrauch hin bewertet, sondern auch der monetäre Aspekt der Kosten für die Energie aber auch das Werkzeug mit einbezogen. Dabei wird bewertet, bei welchem Prozess die eingebrachte Energie am effektivsten genutzt wird und durch welche Maßnahmen sich monetäre Einsparpotentiale bieten.

## 4 Prozesskettenanalyse und energetische Bewertung

Die in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse entstanden zum Teil unter Anleitung in einer Abschlussarbeit (A\_Wille, 2015).

### 4.1 Demonstrator-Bauteil

Das dieser Arbeit zugrundeliegende Bauteil wird durch eine KFZ-Getriebeschaltmuffe repräsentiert. Diese Schiebemuffe findet Anwendung in einem manuellen PKW-Schaltgetriebe und erfüllt dort die Aufgabe zur Kraftübertragung des Motordrehmoments in den 5. Gang des Schaltgetriebes.



#### Daten Schaltmuffe:

Einsatz:	5-Gang Getriebe, 5. Gang
Material:	16MnCrS5
Durchmesser:	79,12 mm
Zähne:	33
Modul:	1,665

Abbildung 4-1: KFZ-Getriebeschaltmuffe

In Abbildung 4-1 ist die einsatzbereite Schaltmuffe dargestellt. Das Bauteil weist im Wesentlichen zwei Merkmale auf, die ausschlaggebend für die Funktion sind. Es handelt sich um eine außenliegende umlaufende Nut, in die die Schaltgabel des Getriebes greift und die Verzahnung, welche je nach Position der Schaltmuffe im Getriebe die Kraftübertragung des Motors durch eine der angrenzenden Fahrstufen realisiert. Ein manuelles Schaltgetriebe weist mehrere solcher Schaltmuffen auf – in Abhängigkeit davon, wie viele Gänge das Getriebe besitzt. Abbildung 4-2 visualisiert die beiden Haupttriebwellen in einem Schaltgetriebe mit den unterschiedlichen Fahrstufen und den zugehörigen Schiebemuffen. An der unteren Welle (Getriebeeingangswelle) wird linksseitig durch die Verzahnung das Motordrehmoment in das Getriebe eingeleitet. Die Verzahnungen auf der Welle sind fest mit dieser verbunden. Auf der oberen Getriebe- welle (Getriebeabtriebswelle) sind die Zahnräder auf der Welle gelagert und können frei drehen. Lediglich die Schaltmuffen sind mit ihrer Verzahnung kraftschlüssig mit der

Welle verbunden. In der Mittelstellung greift die Verzahnung der Schiebemuffe nur in die Verzahnung der Welle. Wird diese aus ihrer Mittelstellung durch das Einlegen eines Ganges herausgeschoben, so wird eine kraftschlüssige Verbindung mit dem korrespondierenden Gang hergestellt. Im Falle des dargestellten Bildes wird die Kraft über das Zahnradpaar an der rechten Seite übertragen und der Kraftschluss zur Getriebeabtriebswelle durch die rechte Schiebemuffe hergestellt.

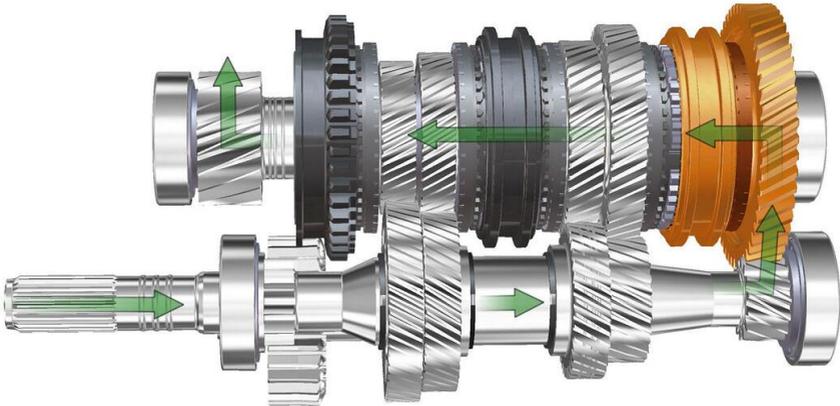


Abbildung 4-2: Darstellung Kraftfluss durch ein PKW-Schaltgetriebe (ZF)

Die Schiebemuffe wird aus dem Einsatzstahl 16MnCr5 in mehreren Bearbeitungsschritten hergestellt. Beginnend mit der Weichbearbeitung des Materialrohlings, der anschließenden Wärmebehandlung, der Hartbearbeitung und dem Reinigungs- bzw. Verfestigungsstrahlen durchläuft das Bauteil mehrere sehr energieaufwendige Herstellungsprozesse. In der Automobilindustrie werden immens hohe Stückzahlen von mehreren Millionen Bauteilen produziert und kommen weltweit zum Einsatz. Daher ist die Betrachtung des Herstellungsprozesses der Bauteile unter Berücksichtigung von Kosten aber auch Energieaufwänden von besonderer Bedeutung.

Der vom Energieaufwand her intensivste Prozess ist die Wärmebehandlung in Form des Einsatzhärtens. Die Materialzusammensetzung von 16MnCr5 erfordert für die Randschichthärtung ein Einbringen von Kohlenstoff in die Randschicht des Materials, was industriell meist in einem Durchstoßofen geschieht und „Aufkohlen“ genannt wird. Der Betrieb eines solchen Ofens erfordert große Stückzahlen an Bauteilen, um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Ein alternativer Wärmebehandlungsprozess, bei dem

die notwendige Energie zum Aufheizen des Bauteils sehr gezielt eingebracht werden kann, ist das induktive Härten. Dieser Prozess erfordert jedoch das Vorhandensein von Kohlenstoff im Ausgangsmaterial, da das Aufheizen nur lokal an der zu härtenden Stelle geschieht und mit Taktzeiten von wenigen Sekunden keine Kohlenstoffdiffusion in entsprechend tiefe Randschichtbereiche von mehreren Millimetern ermöglicht. Für das Induktionshärten im Ausgangszustand ist der im Maschinenbau ebenfalls weit verbreitete 42CrMo4 geeignet.

Die Verwendung von 42CrMo4 als Schalmuffen-Basismaterial könnte energetisch gesehen daher eine lohnenswerte Alternative zu 16MnCr5 darstellen, da das Einsatzhärten durch das Induktionshärten ersetzt werden kann, was einen erheblich energieeffizienteren Prozess darstellt. Die folgende Analyse der Prozessketten beinhaltet daher die Untersuchung der bisherigen Prozesskette und einer solchen für den Einsatz von 42CrMo4 als Bauteilmaterial.

Die Werkstoffe 16MnCr5 und 42CrMo4 zählen beide zu der Gruppe der Edelbaustähle. Sie eignen sich besonders für verschleißbeanspruchte Fahrzeug- und Maschinenbauteile wie Nockenwellen, Zahnräder, Kolbenbolzen, Ritzel, etc.. Die Materialeigenschaften sind verhältnismäßig ähnlich, was erreichbare Härte, Zugfestigkeit und Einsatzgebiet betrifft. Die folgende Tabelle 4-1 stellt die repräsentativen Werte gegenüber. Die Unterschiede der Werkstoffe liegen hauptsächlich in ihrer Materialzusammensetzung, was entsprechende Auswirkung auf Zerspanbarkeit, Zähigkeit und Härteverfahren hat. Beide Materialien lassen sich sehr gut Randschicht härten unter Beibehaltung einer hohen Zähigkeit im Kern. Gerade diese Eigenschaften sind von besonders großer Bedeutung. Die Verzahnung im Kern muss eine hohe Zähigkeit aufweisen, um die Biegebeanspruchung des Zahns dauerhaft aufnehmen zu können und die Randschicht erfordert eine hohe Härte gegen Verschleiß in Folge von Hertz'scher Pressung beim Abwälzen der Zahnflanken aufeinander.

Tabelle 4-1: Materialeigenschaften 16MnCr5 und 42CrMo4

<b>Eigenschaften</b>	<b>16MnCr5</b>	<b>42CrMo4</b>
Dichte	7,76 kg/dm <sup>3</sup>	8 kg/dm <sup>3</sup>
R <sub>m</sub> min	640 N/mm <sup>2</sup>	800 N/mm <sup>2</sup>
R <sub>p</sub> 0,2 min	400 N/mm <sup>2</sup>	400 N/mm <sup>2</sup>
Dehnung min	9 %	10 %
R <sub>m</sub> max	1.180 N/mm <sup>2</sup>	1300 N/mm <sup>2</sup>
R <sub>p</sub> 0,2 max	700 N/mm <sup>2</sup>	700 N/mm <sup>2</sup>

Um den Zustand der untersuchten Materialien zu kennen, wurde jeweils eine Probe 16MnCr5 und 42CrMo4 im metallografischen Labor des Instituts für Werkstoffkunde (IAM) analysiert. Neben der genauen chemischen Bestimmung des Materials wurden Schliffbilder zur Gefügeanalyse angefertigt. Die Proben sollten im normalisierten Zustand analysiert werden. Daher wurde zunächst eine Normalisierungsbehandlung unter Berücksichtigung der ZTU- und ZTA-Schaubilder vorgeschaltet. Die Werkstücke werden innerhalb von 1,5 h auf 865 °C erhitzt und diese Temperatur für 30 Minuten gehalten. Ein anschließendes langsames Abkühlen ermöglicht die Ausbildung des charakteristischen ferritisch-perlitischen Gefüges. Im letzten Schritt wird eine Härteprüfung durchgeführt. Im Anschluss wurden die Proben für die Äquivalenzversuche in den folgenden Kapiteln weichgeglüht.

Die folgende Abbildung 4-3 stellt 1000-fach vergrößerte Aufnahmen der geschliffenen und mit Nital geätzten Proben dar. Auf der linken Seite ist das charakteristische Gefüge eines normalisierten 16MnCr5 mit einer Härte von 142 HV20 sichtbar. Ganz deutlich ist das Vorherrschen von Ferrit in Form von weißen Flächen erkennbar. Auf der rechten Seite ist das Gefüge von 42CrMo4 mit einer Härte von 183 HV20 abgebildet. Es ist erkennbar, dass in diesem Gefüge Perlit überwiegt, was durch die dunklen Flächen sichtbar ist. Dies ist auch dafür verantwortlich, dass 42CrMo4 höhere Zerspanungsarbeit und größeren Verschleiß am Werkzeug hervorruft. Perlit ist im Vergleich zu Ferrit ein Phasengemisch aus Ferrit und Zementit. Die Härte liegt bei 200-210 HV und die Zugfestigkeit bei etwa 600-700 N/mm<sup>2</sup>, wohingegen beim Ferrit die Härte bei 80-90 HV und die Zugfestigkeit bei etwa 200-300 N/mm<sup>2</sup> liegt. Hieraus wird auch deutlich, dass die Auswirkungen auf die Zerspanung im Falle von 42CrMo4 größer als bei 16MnCr5 sind.

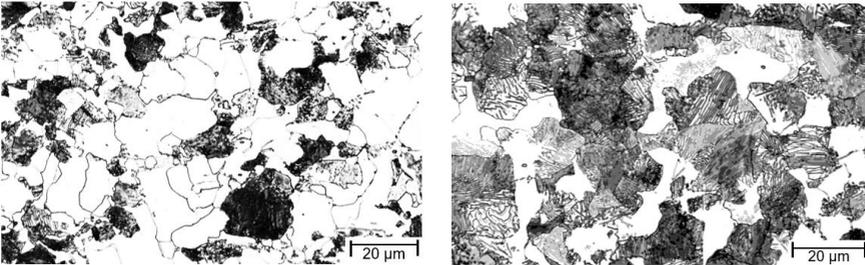


Abbildung 4-3: Schlibbild normalisiertes Gefüge 16MnCr5 (links) und 42CrMo4 (rechts)

## 4.2 Prozesskettenanalyse

Neben der Kenntnis über den exakten Fertigungsablauf zur Herstellung der Schaltmuffe ist es von besonderer Bedeutung, auf welcher Basis die Daten zur Berechnung von Energieaufwänden der einzelnen Prozessschritte stammen. Im Falle der Zerspanungsleistung kann der Energiebedarf mit Hilfe der Formel 2-13 zur Zerspanungsarbeit  $W_{PK} = F_{PK} * l_c$  berechnet werden. Die Arbeit ist damit direkt von den auftretenden Schnittkräften abhängig. Die Schnittkräfte können über die Formeln von Kienzle mittels der spezifischen Schnittkraft berechnet werden. Sie gibt die Kraft an, welche Energie notwendig ist, um einen Werkstoff bei einem Spanungsquerschnitt von  $1 \text{ mm}^2$  zu zerspanen. Allerdings ist die spezifische Schnittkraft  $k_c$  von der Zerspanbarkeit des Werkstoffs, der Spanungsdicke, der Schnittgeschwindigkeit und vor allem von der Schneidengeometrie abhängig. Diese Parameter können sich von Fall zu Fall stark unterscheiden. Die Analyse kann auch von der Betrachtungsrichtung der Primärseite durchgeführt werden. Dabei wird die für den Prozess und den Betrieb der Maschine verbrauchte Energiemenge untersucht. Bei dieser Betrachtungsweise spielen aber eine Vielzahl weiterer Variablen, bezogen auf Wirkungsgrade der einzelnen Maschinenkomponenten eine erhebliche Rolle. Die primärseitige Betrachtungsweise wäre dann nur für exakt die analysierte Maschine zutreffend und lässt sich nicht auf andere Maschinen übertragen. In der vorliegenden Arbeit steht daher die Prozessenergie im Fokus der Untersuchungen.

In Bezug auf die Wärmebehandlung ergibt sich ähnliches. Die notwendige Energie lässt sich auf Basis von Literaturwerten bestimmen, indem von den zu härtenden Volumina

ausgegangen wird. Mit Hilfe der temperaturabhängigen Wärmekapazität des Materials und der korrespondierenden Formel 4-1 kann die Energie bestimmt werden. (Giancoli, 2009)

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT$$

Formel 4-1

In der Realität sind die Energieflüsse bei der Wärmebehandlung wiederum von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, dem verwendeten Wärmebehandlungssofen, den eingesetzten Prozessmedien, der Menge an gleichzeitig wärmebehandelten Bauteilen, dem Alter und dem Betriebszustand des Ofens, der Prozessführung, etc. Da die Wärmebehandlung den energetisch aufwändigsten Prozessschritt darstellt, werden die Werte, welche zur Bestimmung des Energiebedarfs notwendig sind, vor Ort beim Industriepartner ermittelt und alle den Prozess betreffenden Vorgänge analysiert. Alleine durch diese Vorgehensweise lässt sich der möglichst realitätsnahe Energiebedarf bestimmen.

Nach der Wärmebehandlung folgt die Hartbearbeitung, welche dazu dient, Verzüge in den Bauteilen, die sich durch die Wärmebehandlung einstellen können, zu eliminieren. Das Vorgehen an dieser Stelle ist äquivalent zur Weichbearbeitung. Allerdings liegen keine Werkzeuge zur Hartbearbeitung der Getriebeschaltmuffe des 5. Gangs vor, weswegen auf Äquivalenzversuche ausgewichen und vorangegangene Arbeiten des Graduiertenkollegs zurückgegriffen wird, bei der Teilbereiche der Schaltmuffe untersucht wurden.

Im letzten Schritt werden die Schaltmuffen einer Reinigungs- und Verfestigungsbehandlung in Form von Strahlen unterzogen. Das Verfahren reinigt die Bauteile von Zunderschichten, reduziert Grate und steigert die Schwingfestigkeit durch Einbringung von Oberflächenspannungen als Folge des Strahlvorgangs. Der Vorgang erfolgt beim Industriepartner in einer großen Anlage, in welcher sehr viele Teile unterschiedlicher Geometrie gemeinsam gestrahlt werden. Es liegen seitens des Industriepartners keine mechanischen Daten zur Strahlbehandlung der Schaltmuffen während dieses Prozessschrittes vor. Behelfsmäßig wird dafür der Energieverbrauch der gesamten Anlage vor Ort herangezogen und mittels der Bauteile und Bauteilvolumina während eines Strahlvorgangs sowie der eingesetzten Prozessmedien ermittelt.

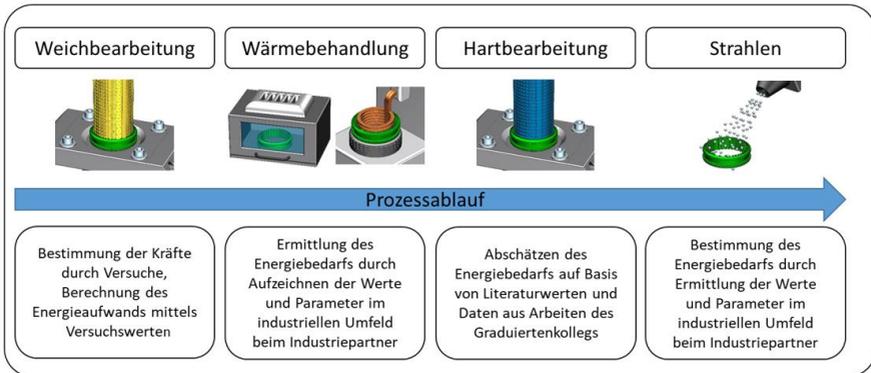


Abbildung 4-4: Prozessdatenerhebung zur Ermittlung der Energieflüsse zur Fertigung der Getriebeschaltmuffe

### 4.3 Weichräumen

In den folgenden Kapiteln wird detailliert auf die Erhebung der einzelnen Daten eines jeden Prozessschrittes unter den voran genannten Bedingungen eingegangen.

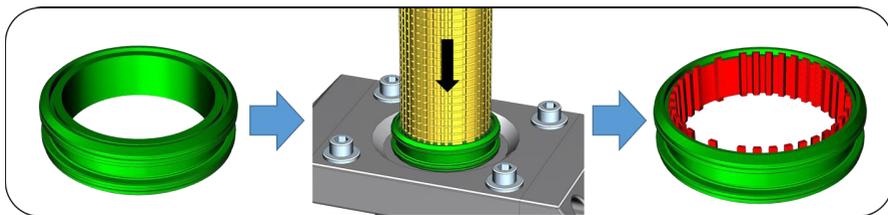


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung des zu entfernenden Materialvolumens zur Fertigung der Verzahnung mittels Räumen

Um die Verzahnung im vorgedrehten Rohling herzustellen, werden insgesamt  $V_z = 5,4 \text{ cm}^3$  Materialvolumen mittels Räumen entfernt. Dabei werden 33 Zähne hergestellt, welche in drei Gruppen unterteilt sind. In Abbildung 4-5 ist links der vorgedrehte Rohling mit 79 mm Durchmesser zu sehen. An der Außenseite ist eine Nut eingedreht,

in die später die Schaltgabel im Getriebe greift. Im Inneren befindet sich eine zylindrische Wandfläche, in die mittels der Räumnadel (Mitte) eine Verzahnung eingebracht werden soll.

Das hierfür notwendige Räumwerkzeug ist aus Titannitrid (TiN) beschichtetem Schnellarbeitsstahl hergestellt und kann in drei Hauptabschnitte unterteilt werden. Im ersten Abschnitt wird die Nuttiefe durch die im Durchmesser gestaffelten Schneiden hergestellt. Der zweite Abschnitt verbreitert die Nuten in die Breite und prägt dadurch die eigentliche Verzahnung aus. Der dritte und letzte Abschnitt ist in durchgängige Ringe zum Schlichten der Kopfflächen und weitere Zahnstufen zum Schlichten der Zwischenräume unterteilt. Am Ende des Räumwerkzeuges folgt die sogenannte Kalibrierstrecke, in der drei Zahnstufen mit identischen Abmaßen vorhanden sind. Diese Schneiden stellen sicher, dass die Verzahnung in der Schaltmuffe am Ende der Bearbeitung innerhalb der Toleranzen liegt. Abbildung 4-6 fasst die technischen Daten des Räumwerkzeuges zusammen.

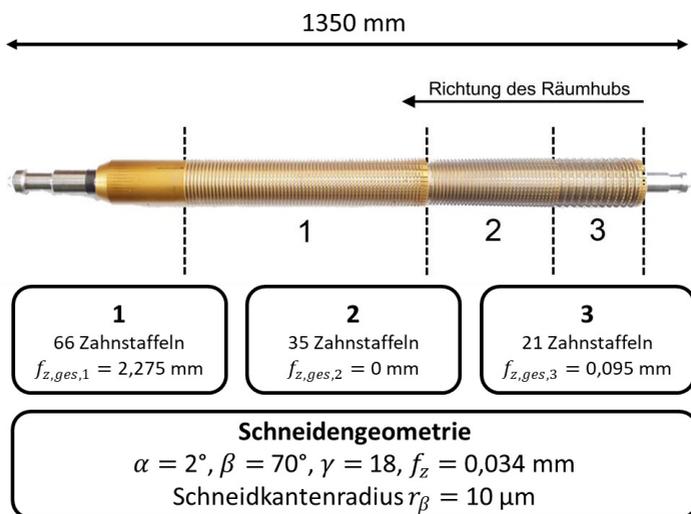


Abbildung 4-6: Räumwerkzeug mit geometrischen Angaben

Das Räumwerkzeug wird in einer hydraulischen Innenräummaschine der Firma Karl Klink für die Bearbeitung der Schaltmuffe montiert. Während eines Bearbeitungshubes wird der Werkzeugschaft an der Zugbrücke derart fixiert, dass sich die Nadel während

des Räumhubes nicht verdrehen kann. Dies wird durch eine Abflachung im Werkzeugschaft nahe der Aufnahme realisiert. Das Werkstück liegt während der Bearbeitung ohne Fixierung auf der Kraftmessplattform auf. Die Zentrierung des Werkstücks wird durch den Werkzeugschaft und die gleichmäßig zunehmenden Zahnstufen sichergestellt. Die Maschine vom Typ RISZ 100x1600x500 kann Schnittgeschwindigkeiten von bis zu 105 m/min erreichen und eine maximale Zugkraft von 100 kN aufbringen. Abbildung 4-7 visualisiert den Aufbau der Räummaschine schematisch auf der linken Seite und zeigt die originale Maschine des Instituts. Hydraulikzylinder bewegen die Zugbrücke mit der voreingestellten Schnittgeschwindigkeit vertikal entlang zweier Führungen. Am Anfang des Zyklus ist das Werkzeug an der oberen Werkzeugaufnahme in der Druckbrücke gespannt, sodass das Werkstück unter der Räumnadel eingelegt werden kann. Die Druckbrücke fährt nun langsam herunter und die Nadel wird durch das Werkstück geführt und dabei gleichzeitig radial durch diese fixiert. Im nächsten Schritt greift die Spannzange der Zugbrücke das Werkzeug an der unteren Werkzeugaufnahme und die obere Spannzange öffnet. Der Räumhub beginnt nun mit der voreingestellten Geschwindigkeit. Nach Beendigung wird das frei liegende Werkstück herausgenommen und die Räumnadel wieder in die Ausgangsposition gebracht. Auf der rechten Seite der Abbildung 4-7 sind die Kraftmessplattform und das eingeführte Räumwerkzeug zu sehen. Das Bauteil befindet sich eingelegt in eine Ringnut, die ein grobes Verrutschen verhindert.



Abbildung 4-7: Schematische Darstellung Räummaschine (links, (Tönshoff & Denkena, 2011)) und Abbildung der Versuchsmaschine am wbk, Kraftmessplattform und Bauteilaufnahme in der Räummaschine (rechts)

Abbildung 4-8 stellt den charakteristischen Schnittkraftverlauf der zuvor vorgestellten Bearbeitung dar. Die Schaltmuffe aus weichgeglühtem 16MnCr5 wird bei einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 80$  m/min in den Untersuchungen eines anderen Kollegiaten

bearbeitet (Bejnoud, 2017). Mittels Formel 2-13 ergibt die geleistete Prozessarbeit  $W_{PK} = 16,9$  kJ, wobei die spezifische Schnittkraft dabei  $k_c = 3200$  N/mm<sup>2</sup> beträgt. Die Schnittgeschwindigkeit ist an Literaturwerte für den Einsatzstahl und die Bearbeitung mit einem HSS Werkzeug angelehnt. In der Industrie werden die Getriebebeschaltmuffen allerdings oftmals mit der Zuhilfenahme von Öl als Kühlschmierstoff und einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von  $v_c = 7$  m/min bearbeitet. Dies hat den Grund, dass der hohe Ferrit-Anteil im Gefüge zur Bildung von Aufbauschneiden und Schmieren neigt, was die Oberflächenqualität und die Reproduzierbarkeit der Bauteile beeinträchtigt. Entsprechende Schnittkraftverläufe der Bearbeitung aus dem industriellen Umfeld liegen jedoch nicht vor. Da sich die Ergebnisse aber auf den Serienprozess übertragen lassen sollen, wurden Äquivalenzversuche durchgeführt, bei denen die spezifischen Schnittkräfte bei Schnittgeschwindigkeit des Serienprozesses für 42CrMo4 und 16MnCr5 ermittelt wurden. Mit Hilfe der experimentell ermittelten Werte und dem Schnittkraftverlauf aus Abbildung 4-8 lassen sich die notwendigen Energiemengen für die Weichbearbeitung der Verzahnung beider Materialien berechnen.

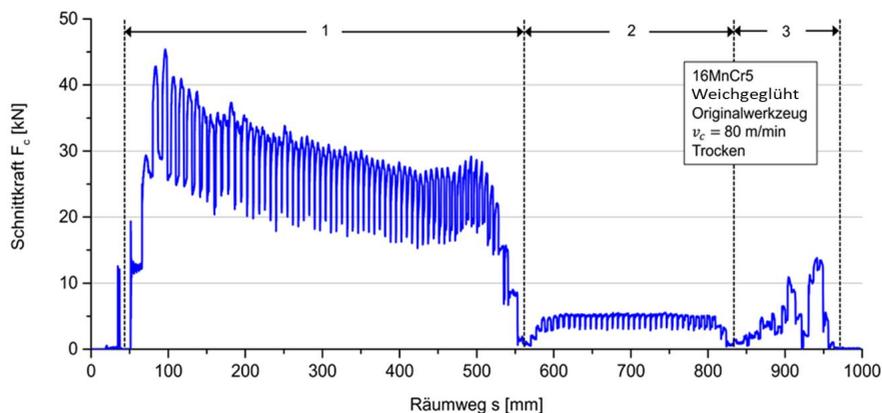


Abbildung 4-8: Kraftschrieb einer Räumbearbeitung der Getriebebeschaltmuffe

Die Äquivalenzversuche zur Ermittlung der spezifischen Schnittkraft werden mit weichgeglühten Proben durchgeführt. Um den Prozess möglichst reproduzierbar durchzuführen, werden die Versuche auf einer elektrisch betriebenen Räummaschine von Karl Klink durchgeführt. Die Maschine ermöglicht Schnittgeschwindigkeiten von bis zu 170 m/min bei einer maximalen Kraft von 11,7 kN. Bei dieser Maschine verfährt nicht das

Werkzeug, sondern das Werkstück, welches in einem Schlitten montiert und von einem Linearmotor angetrieben wird. Das Werkzeug befindet sich auf einer Zustelleinrichtung, die mittels einer Gewindespindel und eines Glasmaßstabs eine sehr exakte Zustellung ermöglicht. Bearbeitungskräfte werden von einer sehr steifen Profilschienenführung aufgenommen, welche nach erfolgter Zustellung hydraulisch geklemmt werden kann. Die gesamte Zustelleinrichtung ist auf einer Kraftmessplattform montiert, die alle auftretenden Bearbeitungskräfte aufzeichnet. Als Schneidwerkstoff kommt eine unbeschichtete Hartmetallplatte zum Einsatz. Hartmetall wird aus dem Grund gewählt, weil eine hohe Temperaturresistenz für die Versuche nach erfolgter Energiebilanzierung erforderlich ist. Da nicht abzusehen ist, wie sich eine Temperaturerhöhung des Werkstücks auf die Temperatur in der Umformzone auswirkt und eine HSS-Schneide empfindlicher auf hohe Temperaturen reagiert als eine VHM-Schneide, wird Hartmetall als Schneidenmaterial für die Versuche gewählt. Die Äquivalenzversuche werden im selben Versuchsaufbau unter möglichst identischen Bedingungen durchgeführt. Da die Äquivalenzversuche jedoch ein Ergebnis für einen Prozess liefern sollen, der mit HSS-Werkzeugen erfolgt, muss dies auch entsprechend bei der Berechnung berücksichtigt werden. Die Formel zur Berechnung der spezifischen Schnittkraft  $k_c$  ermöglicht die Berücksichtigung des eingesetzten Werkzeugmaterials mit dem Korrekturfaktor  $K_{CSS}$ , der die Werte 1,2 für HSS, 1,0 für Hartmetall und 0,9 für Keramik annehmen kann.

Die eingesetzten Wendeschneidplatten (WSP) vom Typ Walter SNMA 190612-T02020-7-K70U sind rechteckige Wendeschneidplatten ohne eingebrachte Schneidengeometrie. Diese WSP kommen zum Einsatz, da die Geometrie der originalen HSS Räumnadel am einfachsten auf diese übertragen werden kann. Mittels Draht-erodieren wird die WSP präpariert und an die geometrische Ausprägung der Räumnadel angepasst. Der Freiwinkel von  $\alpha = 2^\circ$  an der Schneide wird durch einen geraden Schnitt entlang der Stirnseite der Platte hergestellt. Der Spanwinkel von  $\gamma = 18^\circ$  wird von der Werkzeugaufnahme vorgehalten. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich eine beschädigte Schneide recht einfach mehrfach nachstellen und eine WSP kann häufiger verwendet werden. Auf die Beschichtung wird aufgrund der Nachbearbeitung bzw. Nachschärfung verzichtet. Abbildung 4-9 stellt den Versuchsaufbau mit der Räummaschine auf der linken Seite, die daran befestigte Zustell- und Kraftmesseinrichtung in der Mitte und das Werkzeug mit WSP im Eingriff an der Probe auf der rechten Seite dar.



Abbildung 4-9: Elektrische Räummaschine (links), Werkzeug-Zustellvorrichtung (Mitte), Werkzeugaufnahme mit WSP und Probe aus weichgeglühtem 16MnCr5 (rechts)

Die Materialproben aus 16MnCr5 und 42CrMo4 werden vor dem Weichglühen in Quaderform mit den Maßen 15 x 40 x 75 mm gebracht. Da die Wendescheidplatten eine Breite von 20 mm aufweisen, ist sichergestellt, dass der Schnitt über die gesamte Probenoberfläche erfolgt. Die Zustellung richtet sich nach den Zustellwerten des Räumwerkzeuges bzw. der gesamten Zustellung aller in Eingriff befindlichen Schneiden über die Höhe der Schalmuffe. Insgesamt werden zehn identische Schnitte durchgeführt und die korrespondierenden Kräfte mit einer Abtastrate von 20 kHz aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten werden daraufhin normiert und in Form von Diagrammen gesichtet. Aus den zehn Versuchen wird der Mittelwert bestimmt, welcher daraufhin für die Bestimmung der erforderlichen Energie zur Herstellung der Verzahnung herangezogen wird. In Abbildung 4-10 ist ein Kraftschrieb des 9. Schnittes repräsentativ für die Versuchsreihe dargestellt. Die Zustellung pro Zahn beträgt  $f_z = 0.037$  mm bei einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 7$  m/min. Anhand des normierten Kraftschriebs lässt sich der Schnitvorgang sehr detailliert beobachten. Im Bereich um 1,4 s ist sehr deutlich der Schneideneintrittstoß erkennbar, der daraufhin in den stabilen Schnitt übergeht. Am Ende nach dem Austritt der Schneide ist das Nachschwingen des Versuchsaufbaus bei 2s erkennbar. Die gemittelte spezifische Schnittkraft über die zehn Schnitte liegt bei  $k_c = 3250,34$  N/mm<sup>2</sup> für 16MnCr5 und  $k_c = 4095,34$  N/mm<sup>2</sup> für 42CrMo4.

Der Energiebedarf für die Zerspanung der Schalmuffe ergibt sich dadurch zu 16,9 kJ und 21,3 kJ.

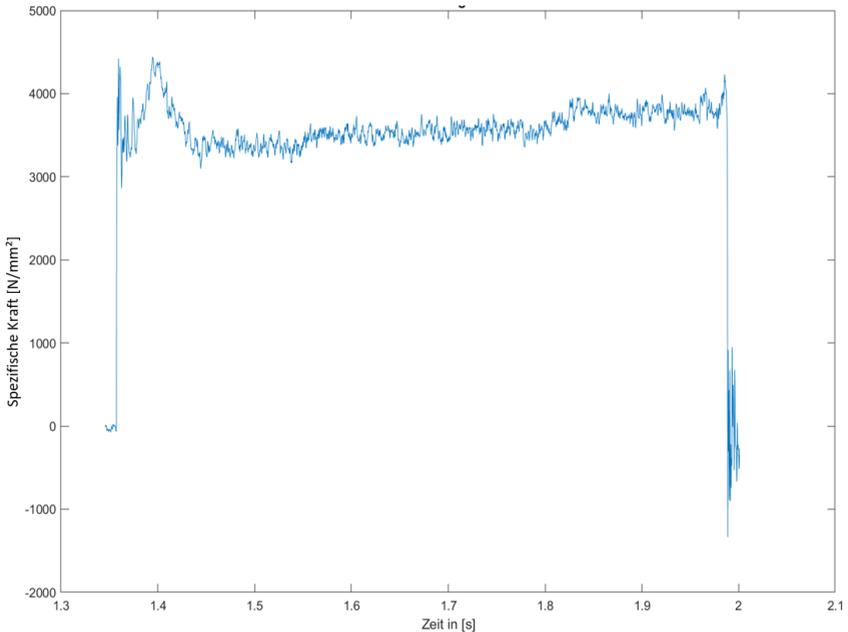


Abbildung 4-10: Kraftschrieb 9 16MnCr5 7 m/min Schnittgeschwindigkeit

### 4.4 Einsatzhärten

Die Ermittlung des Energiebedarfs für das Einsatzhärten kann auf Basis von theoretischen Werten über das Volumen und die Haltedauer berechnet werden. Diese Werte sind jedoch stark davon abhängig, welche Anlagen zur Wärmebehandlung eingesetzt werden. Wie auch bei der Weichbearbeitung wird in der vorliegenden Arbeit hohen Wert auf den Referenzprozess in der Industrie gelegt. Die dabei ermittelten Daten fließen in das mathematische Modell des Ofens für die Berechnung der notwendigen Energiemengen zur Wärmebehandlung für eine Schalmuffe. Dieser Vorgang dauert 285 Minuten bei einer Temperatur von 885 °C und ist somit der Prozessschritt mit dem höchsten Energiebedarf. Mathematisch wird für die Berechnung die temperaturabhängige Wärmekapazität aus Formel 4-1 verwendet (Giancoli, 2009).

Die erforderliche Wärmeenergie zum Aufkohlen der Schaltmuffe erfordert eine genaue Betrachtung der Energieströme in und aus dem Ofen. Beim Industriepartner kommt hierfür ein Durchstoßofen der Firma Aichelin zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.4.2). Der Ofen hat eine Gesamtlänge von 12 m und erzeugt eine Aufkohlungstemperatur von 885 °C. Als Trägergas wird ein aus Erdgas gewonnenes Endogas eingesetzt. Der Kohlenstoffspeicher wird durch Kohlenmonoxid aus dem Trägergas und zugesetztem Methan bedient. In Abbildung 4-11 ist der Wärmebehandlungs-ofen dargestellt:



Abbildung 4-11: Durchstoßofen des Herstellers Aichelin

Abbildung 4-12 visualisiert den Durchstoßofen als Bilanzierungsraum mit den Größen des Werkstückmassenstroms, der über den Temperaturbereich gemittelten spezifischen Wärmekapazität von Stahl  $\bar{c}_S$ , der Eintrittstemperatur  $T_{Ein}$ , der Austrittstemperatur  $T_{Aus}$ , des Brennstoffvolumenstroms  $\dot{V}_B$ , des Heizwerts des Brennstoffs  $h_u$ , des Verlustwärmestroms  $\dot{Q}_V$  und dem Wirkungsgrad der Beheizungsanlage  $\eta_B$ .

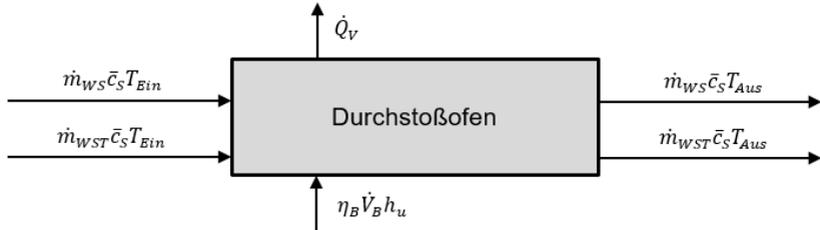


Abbildung 4-12: Bilanzierung der Energieströme beim Aufkohlen

Nachfolgend werden in Tabelle 4-2 die Daten des Durchstoßofens aufgeführt.

Tabelle 4-2: Technische Daten Durchstoßofen

Parameter	Ausprägung
Ofenlänge	12 m
Anzahl der Bahnen	2
Wandstärke Gesamt	500 mm
Wandstärke der feuerfesten Innenschicht Schamottestein	200 mm
Wandstärke Isolationsschicht Calciumsilikat	300 mm
Querschnitt Ofeninnenraum (B x H)	1,6 m x 1,0 m
Höhe Außenwand	2,3 m
Breite obere Außenwand	2,6 m
Fläche einer seitlichen Außenwand	28 m <sup>2</sup>
Fläche obere Außenwand (Decke)	31 m <sup>2</sup>
Stirnfläche	6 m <sup>2</sup>
Wandaußenfläche Gesamt	99 m <sup>2</sup>
Querschnittsfläche einer Chargierungsöffnung	1 m <sup>2</sup>

Der Ofen verfügt über zwei Bahnen im Inneren, worauf unterschiedliche Bauteile aufgekohlt werden können. Auf jeder Bahn ist Platz für 30 individuelle Gestelle, welche jeweils in einer Taktzeit von  $T = 9,5$  min um einen Platz verschoben werden. Es ist zu beachten, dass die durchgeführten Berechnungen den Fall zugrunde legen, dass auf beiden Bahnen Schaltmuffen mit identischen Aufkohlungszeiten wärmebehandelt werden. Eine exakte Bestimmung der notwendigen Energiemenge für eine Schaltmuffe

wäre sonst nur sehr erschwert möglich. Da in der Anlage Bauteile nach Bedarf behandelt werden, ist es aber jedoch als realistisch anzunehmen, dass in einer Charge auch nur Schaltmuffen auf beiden Bahnen einer Wärmebehandlung unterzogen werden.

Die Schaltmuffen werden für die Wärmebehandlung auf Werkstückträgern platziert, welche den Prozess mit durchlaufen. Die Werkstückträger weisen die Abmaße von 400 x 500 x 450 mm (L x B x H) auf und können insgesamt 99 Schaltmuffen pro Träger durch den Ofen transportieren. Mit einer Masse von insgesamt 48 kg in beladenem Zustand beträgt  $m_{Ch,Brutto} = 48$  kg.

Abbildung 4-13 illustriert einen solchen Werkstückträger für Getriebeschaltmuffen im teilweise beladenen Zustand. Der Aufbau besteht aus einem Grundgestell (20 kg), auf dem 9 Dorne (16 kg) montiert sind, auf denen die Schaltmuffen (max. 12 kg) für die Wärmebehandlung gestapelt werden können.



Abbildung 4-13: Stahlguss-Werkstückträger für Getriebeschaltmuffen

Die Gestelle müssen im Ofen ebenfalls mit erhitzt werden, weswegen deren Heizleitung in der Bilanz berücksichtigt werden muss. Mit einem Leergewicht von  $m_{Leer} = 20$  kg ergibt sich der Massenstrom an Leergestellen auf beiden Bahnen nach Formel 4-2 zu  $\dot{m}_{WST,Leer} = 253$  kg/h.

$$\dot{m}_{WST,Leer} = \frac{2 \cdot 20 \text{ kg}}{0,158 \text{ h}} = 253 \text{ kg/h} \quad \text{Formel 4-2}$$

Mit dem Massenstrom an Leergestellten lässt sich die notwendige Heizleistung berechnen. Dies erfolgt durch Integration der spezifischen Wärmekapazität mittels der mittleren spezifischen Wärmekapazität von niedrig legiertem Stahl mit  $\bar{c}_s = 0,56 \text{ J/g}\cdot\text{K}$  (Macherauch & Zoch, 2014). Das Ergebnis errechnet sich daraufhin nach Formel 4-3 zu  $\Delta\dot{H}_{WST,Leer} = 34,0 \text{ kW}$

$$\Delta\dot{H}_{WST,Leer} = \dot{m}_{WST} \bar{c}_s (T_{aus} - T_{ein}) = 34,0 \text{ kW} \quad \text{Formel 4-3}$$

Da die Auslastung der Anlage bzw. die Menge an Teilen zur Wärmebehandlung variiert, ist es notwendig, einen Faktor mit einzubeziehen, mit dem je Auslastungssituation der Energiebedarf für eine Schaltmuffe berechnet werden kann. Formel 4-4 beschreibt den Massenstrom für vollbeladene Werkstückträger. Um die Auslastung mit zu berücksichtigen, wird Formel 4-5 mit dem Korrekturfaktor  $f_A$  korrigiert und lässt sich mit diesem  $f_A = [0..1]$  wie folgt beschreiben:

$$\dot{m}_{WST,Aufbau} = \frac{f_A \cdot 2 \cdot 12 \text{ kg}}{0,158 \text{ h}} = f_A \cdot 152 \text{ kg/h} \quad \text{Formel 4-4}$$

$$\Delta\dot{H}_{WST,Aufbau} = \dot{m}_{WST,Aufbau} \bar{c}_s (T_{aus} - T_{ein}) = f_A \cdot 20,5 \text{ kW} \quad \text{Formel 4-5}$$

Parallel dazu wird der der Massenstrom an Schaltmuffen mit dem Auslastungsfaktor versehen. Äquivalent zu der Berechnung für die Gestelle ergeben sich die Werte durch Formel 4-4 und Formel 4-5 zu  $\Delta\dot{H}_{WS} = f_A \cdot 27,2 \text{ kW}$ .

$$\dot{m}_{WS} = \frac{f_A \cdot 2 \cdot 16 \text{ kg}}{0,158 \text{ h}} = f_A \cdot 202 \text{ kg/h} \quad \text{Formel 4-6}$$

$$\Delta\dot{H}_{WS} = \dot{m}_{WS} \bar{c}_s (T_{aus} - T_{ein}) = f_A \cdot 27,2 \text{ kW} \quad \text{Formel 4-7}$$

Eine der größten Variablen in der Betrachtung der Energieflüsse im Wärmebehandlungsprozess beim Einsatzhärten sind die Wandverluste an der Ofenaußenwand durch

Konvektion und Strahlung. Um diese Problematik näher zu untersuchen, ist es notwendig, ein vereinfachtes Ersatzmodell der Ofenwand zu modellieren und die Energieflüsse an diesem zu identifizieren. Vom Inneren der Ofenatmosphäre findet eine Wärmeleitung durch die Wand statt. Die heiße Oberfläche des Ofens an der Außenseite gibt die Wärme dann durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung ab.

Die Ofenwand besteht aus einer Schicht Schamotte im Inneren und wird durch Calciumsilikat nach außen umhüllt. Unter stationären Bedingungen ist der Temperaturverlauf daher linear sinkend. Unter dieser Annahme wird mit dem mittleren Wärmeleitkoeffizienten  $\bar{\lambda}_{Sch} = 1,2 \text{ W/mK}$  für Schamotte und  $\bar{\lambda}_{CS} = 0,12 \text{ W/mK}$  für Calciumsilikat gerechnet (Verein Deutscher Ingenieure, 2006).

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  fließt aufgrund seiner Temperaturabhängigkeit zur Temperatur der Außenwand nach Ermittlung dieser mit ein. Die Werte werden vom Ofenhersteller des Ofens beim Industriepartner zur Verfügung gestellt. Abbildung 4-14 stellt den schematischen Wärmegang mit zugehörigen Werten durch die Ofenwand dar.

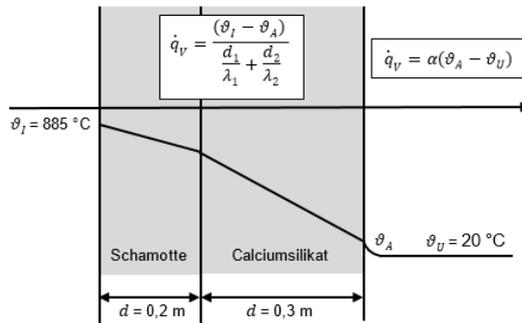


Abbildung 4-14: Wärmestrom Ofenwand

Da der Wärmestrom durch die Wand gleich dem der Konvektion an der Außenwand ist, können die beiden gleichgesetzt (Formel 4-8) und nach der unbekanntem Außenwandtemperatur  $\vartheta_A$  aufgelöst werden.

$$\frac{(\vartheta_I - \vartheta_A)}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} = \alpha(\vartheta_A) \cdot (\vartheta_A - \vartheta_U)$$

Formel 4-8

Die fehlenden Werte der Gleichung werden unter Zuhilfenahme der Nusselt-Zahl, Prandtl-Zahl, Raleigh-Zahl und Grashof-Zahl ergänzt.

Rein rechnerisch ergibt sich nach Einsetzen aller Werte  $\vartheta_A = 68 \text{ °C}$  für die Temperatur der Außenwand  $\dot{q}_V = 306 \text{ W/m}^2$  und damit über die gesamte Oberfläche des Ofens  $\dot{Q}_V = 30,3 \text{ kW}$ . Zuletzt müssen noch die Verluste durch Strahlung berechnet werden. Mit den Werten von  $\varepsilon = 0,8$  als Emissivität lackierter Oberflächen und der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  beträgt der Verluststrom gemäß Formel 4-9  $\dot{Q}_V = 60,7 \text{ kW}$ .

$$\dot{Q}_V = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A = 60,7 \text{ kW} \tag{Formel 4-9}$$

Zur Überprüfung der Literaturwerte in reeller industrieller Umgebung wird die gesamte Oberfläche in ein Raster von  $1 \text{ m}^2$  aufgeteilt und mit einem geeichten Temperaturfühler vermessen. Zur Kontrolle der Werte wird zusätzlich eine Wärmebildaufnahme angefertigt, die die Hotspots und Bereiche besonders großer Wärmeverluste aufzeigt. Mit einer Oberfläche von knapp  $100 \text{ m}^2$  ergeben sich 100 Messpunkte zur Ermittlung der mittleren Temperatur des Durchstoßofens. In Abbildung 4-15 ist die Wärmeabstrahlung zu sehen. Auffällig ist die hohe Temperatur, welche von den Gasbrennern ausgeht. Die Brenner erzeugen im Inneren des Ofens die notwendigen  $885 \text{ °C}$  für die Wärmebehandlung. Ansonsten ist erwähnenswert, dass die Außenwandtemperatur zwischen  $60$  und  $70 \text{ °C}$  liegt und über die Oberfläche hinweg relativ konstant ist.

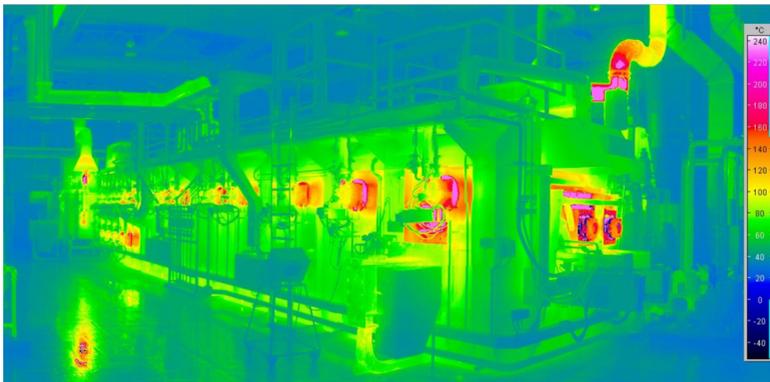


Abbildung 4-15: Wärmebildaufnahme Aichelin Durchstoßofen

Nach Auswertung der Wärmebildaufnahmen und der 100 Messpunkte, ergibt sich die mittlere Temperatur der Außenwand zu ca. 71 °C im industriellen Umfeld. Der errechnete theoretische Wert von 68 °C liegt damit sehr nahe am realen Wert und kann daher für die Berechnung verwendet werden.

Beim Beladen und Entladen des Ofens werden die Gestelle mit den Bauteilen durch sogenannte Chargieröffnungen in bzw. aus dem Ofen geschoben. Der Wärmeverlust an diesen Öffnungen ist immens. Technisch wird versucht den Verlust im Ofen durch sogenannte Flamm Sperren möglichst klein zu halten. Dabei wird Gas in Form von Flammen vor den Öffnungen, die ca. 1 m<sup>2</sup> Fläche aufweisen, verbrannt, um den Wärmeverlust im Inneren möglichst gering zu halten. Abbildung 4-16 stellt diese Situation dar. Das mit Schalmuffen bestückte Gestell (Mitte unten) steht noch außerhalb des Ofens vor der Chargierungsöffnung. Die Öffnung wird durch Flammen aus Brennern vor dem Austreten von zu viel Wärme geschützt. Die Öffnung wird jedoch nur kurzzeitig für einen Zeitraum von 60 s je Takt geöffnet.

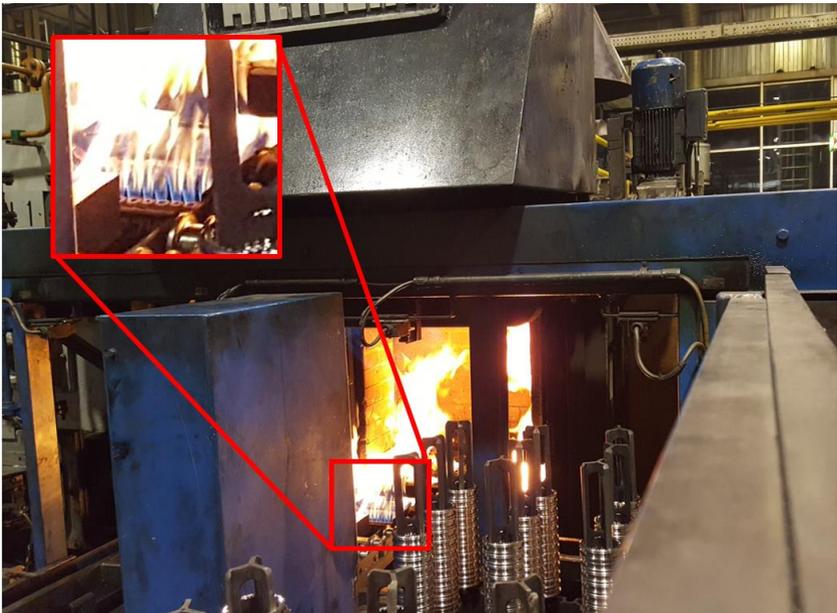


Abbildung 4-16: Bestücktes Transportgestell vor der Chargierungsöffnung

An diesen Öffnungen treten ebenfalls Verluste in Form von Konvektion und Strahlung auf. Da es in einer Öffnung kein isolierendes Material wie bei der Ofenwand gibt, entfällt der Wärmegang und es kann von freier Konvektion einer Wand mit 885 °C an die Umgebung bei  $\vartheta_U = 20$  °C ausgegangen werden. Der Wärmeübergangskoeffizient ergibt  $\alpha = 13,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Der durch Konvektion an den beiden Chargieröffnungen verursachte Wärmestrom ergibt sich zu  $\dot{Q}_V = 23,7 \text{ kW}$ .

Strahlungsverluste sind abhängig von der Emission der Ofenatmosphäre. Die Hauptbestandteile sind in der Regel  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  und  $CH_4$ . Die Verbindungen  $H_2$  und  $N_2$  sind durchlässig für Strahlung, jedoch sind  $CO$ ,  $CO_2$  und  $CH_4$  strahlungsaktiv. Der Emissionsgrad von Kohlenmonoxid ist nicht bekannt.  $CO_2$  und  $CH_4$  sind mit  $\varepsilon = 0,1$  anzusetzen. Unter Anwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes in Formel 4-10 ergibt sich der Wärmestrom zu  $\dot{Q}_V = 44,1 \text{ kW}$ . (Verein Deutscher Ingenieure, 2006)

$$\dot{Q}_V = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A = 20,4 \text{ kW}$$

Formel 4-10

Insgesamt ergäbe sich an den Chargieröffnungen ein Verlust von  $\dot{Q}_V = 44,1 \text{ kW}$ , wären die Tore permanent geöffnet. Da die Öffnungen jedoch je Takt nur 60 s geöffnet sind, kann der Wert entsprechend für die Öffnungsdauer zu  $\dot{Q}_V = 4,6 \text{ kW}$  berechnet werden. Abbildung 4-17 gewährt einen Blick in den Durchstoßofen, in den zuvor ein neues Gestell mit Bauteilen auf Bahn 1 eingetaktet wurde. Es sind die beiden Bahnen mit Werkstückträgern, die Gasstrahlrohe an der Decke und die Bauteile sichtbar. Am Ende der Taktstrecke schließt die Auslassöffnung an, durch die die Bauteilträger nach dem Aufkohlen auschargiert werden.



Abbildung 4-17: Blick in den Durchstoßofen mit neu eingetaktetem Werkstückträger

Der letzte zu berücksichtigende Punkt ist die Einbeziehung der Trägergase, die in die Ofenatmosphäre strömen. Aus den Angaben des Anlagenbetreibers gehen die Betriebsparameter mit einem Trägergasstrom von ca.  $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$  und ein Methanmassenstrom zur Regelung des C-Pegels von ca.  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$  hervor. Zur Berechnung des Energiebedarfs müssen zunächst die Wärmekapazitäten bei Ein- und Austritt der Gase berechnet werden. Im Ofen läuft im Wesentlichen eine Boudouard-Reaktion ( $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{CO}_2$ ) und die Methan-Wasserstoff-Reaktion ( $\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$ ) ab, während die Trägergase untereinander und mit dem im Ofen eingebrachten Wärmebehandlungsgut reagieren. Die exakte Zusammensetzung der unterschiedlichen Gase ist jedoch nicht bekannt. Der Ofenbetreiber nutzt zur Erwärmung der Gase die Abwärme des Ofens, sodass diese nicht weiter signifikant erhitzt werden müssen. Aufgrund des geringen Effekts, wird dieser Punkt im weiteren Verlauf vernachlässigt. Zusammengefasst gibt es drei wesentliche Energietreiber bei der Betrachtung des Aufkohlprozesses, die Erwärmung der Bauteile, das Halten der Temperatur und das Ausgleichen der Verlustleistungen. Die folgende Tabelle 4-3 fasst die entsprechenden Werte zusammen.

Tabelle 4-3: Energieströme Aufkohlen

Energiestrom	Betrag [kW]
Erwärmung der Grundgestelle $\Delta\dot{H}_{WST,Leer}$	34,0
Erwärmung der Chargierungsaufbauten $\Delta\dot{H}_{WST,Aufbau}$	$f_A \cdot 20,5$
Erwärmung des Wärmeguts $\Delta\dot{H}_{WS}$	$f_A \cdot 27,2$
Wärmeverlustströme $\dot{Q}_{V,ges}$	95,6

Mit den vorangegangenen aufgestellten Gleichungen und Ergebnissen der Energieströme lässt sich die Energiebilanz für das Aufkohlen der Schaltmuffen nun in eine Formel überführen.

$$\dot{V}_B h_u = \frac{1}{\eta} [\Delta\dot{H}_{WST,Leer} + \Delta\dot{H}_{WST,Aufbau} + \Delta\dot{H}_{WS} + \dot{Q}_{V,ges}] \quad \text{Formel 4-11}$$

Der Heizwert des Erdgases, mit dem die Wärmebehandlungsöfen betrieben werden, beträgt  $h_u = 40,2 \text{ MJ/m}^3$  und ist durch den Energieversorger bereitgestellt worden. Der Ofen verwendet zur Erzeugung der Heizleistung Gasstrahlrohre mit Rekuperator im Inneren des Ofens, die von den Brennern versorgt werden, die in der Thermografieaufnahme in Abbildung 4-15 ersichtlich sind. Deren Wirkungsgrad beträgt laut Herstellerangabe  $\eta = 0,75$ . Je nach Auslastungssituation des Ofens ergeben sich nun Energiemengen, die für das Aufkohlen der Schaltmuffen notwendig sind (vgl. Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Energieverbrauch Aufkohlen in Abhängigkeit der Auslastung

Auslastungsfaktor	Absoluter Gasverbrauch	Durchsatzspezifischer Gasverbrauch	Absolute Heizleistung	Durchsatzspezifischer Energieeinsatz
$f_A$	$\dot{V}_B$	$\frac{\dot{V}_B}{\dot{m}_{WS}}$	$\dot{V}_B h_u$	$\frac{\dot{V}_B h_u}{\dot{m}_{WS}}$
0	15,3 m <sup>3</sup> /h	$\infty$	171 kW	$\infty$
0,25	16,7 m <sup>3</sup> /h	0,33 m <sup>3</sup> /kg	187 kW	13,3 MJ/kg
0,5	18,2 m <sup>3</sup> /h	0,18 m <sup>3</sup> /kg	203 kW	7,2 MJ/kg
0,75	19,6 m <sup>3</sup> /h	0,13 m <sup>3</sup> /kg	219 kW	5,2 MJ/kg
1	21,0 m <sup>3</sup> /h	0,10 m <sup>3</sup> /kg	235 kW	4,2 MJ/kg

Abbildung 4-18 stellt die Abhängigkeit des Energie-/Gasbedarfs von der Auslastung der Wärmebehandlungsanlage dar. Es ist signifikant, dass der Energiebedarf bei einer geringen Auslastung von z. B. 25 % trotzdem bei ca. 80 % des möglichen Gesamtgasverbrauchs liegt. Im Falle einer 100 %igen Auslastung und einem Bauteilgewicht von  $m = 154$  g ergibt sich durch Division der Gesamtmasse (Gestelle, Träger und Bauteile) durch die Masse der Schaltmuffe der Energiebedarf für eine Schaltmuffe zu von  $E_{OEM} = 650$  kJ für den Aufkohlungsprozess.

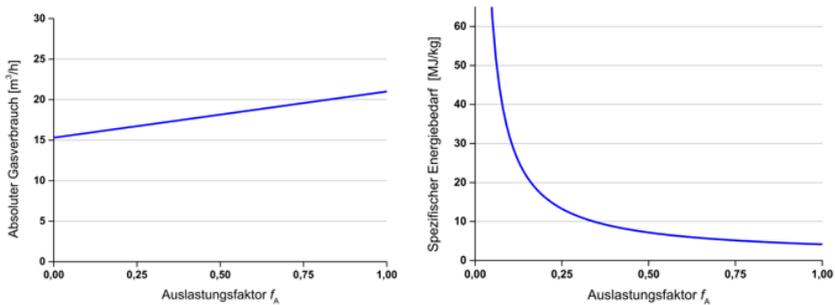


Abbildung 4-18: Gasverbrauch (links), spezifischer Energiebedarf (rechts) in Abhängigkeit der Auslastung

Nach dem Abschrecken im Ölbad werden die Bauteile nochmals aufgeheizt und angelassen. Die Anlage beim Industriepartner ist für diesen Prozess ebenfalls ausgelegt. Die Bauteile werden für 60 Minuten auf rund  $200$  °C erhitzt, um daraufhin an Raumatmosphäre langsam abzukühlen. Die Bauart des Anlassofens entspricht dem in diesem Kapitel vorgestellten Modell und kann daher mit dem Einsetzen der entsprechenden Parameter berechnet werden. Mit  $\vartheta = 200$  °C und  $t = 1$  h (DIN 2008 S. 37) berechnet sich der spezifische Energiebedarf zu  $e = 0,4$  MJ/kg und damit ergibt sich  $E = 64$  kJ für das Ofenanlassen bei einer Auslastung von 100 %.

Die Berechnungen in diesem Kapitel erfolgen auf Basis des VDI-Wärmeatlas und sind im Anhang der Arbeit beigefügt.

## 4.5 Induktionshärten

Beim induktiven Härten von Bauteilen werden durch das Magnetfeld Wirbelströme an der Bauteiloberfläche induziert, die das Werkstück aufheizen. Die Aufheizzeiten sind

sehr kurz und meist im Bereich von wenigen Sekunden (Läpple, 2014). Aufgrund dessen kann als Bewertungsgröße die Wärmekapazität herangezogen werden. Es treten neben dem Energiefluss zur Aufheizung der Randschicht auch Verluste durch den Wärmeabflussfaktor  $k_Q$  und den Induktorwirkungsgrad  $\eta_H$  auf. Diese Werte können nach ersten Näherungen jedoch vernachlässigt werden, da sie weniger als 1 % ausmachen.

Zur Bestimmung der notwendigen Energiemenge für das Aufheizen der Randschicht ist die temperaturabhängige Wärmekapazität des Werkstoffes und die Masse bzw. das zu erheizende Volumen ausschlaggebend. Für die Berechnung auf Basis von Formel 4-2 wird das Integral der spezifischen Wärmekapazität un- und niedriglegierter Stähle mit den Grenzen 0 - 1000 °C integriert und mit der Masse des aufzuheizenden Volumens multipliziert. Zur Vereinfachung dient die linearisierte Näherung der Wärmekapazität, Abbildung 4-19. Im Anhang A3 ist die entsprechende Berechnung der Linearisierung aufgeführt.

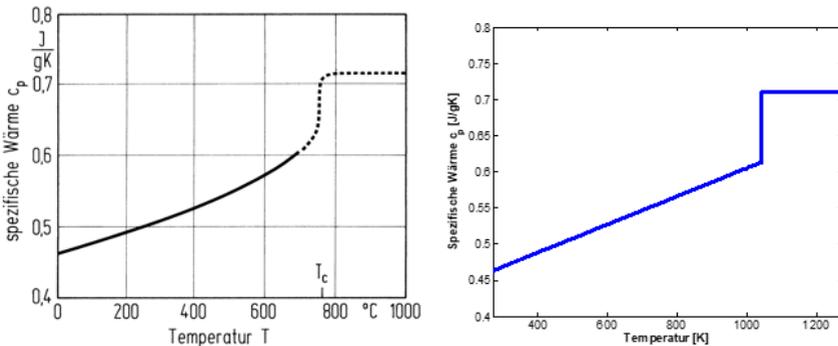


Abbildung 4-19: Spezifische Wärmekapazität (Macherauch & Zoch, 2014) (links), linearisierte Näherung der Wärmekapazität (rechts)

Bei der induktiven Wärmebehandlung von 42CrMo4 liegt das Material üblicherweise im vergüteten Zustand vor. Der vergütete Zustand wirkt sich positiv auf die Aufheiztemperatur beim induktiven Randschichthärten aus, jedoch ist dieser Zustand die Zerspanung betreffend in Bezug auf Verschleiß und Zerspanungskräfte von Nachteil. Die Zerspanungsversuche und Wärmebehandlung finden daher in weichgeglühtem Zustand statt, was bedeutet, dass die zur homogenen Austenitisierung notwendige Temperatur über der für vergütetes 42CrMo4 liegt. Die zu erreichende Temperatur lässt sich mittels

des ZTA-Schaubildes bestimmen. Da dieses in der Literatur zumeist nur für vergütetes Material vorliegt, muss auf ein Material mit ähnlichem Kohlenstoffgehalt zurückgegriffen werden, um die notwendige Temperatur abzuschätzen. Abbildung 4-20 führt drei entsprechende Schaubilder hierfür auf. Auf der linken Seite ist das kontinuierliche ZTA-Schaubild für vergüteten 42CrMo4 dargestellt. Bei einer Heizzeit von 1 s muss die Temperatur mindestens  $\vartheta = 950 \text{ °C}$  betragen. Die Heizzeit muss jedoch so kurz wie möglich gewählt werden, sodass eine durchgängige Erwärmung verhindert wird. Der Unterschied zwischen weichgeglühtem und vergütetem Cf53 liegt im Bereich einer Sekunde bei etwa  $150 \text{ °C}$ . Es wird daher angenommen, dass sich das Verhalten bei 42CrMo4 in einer ähnlichen Weise auswirken wird, da der Kohlenstoffanteil sehr nah beieinander liegt. Die Aufheiztemperatur der Schalmuffen im Randbereich sollte bei weichgeglühtem Zustand also mindestens  $\vartheta = 1100 \text{ °C}$  betragen.

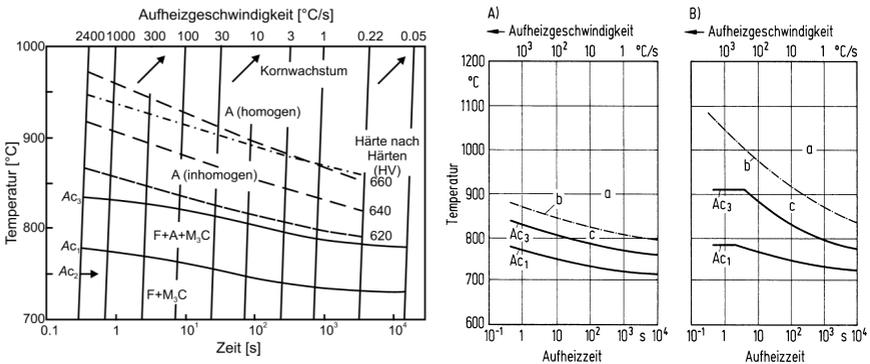


Abbildung 4-20: ZTA-Schaubild 42CrMo4 vergütet (Berns & Theisen, 2008) (rechts), ZTA-Schaubild Cf53 in weichem Zustand (Mitte), ZTA-Schaubild Cf53 in vergütetem Zustand (rechts) (Plaul et al., 1979-94)

Die Vorgaben für die Einhärtetiefe der Schalmuffen beim Einsatzhärten liegen bei  $Eht_{550 HV} = 0,6 \text{ mm}$ . Aus den CAD-Daten der Schalmuffe lässt sich das Randschichtvolumen der verzahnten Innenseite mit  $V_{R0,6,I} = 3,4 \text{ cm}^3$  bzw. die Masse  $m_{R0,6,I} = 26,4 \text{ g}$  ableiten. Das Einsetzen der Werte in Formel 4-12 ergibt einen Energiebedarf von mindestens  $Q_{min,N} = 16,9 \text{ kJ}$  zur Austenitisierung der als homogen angenommenen Randschicht ohne Einbeziehung der Verluste.

$$Q_{min,V} = m_{R0,6} \int_{293\text{ K}}^{1373\text{ K}} c_p(T) dT = 16,9\text{ kJ} \quad \text{Formel 4-12}$$

Die beiden größten Energietreiber sind der Wirkungsgrad der Induktionsanlage und die abfließende Wärme im Bauteil selbst. Letzteres wird maßgeblich von der Aufheizzeit beeinflusst. Nach industriellen Erfahrungswerten muss bei den gewählten Aufheizzeiten jedoch von einem Abflussfaktor  $k_Q = 2$  ausgegangen werden.

Der Wirkungsgrad der Induktionsanlage wird repräsentiert durch das Zusammenfassen der einzelnen Bestandteile der Anlage. Darunter fällt der Wirkungsgrad von Generator, Frequenzumrichter und den Verlusten der Heizschleife. Die ersten beiden Daten sind vom Anlagenhersteller SMS-Elotherm mit jeweils  $\eta_G = 0,9$  angegeben (SMS Elotherm 2015). Die Verluste des Induktors sind direkt in Zusammenhang mit der Stromstärke und dem elektrischen Widerstand des Induktorwerkstoffes zu sehen und können mit  $P_V = I^2 R$  beschrieben werden. Die Stromstärke hängt nicht nur von den eingesetzten wechselnden Frequenzen, sondern auch maßgeblich vom zu überbrückenden Luftspalt zwischen Induktorschleife und Werkstück ab. Es ist von einer umgekehrt proportionalen Verlustleistung ( $\eta_H \sim 1/P_V$ ) auszugehen. Laut OEM liegt der Wirkungsgrad der Heizschleife mit dem Demonstratorbauteil bei etwa  $\eta_H = 0,6$ . Mittels Formel 4-13 lässt sich unter Einbeziehung der Verluste der Gesamtenergiebedarf zu  $E = 63\text{ kJ}$  berechnen.

$$E = \frac{Q_{min} \cdot k_Q(T, t)}{\eta_G \cdot \eta_H(I)} \quad \text{Formel 4-13}$$

Die Getriebebeschaltmuffen werden nach dem induktiven Erhitzen mit einer Wasserbrause abgeschreckt. Im Anschluss daran ist – wie bei den Bauteilen aus 16MnCr5 – ein Anlassen notwendig.

Das Anlassen erfolgt meist direkt nach dem Abschrecken des Bauteils in der Induktionsanlage und wird "Kurzzeitanlassen" genannt. Die Bauteile werden kurzzeitig auf eine erhöhte Anlasstemperatur erwärmt. Durch die erhöhte Anlasstemperatur wird die Diffusionsgeschwindigkeit gegenüber dem Ofenprozess erhöht. Die Anlasstemperatur von  $\vartheta = 300\text{ °C}$  und der reduzierte Induktorwirkungsgrad von  $\eta_H = 0,7$  aufgrund geringerer Stromstärken – eingesetzt in die Gleichung – ergeben eine Energiemenge von  $E = 30\text{ kJ}$  für das Anlassen.

Der OEM geht aufgrund von organisatorischen Gründen einen anderen Weg. Die Getriebeschaltmuffen werden in der Aufkohlungsanlage aufgekühlt, jedoch nicht anschließend abgeschreckt und angelassen. Die Bauteile kühlen an der Umgebungsluft ab und werden zum Härten in eine induktive Härteanlage eingebracht, da durch diesen Schritt die Hartbearbeitung eingespart werden kann.

Die Schaltmuffen fahren vollautomatisiert in die Anlage und werden zunächst auf Austenitisierungstemperatur gebracht und abschließend auf einem Dorn mittels Wasserbrause abgeschreckt. Das Abschrecken auf dem Dorn verhindert den Verzug der Schaltmuffe, was den Schritt der Hartbearbeitung bei deren Prozessführung entfallen lässt, siehe Abbildung 4-21. In der Mitte und links im Bild ist die kupferne Induktorspule zu sehen. Mittig ist hell leuchtend eine erhitzte Schaltmuffe erkennbar. Auf der rechten Seite ist der zylindrische, geschlitzte Dorn abgebildet, welcher gegen eine Verformung beim Abschrecken und Anlassen wirkt. Die Schaltmuffe wird von der mittleren Station nach rechts weiter verfahren. Der Dorn fährt in den Innenring der Muffe und verspannt diese während des Abschreckvorgangs. Weiterhin ist rechts die Induktorschleife (Pfeile) für das Anlassen des Bauteils erkennbar, das im letzten Schritt geschieht.

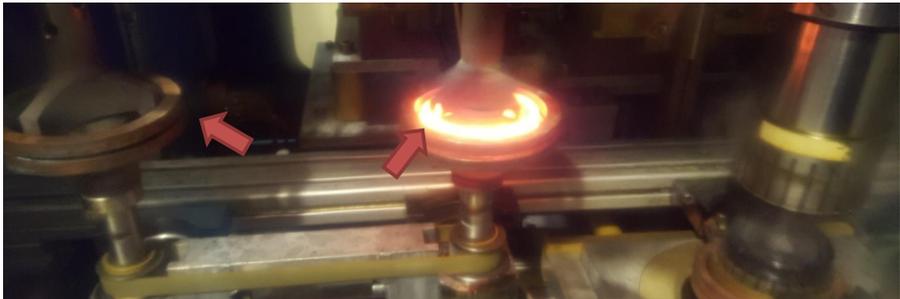


Abbildung 4-21: Blick in Induktionshärteanlage für Getriebeschaltmuffen

Von der energetischen Betrachtung ist dieser Prozess nicht mit den angestrebten Ergebnissen der Arbeit vergleichbar. Die Schaltmuffe ist vor dem Härten bereits mit Kohlenstoff in der Randschicht angereichert und es findet im vorliegenden Fall eine Durchhärtung anstatt einer üblicherweise durchgeführten Randschichthärtung statt. Das Vorhandensein der Anlagen beim Industriepartner und die damit verbundene Eliminierung der Hartbearbeitung rechtfertigen jedoch die Vorgehensweise.

Der Vollständigkeit wegen werden die analysierten Werte für Energien jedoch aufgeführt. Die durchgreifende Erwärmung findet zweistufig jeweils für 8 s mit den Induktorleistungen von 8 und 10 kW statt. Die dabei eingebrachte Energiemenge beträgt  $E = 144$  kJ. Nach der Austenitisierung erfolgt das Abschrecken auf dem Dorn. Durch das Abschrecken sitzt die Schaltmuffe fest auf dem Dorn und löst sich erst durch das anschließende Anlassen wieder von diesem. Der Energieaufwand beträgt hierfür 6 kW Induktorleistung für 6 s, was wiederum einer Energie von  $E = 36$  kJ entspricht. Die Prozessparameter, welche im industriellen Umfeld analysiert wurden, sind im Anhang beigefügt.

## 4.6 Harträumen

Die Hartbearbeitung dient meist der Beseitigung von Materialverzügen, welche bei der Wärmebehandlung entstehen. Durch das rasche Abfallen der Temperatur im Bauteil beim Abschrecken im Wärmebehandlungsprozess entstehen Temperaturgradienten, die nach  $\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l$  zu Verspannungen in Form von Dehnungen im Material führen. Zunächst in Form von elastischen Spannungen nach dem Hooke'schen Gesetz, die nach dem Erreichen der Warmstreckgrenze  $R_{es}(T)$  in plastische Verformungen übergehen. Diese plastischen Verformungen sind von dauerhaftem Zustand und müssen durch die Hartbearbeitung korrigiert werden.

Am wbk Institut für Produktionstechnik ist in einer vorangegangenen Arbeit die Hartbearbeitung von Schaltmuffen von Harald Maier untersucht worden. Die Prozessparameter sind vergleichbar zu den hier vorliegenden Werten, da es sich um Bauteile von demselben Industriepartner bzw. dem Demonstratorbauteil des Graduiertenkollegs handelt. Harald Maier hat bei seinen Versuchen den Verzugvektor mit ca. 0,1 mm bestimmt. (Schulze et al., 2012).

Als Werkzeuge kommen bei der Hartbearbeitung meist Hartmetalle mit einer für die Bearbeitung angepassten Geometrie der Schneide zum Einsatz. Die Spannungsdicken sind geringer als bei der Weichbearbeitung und liegen bei ca. +10 – -20  $\mu\text{m}$ . Die Schneiden weisen dabei einen negativen Spanwinkel auf, was diese stabilisiert. Der Aufbau eines Räumwerkzeuges für die Hartbearbeitung unterscheidet sich von dem Werkzeug für die Weichbearbeitung. Die vollständige Fertigung aus Hartmetall wäre in dieser Größenordnung nicht wirtschaftlich. Daher wird ein Grundkörper aus Stahl gefertigt, auf dem die Hartmetallschneiden in Ausprägung einer Buchse aufgeschoben und fixiert

werden. Abbildung 4-22 erläutert den Aufbau als Schnitt durch das Werkzeug (Bejnoud 2018).

Die Buchse ist zusätzlich meist mit einer Titan-Aluminium-Nitrid-Beschichtung (TiAlN) beschichtet, was den Widerstand gegen Verschleiß an den Schneiden weiter steigert. Abbildung 4-22 bildet vier Zahnstufen der Schneidengeometrie einer typischen Harträumbuchse ab. Der negative Spanwinkel von  $-15^\circ$  ist deutlich zu erkennen.

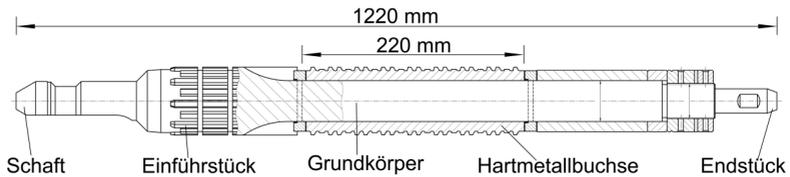


Abbildung 4-22: Schematische Darstellung Räumnadel zur Hartbearbeitung (Bejnoud, 2017)

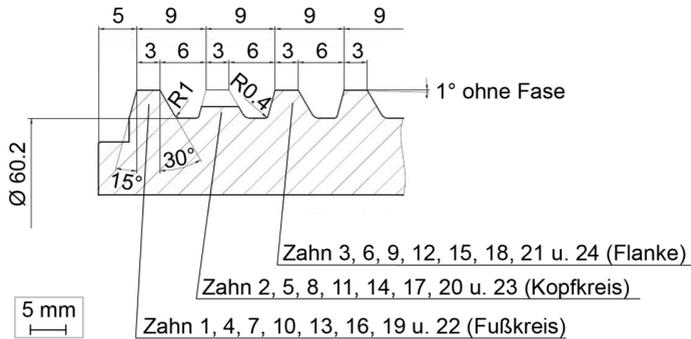


Abbildung 4-23: Vergrößerung einer typischen Schneidengeometrie für das Harträumen (Bejnoud, 2017)

Für die Berechnung des Energiebedarfs für die Schaltmuffe wird auf die Ergebnisse der Untersuchungen von Harald Meier zurückgegriffen. Wie im vorigen Kapitel beschrieben, kann der Referenzprozess beim Industriepartner nicht untersucht werden, da dieser von der üblichen Prozessroute aus organisatorischen Gründen abweicht. Die Ergebnisse von Meier werden daher auf den vorliegenden Prozess übertragen.

(Meier, 2018) untersucht in seiner Arbeit Proben aus 20MnCr5, welche Teilbereiche der Verzahnung der Schaltmuffe aufweisen. Die Teilbereiche entsprechen exakt drei Nuten mit identischem Materialvolumen im Demonstrator, Abbildung 4-24 links. Nach der Weichbearbeitung werden diese einer Einsatz-Wärmebehandlung unterzogen, um die geforderten Parameter des Demonstratorbauteils zu erreichen.

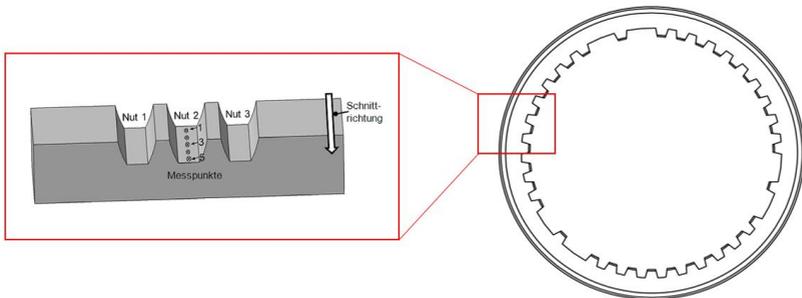


Abbildung 4-24: Proben mit drei Nuten aus Getriebe­schaltmuffe von Meier (Meier, 2018) (links), gesamte Schaltmuffe (rechts)

Die Spanungsdicke bei den Untersuchungen liegt im Bereich  $h = 10 - 40 \mu\text{m}$  und die Schnittgeschwindigkeit im Bereich  $v_c = 10 - 150 \text{ m/min}$ . Auffällig ist der Kraftverlauf bei geringen Spanungsdicken von  $10 \mu\text{m}$ . Er liegt signifikant höher als bei größeren Spanungsdicken. Bei gehärteten Stählen führt der negative Spannungswinkel zu hohen Druckspannungen in der Bauteiloberfläche. Diese führen zur Plastifizierung des Werkstoffs und dem eigentlichen Trennen. Je mehr Wärme dabei entsteht, desto mehr wird das Material entfestigt und kann dem Prozess zugeführt werden, was zu sinkenden Kräften führt. Dieses Verhalten ist in der folgenden Abbildung 4-25 ersichtlich. (König et al., 1982;)

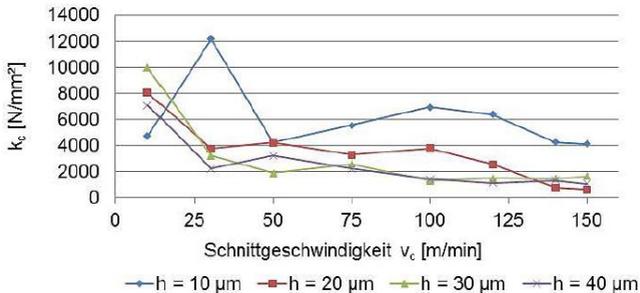


Abbildung 4-25: Spezifische Schnittkräfte gehärtetes 20MnCr5 in Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit und Spanungsdicke (Meier, 2018)

Am Institut wurde weiterhin in einer Abschlussarbeit zu Harträumuntersuchungen von einsatzgehärtetem 20MnCr5 spezifische Schnittkräfte von  $k_c = 2300 \text{ N/mm}^2$  bei  $h = 30 \mu\text{m}$  und  $v_c = 75 \text{ m/min}$  sowie  $k_c = 5500 \text{ N/mm}^2$  bei  $h = 10 \mu\text{m}$  und  $v_c = 75 \text{ m/min}$  gemessen (Melsa 2012). Diese Werte decken sich weitgehend mit den von Meier festgestellten Ergebnissen. Für die Bestimmung der notwendigen Energie zum Harträumen der Schaltmuffe wird daher ein für diese Bearbeitung üblicher Wert von ca.  $v_c = 60 \text{ m/min}$  und einer Spanungsdicke von  $h = 15 \mu\text{m}$  ausgegangen. Der dafür charakteristische Wert der spezifischen Schnittkraft wird auf Basis der vorangehenden Feststellungen zu  $k_c = 4450 \text{ N/mm}^2$  angenommen. Die Zerspanungsarbeit ergibt sich damit bei einem zu zerspanenden Volumen von ca.  $V_z = 0,68 \text{ cm}^3$  ( $68 \text{ cm}^2$  Gesamtflächeninhalt der Innenverzahnung  $\times 0,1$  Verzugvektor) zu  $W = k_c \cdot V_z = 3 \text{ kJ}$

Das induktive Härten von Bauteilen setzt bei 42CrMo4 optimaler Weise einen vorvergüteten Ausgangszustand voraus. Wie in Kapitel 4.4. aber bereits genauer beschrieben wird das Material im weichen Zustand weichbearbeitet und der Wärmebehandlung in diesem Zustand zugeführt. Auf Basis der Anforderungen an das Getriebebauteil vom Industriepartner soll die Schaltmuffe nach dem Herstellungsprozess eine Oberflächenhärte von 650 bis 750 HV10 aufweisen. 42CrMo4 weist aufgrund seiner höheren Festigkeitseigenschaften (vgl. Kapitel 4.1.1) aber eine genügend hohe Kernfestigkeit auf, so dass auch nach der induktiven Wärmebehandlung aus dem weichen Zustand heraus eine sichere Bauteilfestigkeit für den Betrieb erreicht wird. Ausschlaggebend ist weiterhin die ausreichend hohe Härte im Randbereich, da hier der größte Verschleiß durch die mechanischen Schaltvorgänge im Getriebe entsteht.

In der Arbeit von Fiedler wird der Einfluss des Werkstoffzustandes auf das Ergebnis der Wärmebehandlung beim induktiven Randschichthärten untersucht. Er unterzieht in seiner Arbeit den Werkstoff 42CrMo4 im vergüteten, normalisierten und weichgeglühten Zustand der induktiven Randschichthärtung und Betrachtet die Auswirkungen auf das Härteergebnis. (Fiedler, 2013)

Die Proben 42-V-950-1-3 wurden bei 950 °C induktiv wärmebehandelt abgeschreckt und angelassen. Im Anschluss wird der Härtetiefenverlauf untersucht. In der folgenden Abbildung 4-26 sind die Ergebnisse der Einhärtetiefe in HV0,5 über den Abstand zur Probenoberfläche dargestellt.

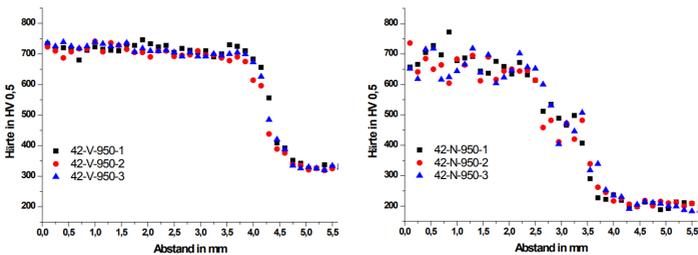


Abbildung 4-26: Härtetiefenverlauf nach induktiver Randschichthärtung 42CrMo4 vergütet (links), weichgeglüht (rechts) (Fiedler, 2013)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Proben im weichen Zustand ein wesentlich größeres Streuband aufweisen und die Härte bereits nach 2 mm anfängt einzubrechen. Jedoch ist die Härte im Randschichtbereich immer noch im Bereich um die 700 HV0,5. Auch die erreichbare Tiefe ist für die Schaltmuffen ausreichend steuerbar (vgl. Zahnbreite Schaltmuffe ca. 3,2 mm, Aufkohlungstiefe 0,6 mm).

Der übliche Weg des induktiven Randschichthärtens mit Abschrecken auf einem Dorn kann auch im weichgeglühten Zustand durchgeführt werden. Die Einbußen an erreichbarer Oberflächenhärte können in Bezug auf die Bauteilanforderungen und die gesteigerte Materialfestigkeit von 42CrMo4 gegenüber 16MnCr5 in Kauf genommen werden.

## 4.7 Strahlen

Die Untersuchungen der Prozessketten des Industriepartners umfassen auch die Strahlbehandlung der Getriebeschaltmuffen. Die Bauteile werden in großen Anlagen auf Gestelle sortiert, welche mittels einer Schiene durch die Strahlanlage gezogen werden. Während sich die Gestelle in der Strahlanlage befinden, drehen sich die Gestelle zusätzlich um die Hochachse. Die Energieflüsse können beim Strahlen wieder durch die Ermittlung der Werte vor Ort durchgeführt und auf eine Schaltmuffe selbst zurückgerechnet werden. Die vor Ort ermittelten Daten sind in tabellarischer Form dem Anhang beigefügt. In Abbildung 4-27 ist das Gestell mit den aufgehängten Schaltmuffen zu sehen. Die relativ lockere Packung der Bauteile ist notwendig, dass das Strahlmittel von allen Seiten auf die Bauteile auftreffen kann.



Abbildung 4-27: Schaltmuffen auf dem Gestell zum Reinigungs-/Verfestigungsstrahlen

Zum Reinigungsstrahlen kommt beim Industriepartner eine Strahlanlage zum Einsatz, die mittels zweier Turbinen Strahlsand mit einem Massenstrom von  $\dot{m} = 187 \text{ kg/min}$  pro Turbine bereitstellt. Die Strahlmittelabwurfgeschwindigkeit beträgt  $v_a = 50 \dots 90 \text{ m/s}$ . Zur Ermittlung der Energie pro Schaltmuffe kann unter der Annahme, dass die kinetische Energie des Strahlguts beim Auftreffen auf die Bauteile vollständig absorbiert wird, Formel 4-14 eingesetzt werden. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass der Energiebedarf mit  $E = P \cdot t$  aus der Beschleunigungsleistung  $P_{Besch}$  und der Strahlzeit  $t$  berechnet wird. Es werden zeitgleich 96 Schaltmuffen behandelt.

$$P_{Besch} = \frac{1}{2} \dot{m} v_a^2 \quad \text{Formel 4-14}$$

Da die Werkstücke in zwei Stufen gereinigt und entgratet werden müssen diese, separat betrachtet werden. In der ersten Stufe, die 9 Minuten dauert, werden die Gestelle mit einem Wirkleistungsbezug von  $P_{Strahl} = 38,5 \text{ kW}$  gestrahlt. Der Energiebedarf der Anlage beträgt  $E_{Strahl} = P_{Strahl} \cdot t = 20,8 \text{ MJ}$  und bezogen auf ein Werkstück  $E_{Strahl} = 20,8 \text{ MJ} / 96 = 217 \text{ kJ}$ .

Die zweite Phase dient rein der Reinigung der Bauteile vom Strahlmittel. Diese Phase dauert 7 Minuten. Der Energiebedarf dieser Phase lautet  $P_{BK} = 28 \text{ kW}$ . Bezogen auf die Dauer berechnet sich die Energie zu  $E_{BK} = P_{BK} \cdot t = 11,8 \text{ MJ}$  und damit für ein Werkstück  $E_{BK} = 11,8 \text{ MJ} / 96 = 123 \text{ kJ}$ .

Ohne Berücksichtigung von Nebenzeiten und rein auf den Bearbeitungsvorgang fokussiert erfordert dieser Bearbeitungsschritt einen Energiebedarf der Anlagen von  $E = 340 \text{ kJ}$  pro Bauteil. In Abbildung 4-28 sind die Parameter ersichtlich, welche an der Strahlanlage abgelesen werden können.

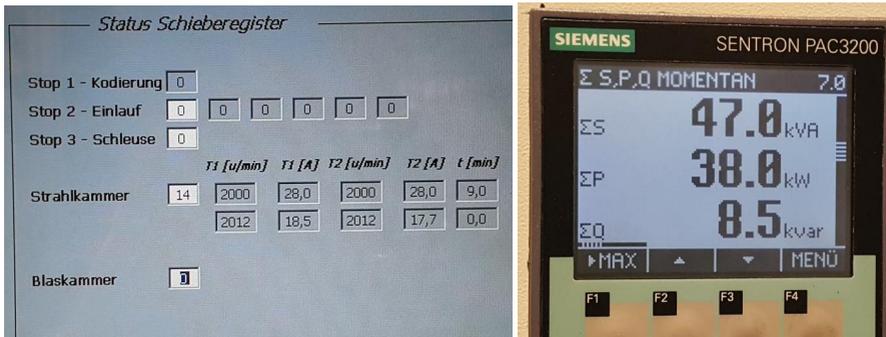


Abbildung 4-28: Technische Parameter Strahlanlage (links), Energieverbrauch der Anlage (rechts)

Der gezeigte Energiebedarf beruht auf dem Verbrauch der gesamten Anlage. Die Anlage besteht aus 8 Motoren, die die Leistung aufnehmen.

#### 4.8 Zusammenfassung der Energieaufwände

Die in diesem Kapitel berechneten Energiewerte basieren vornehmlich auf Werten, welche selbst in Experimenten beobachtet werden. Sofern dies nicht möglich ist, wird auf Werte von vorangegangenen Arbeiten am Institut und Literaturwerte zurückgegriffen. Es werden zwei Verfahrensrouten untersucht. Eine Prozessroute mit 16MnCr5 als Werkstoff ist im Referenzprozess beim Industriepartner abgebildet. Die zweite Prozessroute setzt den Einsatz von 42CrMo4 als Werkstoff zur Herstellung der Schaltmuffe voraus. Diese Route wird unter der Annahme gewählt, dass der Härteprozess der induktiven Randschichthärtung – energetisch gesehen – dem des Einsatzhärtens überlegen ist und sich durch den Einsatz der induktiven Härtung eine Verbesserung der Energiebilanz einstellt. Im Folgenden werden die Energiebilanzen über die Einzelprozesse der beiden Prozessrouten aufgelistet.

**Prozesskette 16MnCr5**

Die Energiebilanz zur Herstellung der Getriebeschaltmuffe ist in Tabelle 4-5 zusammengefasst. Die Prozessketten umfassen das Weichräumen des vorgedrehten Rohlings, das Aufkohlen, Abschrecken und Anlassen, die Hartbearbeitung und im letzten Prozessschritt das Reinigungsstrahlen.

Tabelle 4-5: Energiebilanz 16MnCr5

Prozess	Absoluter Energiebedarf [kJ]	Relativer Energiebedarf [%]
Weichräumen	16	1,5
Aufkohlen	650	60,6
Ofenanlassen	64	6,0
Harträumen	< 5	0,9
Strahlen	340	31,7
<b>Summe</b>	<b>1073</b>	<b>100</b>

Die Wärmehandlung ist neben dem Reinigungsstrahlen betragsmäßig der größte Energieverbraucher. Dabei ist jedoch anzumerken, dass bei einem Energiebedarf von 370 kJ von einer 100 %igen Auslastung des Durchstoßofens ausgegangen wird. Wenn der Ofen mit nur 50 % Auslastung betrieben wird, erhöht sich der Wert auf 680 kJ. Für eine wirtschaftliche Nutzung der Wärmebehandlung ist daher immer eine maximale Auslastung des Ofens anzustreben.

**Prozesskette 42CrMo4**

Die Prozessroute des Vergütungsstahls und die zugehörige Energiebilanz ist nachfolgend in Tabelle 4-6 zusammengefasst. Die Bilanz enthält die einzelnen Prozessschritte der Weichbearbeitung des vorgedrehten Rohlings, die induktive Randschichthärtung aus dem weichgeglühten Zustand mit Anlassen und im letzten Schritt das Reinigungsstrahlen. Auch in dieser Bilanz ist auffällig, dass die Energie für die Wärmebehandlung einen großen Teil an der Gesamtenergie beiträgt. Jedoch ist der Wert geringer als beim Strahlen und nicht von der Auslastung der Anlage abhängig bzw. nicht in dem Maße wie beim Einsatzhärten. Es ist weiterhin auffällig, dass aufgrund des Abschreckens auf einem Dorn der Verzug reduziert und somit die Hartbearbeitung eingespart werden kann, da die geforderte Randschichthärte bei der Wärmebehandlung aus dem weichgeglühten Zustand heraus trotzdem erreicht wird.

Tabelle 4-6: Energiebilanz 42CrMo4

Prozess	Absoluter Energiebedarf [kJ]	Relativer Energiebedarf [%]
Weichräumen	21	3,8
Induktionshärten	163	29,4
Kurzzeitanlassen	30	5,4
Strahlen	340	61,4
<b>Summe</b>	<b>554</b>	<b>100</b>

Vergleicht man die einzelnen Prozessschritte miteinander, ergeben sich Abhängigkeiten in Bezug auf das Material, welche sich direkt auf den notwendigen Energiebedarf zur mechanischen Bearbeitung rückkoppeln. 42CrMo4 weist gegenüber 16MnCr5 eine um ca. 30 % gesteigerte Härte im weichen Zustand auf. Die Bearbeitungskräfte und der daraus resultierende Energiebedarf sind ebenfalls um diesen Betrag gesteigert.

Die Grundannahme in der vorliegenden Arbeit war, dass die induktive Randschichthärtung dem Einsatzhärten energetisch betrachtet überlegen ist. Es hat sich gezeigt, dass diese Annahme zutreffend ist. Der Energiebedarf liegt sogar je nach Auslastungszustand der Einsatzhärteanlage um den Faktor 2,2 - 3,8 niedriger als beim Einsatzhärten.

Aufgrund der unterschiedlichen Prozessführung beim Härten kann bei der induktiven Randschichthärtung sogar auf den Prozessschritt Harträumen verzichtet werden. Der Energiebetrag ist zwar sehr gering, jedoch entfällt das Werkzeug und die gesamte Maschine für die Bearbeitung.

Der letzte Prozessschritt ist bei beiden Routen identisch. Die Bauteile müssen von der Wärmebehandlung und der spanenden Bearbeitung entgratet und gereinigt werden. Die Daten für den Energiebedarf in diesem Schritt basieren nur auf dem Energieverbrauch der Anlage beim Industriepartner, da keine genaueren Prozessdaten zur Verfügung stehen. Da für beide Materialien jedoch der gleiche Energiebetrag aufgewendet werden muss, überwiegt dies nicht all zu sehr.

Die Ergebnisse im Vergleich sind in der folgenden Abbildung 4-29 ersichtlich.

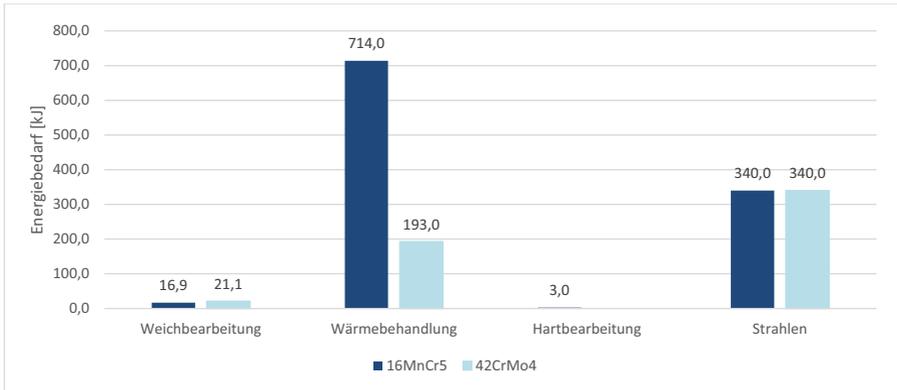


Abbildung 4-29: Gegenüberstellung Energiebedarf Herstellung Schaltmuffe aus 16MnCr5 (dunkelblau) und 42CrMo4 (hellblau)

### 4.9 Kosten - Einbeziehen von Energie- und Werkzeugkosten

Energetisch betrachtet liegt der Gesamtenergiebedarf zur Fertigung der Schaltmuffen rund 210 kJ auseinander. Das Entfallen der Hartbearbeitung, aber auch die Kosteneinsparungen bezüglich des Werkzeugs muss in Betracht gezogen werden. Auf dieser Basis folgt nun eine Analyse der auf den Energie- und Materialeinsatz bezogenen Kosten.

Für die Berechnung der beiden Prozessrouten sind die Preise für die eingesetzten Energieträger zu ermitteln. Das sind zum einen Erdgas, mit dem die Durchstoßöfen betrieben werden, und zum anderen elektrischer Strom.

Das Erdgas, welches der Industriepartner vom Netzversorger bezieht, hat einen Heizwert von 36 MJ/m<sup>3</sup> bei Kosten von 6,4 Cent/kWh zum Zeitpunkt des Besuchs vor Ort. Der elektrische Strom hingegen kostet mit 29 Cent/kWh fast 5-fach so viel pro kWh, ebenfalls zum Zeitpunkt der Datenanalyse vor Ort. 1 kWh entspricht einer Energiemenge von 3600 kJ. Mit diesen Werten lassen sich zunächst die Energiebedarfe in Kilowattstunden umrechnen und daraufhin monetär bewerten. Das Ergebnis ist in Tabelle 4-7 aufgeführt.

Tabelle 4-7: Kostenabschätzung Herstellung Schaltmuffe aus 16MnCr5 und 42CrMo4 pro Werkstück

Prozess	16MnCr5		42CrMo4	
	[Wh]	[Cent]	[Wh]	[Cent]
Weichräumen	4,44	0,13	5,83	0,17
Wärmebehandlung	198,33	1,27	53,61	1,55
Hartbearbeitung	0,83	0,02		
Strahlen	94,44	2,74	94,44	2,74
	<b>298,06</b>	<b>4,16</b>	<b>153,89</b>	<b>4,46</b>

Es ist signifikant, dass trotz höherem Energiebedarf zum Einsatzhärten die Kosten für das Bauteil am Ende auf der Route Induktionshärten teurer ausfällt. Das liegt daran, dass die Kosten für Erdgas zum Zeitpunkt der Datenanalyse beim Industriepartner (2015) etwa nur 1/5 der Kosten für elektrischen Strom betragen haben. Es gilt jedoch wieder zu berücksichtigen, dass beim Einsatzhärten mit einer Auslastung von 100 % gerechnet wurde. Bei einer Auslastung von 50 % würde der Unterschied nur noch bei 0,5 Cent liegen.

Wie bereits erwähnt, entfällt beim Einsatz von 42CrMo4 zusätzlich ein Bearbeitungsschritt und somit Werkzeug- und Maschinenkosten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Räumwerkzeuge nur eine bestimmte Anzahl an Werkstücken bearbeiten können, bevor die Schneiden wiederaufbereitet und nachgeschliffen werden müssen.

Das am Institut vorliegende Räumwerkzeug zur Weichbearbeitung mit einer Standzeit von ca. 12.000 Werkstücken in der Produktion beim Projektpartner bei 16MnCr5 und ca. 10.000 Werkstücken kostet 4.000 Euro und kann 20-Mal nachgeschliffen werden, was jeweils mit 1.000 Euro Kosten berechnet wird. Für die Hartbearbeitung ist das Werkzeug aus mehreren Teilen aufgebaut und aus höherfestem Material hergestellt. Die Bearbeitung erfolgt durch eine gesinterte Hartmetallbuchse. Aufgrund des komplizierteren Herstellungsprozesses sind die Herstellungskosten entsprechend höher. Das 20-fach nachschleifbare Werkzeug kostet mit 12.000 Euro etwa dreimal so viel wie das Werkzeug aus Schnellarbeitsstahl. Das 20-fach mögliche Nachschärfen ist wegen des ebenfalls höheren Aufwands bei 2.000 Euro anzusetzen. Die Standzeit liegt bei ebenfalls ca. 12000 Werkstücken. Tabelle 4-8 stellt die um die Werkzeugkosten erweiterte Tabelle dar.

Tabelle 4-8: Erweiterte Energie- und Kostentabelle

Prozess	16MnCr5			42CrMo4		
	[kWh]	[Cent]	[Cent] Wkz.	[kWh]	[Cent]	[Cent] Wkz.
Weichräumen	4,44	0,13	10,00	5,83	0,17	12,00
Wärmebehand- lung	198,33	1,27		53,61	1,55	
Hartbearbeitung	0,83	0,02	20,00			-
Strahlen	94,44	2,74		94,44	2,74	
	<b>298,06</b>	<b>4,16</b>	<b>30,00</b>	<b>153,89</b>	<b>4,46</b>	<b>12,00</b>

Während bei 16MnCr5 die Werkzeugkosten etwa das 7,7-fache der Energiekosten ausmachen, sind es bei 42CrMo4 nur etwa das 2,4-fache. Begründet ist dies trotz höherem Verschleiß bei der Weichbearbeitung in der Reduzierung der mechanischen Bearbeitung um die Hartbearbeitung.

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Werkzeugkosten einen erheblich größeren Anteil an den Werkstückkosten ausmachen. Die Verfahrensrouten sollte daher aus kostentechnischer Sicht auf den Einsatz von 42CrMo4 als Schaltmuffenmaterial setzen.

## 5 Effizienzmaßnahmen

Die Untersuchungen der Energieflüsse entlang der beiden Prozessketten haben eindrucksvolle Ergebnisse hervorgebracht. Der ausschlaggebende Faktor ist die Betrachtungsweise der Ergebnisse bzw. der Faktor, welcher optimiert werden soll. Unter jedem Gesichtspunkt entsteht ein anderes Ergebnis. Zu betrachten sind der Energieverbrauch entlang der Prozesskette, die für die Energieaufbringung notwendigen Energiekosten und die Kosten der Werkzeuge für die mechanische Bearbeitung. Abbildung 5-1 führt diesen Vergleich auf. Der Energiebedarf für die Route induktives Härten ist mit 0,164 kWh gegenüber 0,229 kWh für die Variante Einsatzhärten um ca. 30 % geringer. Unter diesem Gesichtspunkt fällt das Ergebnis pro 42CrMo4 aus. Werden nun die Energiekosten betrachtet, die als wesentliche Energieträger auf Erdgas und elektrischen Strom setzen, liegt der Unterschied bei 3,899 Cent für Einsatzhärten zu 4,761 Cent beim induktiven Härten. Der Unterschied liegt in diesem Vergleich bei rund 20 %. Der gewichtigste Faktor wird mit der Betrachtung der Werkzeugkosten erreicht. 30 Cent bei der Verfahrensrouten Einsatzhärten gegenüber 12 Cent bei der Verfahrensrouten Induktionshärten. Die finanzielle Diskrepanz liegt bei sogar 60 %.

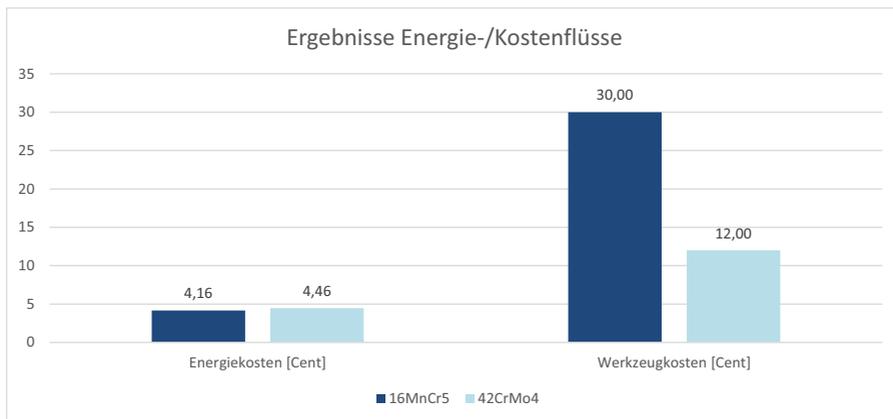


Abbildung 5-1: Vergleich von Energiebedarf und Kosten entlang der Prozessketten von 16MnCr5 und 42CrMo4

Die Effizienzmaßnahmen sollen daher klar auf die Betrachtung von 42CrMo4 als Ausgangswerkstoff für die Schaltmuffenherstellung ausgelegt werden. Inwieweit diese

Maßnahmen auf den Werkstoff 16MnCr5 übertragen werden können, ist jedoch ebenfalls nicht außer Acht zu lassen, da im industriellen Umfeld – wie beim Industriepartner vorgefunden – ebenso angepasste Prozessketten zum Einsatz kommen können, die nicht streng den Literaturvorgaben folgen.

## 5.1 Warmzerspannung

Unter Warmzerspannung versteht man das Fertigungsverfahren der spanenden Bearbeitung (Drehen, Fräsen, Stoßen/Hobeln, Bohren), bei dem durch eine äußere Wärmezufuhr die Festigkeit des Werkstoffzusammenhalts herabgesetzt wird. Besonders gängig ist dieses Verfahren bei schwer zerspanbaren Werkstoffen, wie Nickel-Basis-Legierungen oder Titan. Die Temperatur dient der Herabsetzung der Zerspanungsarbeit in der Scherebene.

Zurückführen lässt sich dieses Verhalten auf das Werkstoffverhalten und die damit verbundenen temperaturabhängigen Fließkurven. Bei der Zerspanung entsteht beim Kontakt der Schneide mit dem Werkstoff zunächst eine elastische und daraufhin eine plastische Verformung. Während der Werkstoff in den Zustand des plastischen Fließens überführt wird, muss die Formänderungsarbeit eingebracht werden. Durch die plastische Verformung entsteht Wärme im Werkstoff, welche durch die Verformung des Metallgitters hervorgerufen wird. Je schneller diese Formänderung und somit Scherarbeit durchgeführt wird, desto mehr Wärme entsteht. Bei der Zerspanung entsteht der eigentliche Span durch Spannungsüberhöhungen im Spangrund, die ein Reißen des Materials an der Schneidkante bewirken. Der sich zu bilden beginnende Span läuft über die Spanfläche ab und heizt sich durch Reibung weiter auf.

Die Warmzerspannung bedient sich dieser Gegebenheit und bringt, wie bereits erwähnt, Wärme in das Material ein, was die Entfestigung des Werkstoffs positiv beeinflusst. In der folgenden Abbildung 5-2 sind die Fließkurven bzw. die Formänderungsfestigkeit über die Temperatur von CK45N bei unterschiedlichen Formänderungsgeschwindigkeiten  $\dot{\varphi}$  dargestellt. Ab ca. 400 °C ist ein signifikanter Abfall der Festigkeit des Werkstoffs bei  $\dot{\varphi}=0,1 \text{ s}^{-1}$  ersichtlich. Mit zunehmender Umformgeschwindigkeit verschiebt sich der Abfall in den Bereich über 600 °C.

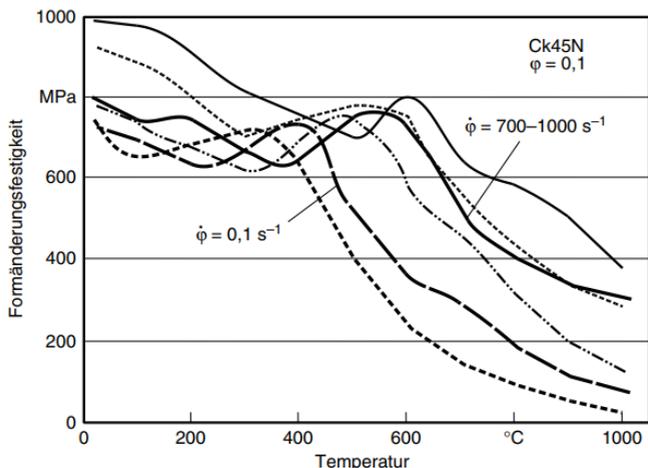


Abbildung 5-2: Formänderungsfestigkeit über Temperatur von CK45 (Tönshoff & Denkena, 2011)

Die Prozesskette zur Herstellung der Schaltmuffe aus 42CrMo4 enthält bereits alle Nebenprozesse, welche mittels eines neuen Prozessablaufs die Vorteile der Warmzerspannung nutzen und gleichzeitig keine zusätzliche Peripherie oder Maschinen erfordern. Die Art der Prozessführung muss jedoch angepasst werden. Die Auswirkung auf die effizientere Nutzung der eingebrachten Energie bei gleichzeitig vermindertem Werkzeugverschleiß schafft eine Brücke zwischen den Betrachtungsweisen der Energie- und Kostenflüsse, welche im vorigen Kapitel vorgestellt wurde.

Die Idee für die vorliegende Schaltmuffe beinhaltet den Ansatz der Warmzerspannung zur Fertigung der Schaltmuffe aus 42CrMo4 ohne das zusätzliche Einbringen der Energie zum Vorwärmen des Werkstoffs, sondern nutzt die ohnehin erforderliche Wärmeenergie zum Härten der Verzahnung. Dieser Ansatz erfordert eine Anpassung der Prozesskette und zusammenhängender Abläufe, wirft aber gleichzeitig eine essentielle Frage auf. Die Untersuchungen der Warmzerspannung basieren meist auf dem Einsatz von Hartmetallwerkzeugen, da bereits die Ausgangswerkstoffe nur schwer zerspanbar sind. Im vorliegenden Fall wird als Räumwerkzeug jedoch eine aus HSS gefertigte Räumnadel eingesetzt. HSS ist nicht in gleicher Form wärmebeständig wie Hartmetall. Diese Gegebenheit wirkt sich besonders auf die Schneidkante aus. Eine gesteigerte

Temperatur an der Schneidkante bedeutet für HSS-Werkzeuge einen erheblich größeren Verschleiß. Die Spannungstiefen beim Räumen sind sehr gering, weswegen die Schneidkantenverrundung einen größeren Einfluss auf das Unterschreiten der Mindestspannungstiefe ausübt. Diese liegt bei etwa  $1/3$  des Schneidkantenradius.

Im folgenden Kapitel werden die notwendige Anpassung für die kombinierte Warmzerspannungs- / Wärmebehandlungsprozesskette und ein Ansatz zur möglichen Umsetzung vorgestellt.

## 5.2 Anpassen der Prozesskette

Die aktuelle Prozesskette wird durch die aufeinanderfolgenden Einzelschritte der Weichbearbeitung, der Wärmebehandlung, der Hartbearbeitung und des Reinigungsstrahlens repräsentiert. Wie im vorigen Kapitel festgestellt, ist die Fortführung der Schaltmuffenherstellung aus 42CrMo4 anzuraten. Daher wird sich nun auch auf die Anpassung der repräsentativen Prozesskette konzentriert. Abbildung 5-3 visualisiert die Reduzierung der aktuellen Prozessabfolge und überführt sie zur Kette für den alternativen Werkstoff.

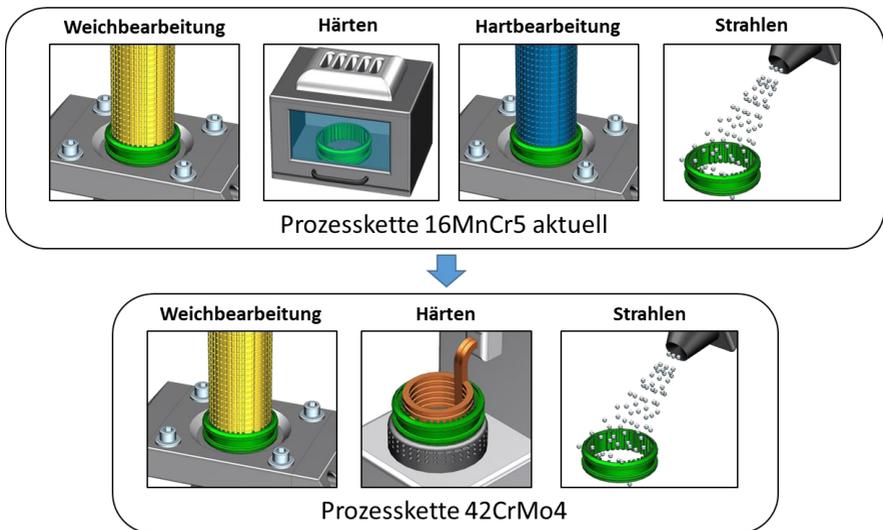


Abbildung 5-3: Aktuelle Prozesskette Fertigung Schaltmuffe aus 16MnCr5

Die weitere Anpassung erfolgt unter einigen Restriktionen und damit verbundenen Hürden. So sollen weder zusätzliche Bearbeitungsschritte integriert noch die Gesamtmenge der in der aktuellen Kette eingebrachten Energie erhöht werden. Des Weiteren soll der Werkzeugverschleiß vermindert werden. Erreichen lässt sich das durch ein Zusammenziehen einzelner Prozessschritte und das Einsetzen eines kombinierten Zerspanungsprozesses, bestehend aus Warmzerspanung, wobei die Energie für die Aufwärmung des Werkstoffs aus der ohnehin für die Wärmebehandlung notwendigen Energie stammt.

Der hierfür notwendige Prozessablauf soll folgendermaßen umgesetzt werden:

Um die Weichbearbeitung in die Warmzerspanung zu überführen, ist ein Vorheizen des Bauteils mit anschließender Zerspanung notwendig. Die Zerspanung muss dabei trocken erfolgen. Die induktive Härteanlage muss sich dafür in unmittelbarer Nähe zur Räummaschine befinden. Der Abstand zwischen den beiden Bearbeitungsräumen sollte dabei möglichst gering sein. Im ersten Schritt wird die Schalmuffe durch den Induktor in der Wärmebehandlungsstation auf Warmzerspannungstemperatur gebracht. Dies kann z. B. ca. 1/3 der Wärmebehandlungstemperatur sein. Direkt nach der Vorwärmung wird das Werkstück durch einen Greifer oder Rundtisch in der Räummaschine platziert und der Räumhub gestartet. Die im Bauteil befindliche Wärmeenergie senkt die Bearbeitungskräfte und schont das Werkzeug. Nach der Warmzerspanung wird die Schalmuffe wieder in der Wärmebehandlungsmaschine platziert und auf Härtetemperatur erhitzt. Der Dorn wird in das Werkstück gefahren und das Bauteil abgeschreckt. Durch das Anlassen löst sich das Werkstück wieder vom Dorn und kann in den Strahlprozess gegeben werden. Abbildung 5-4 illustriert diesen Vorgang schematisch.

- **Vorheizen des Bauteils auf Warmzerspannungstemperatur**
- **Weichbearbeitung mit reduzierten Kräften**
- **Nachheizen auf Härtetemperatur sowie Abschrecken auf Dorn**

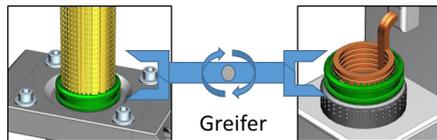


Abbildung 5-4: Angepasste Prozessverkettung Spanen/Wärmebehandeln

Die Fragestellung zur Realisierung der Prozesskombination ist, auf welche Temperatur das Werkstück vorgeheizt werden muss, ohne dass dabei die Schneide des Werkzeugs durch die eingebrachte Wärme zusätzlich geschädigt wird. Hierfür ist grundsätzlich zu klären, ob ein Erwärmen des Ausgangswerkstoffs dazu führt, dass die durch die Zerspanung entstehende Wärme um diesen Betrag gesteigert wird und das Absinken der Kräfte durch die weitere Erwärmung zurückgeführt werden kann. In diesem Fall wäre die Warmzerspannung mit einem HSS-Werkzeug nicht zielführend. Die zusätzliche Wärme an der Schneidkante würde diese in einem größeren Maße schädigen als sich der positive Effekt auf diese durch die sinkenden Zerspanungskräfte auswirkt. Beim

Einsatz von Hartmetall als Werkzeugmaterial ist dieser Effekt nicht von großer Bedeutung, da der Schneidwerkstoff, wie bereits erwähnt, eine höhere Warmfestigkeit aufweist.

Ob eine Umsetzung der optimierten Prozesskette eine gewinnbringende Alternative zum aktuellen Prozess sein kann, hängt daher von den folgenden Fragestellungen ab:

- Wie hoch ist die mögliche Vorheiztemperatur, welche sicher angewendet werden kann, ohne eine weitere Erhöhung der Temperatur in der Zerspanungszone nach sich zu ziehen?
- Um welchen Betrag sinken die Bearbeitungskräfte durch das Vorheizen?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden im folgenden Zerspanungsuntersuchungen durchgeführt, die sich mit diesen beiden Fragestellungen beschäftigen.

### 5.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erweitert den in Kapitel 4.4 vorgestellten Versuchsaufbau zur Ermittlung der spezifischen Zerspanungskräfte um eine High-Speed-Wärmebildkamera, ein Pyrometer zur Erfassung der Oberflächentemperaturen der Proben und ein Glasfaserpyrometer. Die Maschine vom Typ LSP 240-V-RU2-AN der Firma Karl Klink wird von einem Linearmotor mit einer maximalen Prozesskraft von 20 kN angetrieben. Als Schneidstoff wird wieder auf die erodierten Wendeschneidplatten aus Kapitel 4.4 zurückgegriffen. Durch die Verwendung von Hartmetall lassen sich die Versuche genauer analysieren, da ein Einfluss von verfrühtem Verschleiß durch die erhöhte Temperatur der Proben nicht so stark zum Tragen kommt wie beim Einsatz von HSS.

Zur Aufzeichnung der Prozesskräfte wird ein Mehrkomponenten-Dynamometer vom Typ 9255B mit drei Ladungsverstärkern Typ 5017B von Kistler verwendet, auf dem die Zustellvorrichtung für das Werkzeug mit dem Maschinenkörper verbunden ist.

Die Temperaturerfassung erfolgt mit dem Thermografiesystem Image IR4300 der Firma Infratec und der zugehörigen Software IRBIS. Vor den Spannungsversuchen ist die Kamera bzw. das System, sowie die Pyrometer auf den Temperaturbereich von 60 – 200 °C kalibriert worden. Zum Ausschließen von Fehleinflüssen während der Messung findet eine Überprüfung durch Vorheizen von Proben auf definierte Temperaturen von

50, 100, 150, 200, 250 °C statt. Von den einzelnen Temperaturstadien werden Aufnahmen erstellt und ggf. in der Software korrigiert. Abbildung 5-5 vermittelt genauere Spezifikationen des Systems.

### Technische Spezifikationen

Spektralbereich	(3,7 ... 4,8) µm
Pitch	30 µm
Detektortyp	MCT
Detektorformat (IR-Pixel)	(320 × 256)
Auslesemodus	ITR
Öffnungsverhältnis	f/2.0
Detektorkühlung	Stirlingkühler
Temperaturmessbereich	(-40 ... 300) °C, bis 3.000 °C*
Messgenauigkeit	± 2 °C oder ± 2 %
Temperaturauflösung bei 30 °C	Besser als 0,02 K



Abbildung 5-5: Technische Daten IR4300 (Infratec.de)

Der gesamte Versuchsaufbau ist in der folgenden Abbildung 5-6 zu sehen. Die Wärmebildkamera ist orthogonal zum Werkzeug und der Materialprobe derart ausgerichtet, dass die Kamera den Schnitt mit maximaler Auflösung aufzeichnen kann. Mittels Magnetstativ wird das zuvor auf den Temperaturbereich kalibrierte Pyrometer IN 500-N der Firma IMPAC auf die Probenoberfläche ausgerichtet. Es dient Aufnahme der Temperatur zur parallel zu den Schnittkräften. Die Messungen werden über die Software DasyLab Version 10 mit einer Abtastfrequenz von 20 kHz aufgezeichnet. Die Spannungsdicke  $h$  wird mittels Feingewindespindel und dem mit der Linearführung verbundenen Glasmaßstab eingestellt. Die Zustellung wird daraufhin in der Anzeige des Glasmaßstabes in mm angezeigt. Mittels Lichtschranke wird der Messvorgang von Temperatur, Kräften und Thermografieaufnahme getriggert und gestartet. Nach dem Start läuft die Aufzeichnung für 10 Sekunden.

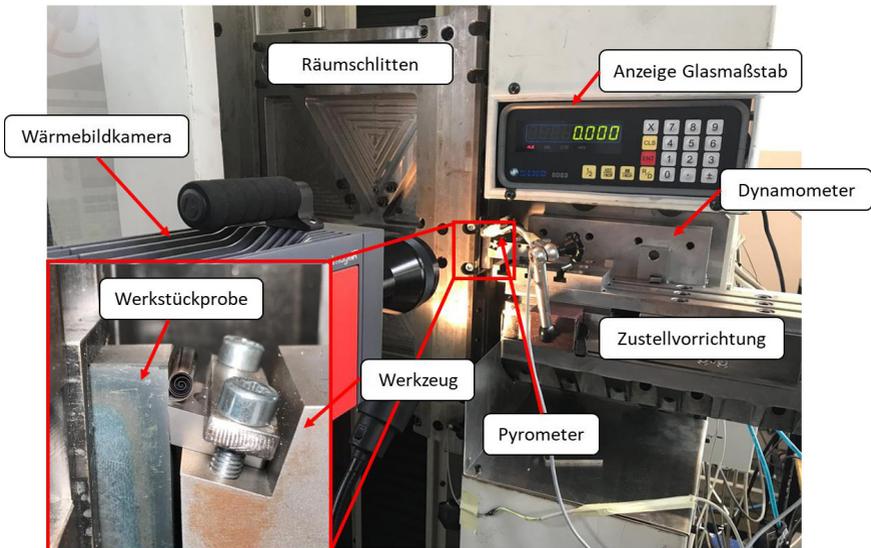


Abbildung 5-6: Versuchsaufbau

Ausschlaggebend für repräsentative Ergebnisse ist neben dem Werkstoff vor allem auch die Geometrie der Schneide. Die Schneidengeometrie der Wendschneideplatten (WSP) ist an die Geometrie der Räumnadel angepasst. Die WSP von Walter (vgl. Kapitel 4.3) werden auf einer Drahterodiermaschine vom Typ Mitsubishi FA-20 mit einem geraden Schnitt an der Stirnseite präpariert. Der Schnitt wird ca. 1 mm in Richtung Spanfläche verschoben, da sichergestellt werden soll, dass die durch den Schnitt entstehende Schneidkante einem Radius von 10  $\mu\text{m}$  gemäß einem neuen Räumwerkzeug entspricht. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da die Mindestspanungsdicke nicht unterschritten werden darf. Die Schneidkantenverrundung einer unbearbeiteten WSP liegt im Bereich von 30  $\mu\text{m}$ , was für diese Anwendung nicht tauglich ist. Abbildung 5-7 illustriert zwei Messergebnisse, von einer taktilen Messung der Schneidkante vor dem Erodieren (links) und nach dem Erodieren (rechts). Die Messung wird mit einem Perthometer der Firma Mahr vom Typ MarTalk durchgeführt. Es ist deutlich erkennbar, dass der Schneidkantenradius nach der Bearbeitung von 27  $\mu\text{m}$  auf 10  $\mu\text{m}$  zurückgegangen ist. Dem entstehenden Verschleiß der Wendschneidplatten während der Versuche kann durch mehrfaches Nacherodieren entgegengewirkt werden, um eine permanent scharfe Schneide zu gewährleisten.

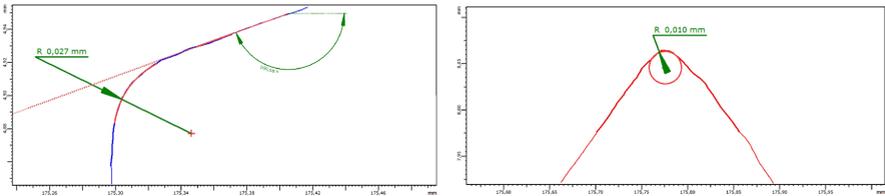


Abbildung 5-7: Schneidkantenradius un bearbeitete WSP (links), erodiert (rechts)

Als Methode der Qualitätssicherung wird je neuer Schnittgeschwindigkeit eine neue bzw. erneut erodierte WSP eingesetzt. Dies gilt für die Kalt- als auch die Warmzer-spannungsversuche.

Zur genaueren Ermittlung der sich während der Spanbildung einstellenden Temperatur möglichst nahe an der Schneidkante, wird zusätzlich ein faseroptisches Zwei-Farben Pyrometer – entwickelt vom Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung der RWTH Aachen – in der Wendeschneidplatte platziert. Hierfür wird mittels Mikrofunkenerosion ein ca. 8 mm tiefes Loch in 1 mm Abstand parallel zur Schneidkante erodiert, in dem die Glasfaser platziert werden kann. Unter Einbeziehung der Wärmeleitung des Schneidstoffmaterials soll mittels dieser Messung die thermografische Aufnahme validiert werden. Das Glasfaserpyrometer birgt die Besonderheit, mittels zweier Wellenlängenbereiche die Temperatur ohne Kenntnis des Emissionsgrads des zu messenden Objekts mit hoher Genauigkeit erfassen zu können. Mit dem Gerät können bereits Temperaturen ab  $250\ ^\circ\text{C}$  mit sehr hohen Abtastraten gemessen werden. Auf Abbildung 5-8 ist links das Werkzeug mit eingespannter Wendeschneidplatte erkennbar. Nahe der Schneidkante ist eine Bohrung mit 0,8 mm Durchmesser eingebracht, wie in der Vergrößerung dargestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist das Probenmaterial erkennbar, wie es in der Spannvorrichtung am Räumschlitten befestigt wird. Die Rück- und Oberseite der Probe wird mittels Keramikelementen, die Seitenflächen mittels Quarzglasplättchen vom Räumschlitten thermisch isoliert. Dies ist notwendig, da die hohe Wärmekapazität des metallischen Räumschlittens und der Probenaufnahme an der Maschine die Wärme der vorgeheizten Proben zu schnell aus den Proben entzieht, sodass keine Spanversuche mit Probentemperaturen von oberhalb  $150\ ^\circ\text{C}$  möglich sind.

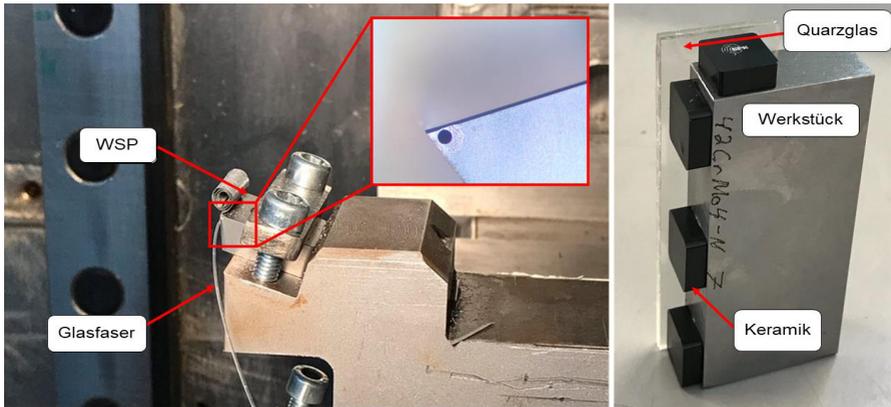


Abbildung 5-8: Werkzeug mit Wendeschneidplatte und Glasfaser (links), Materialprobe 42CrMo4 mit Keramik und Quarzglas zur Isolierung (rechts)

Der Messarbeitsplatz zur Aufzeichnung aller prozessrelevanter Daten ist in Abbildung 5-9 abgelichtet. Je Messsystem kommt ein eigener PC mit der zugehörigen Software zum Einsatz. Linksseitig ist der zum Wärmebildsystem zugehörige Laptop mit dem Standbild einer Zerspanungsaufnahme zu sehen. In der Mitte sind die Messsoftware und das Ergebnis einer vorangegangenen Messung zu sehen. Hinter der linken oberen Ecke des mittleren Bildschirms ist die Messkarte ersichtlich, die die Signale des Oberflächenpyrometers und der Lichtschranke nebst den Kraftmessungen in den PC einspeist. Auf der rechten Seite ist zum einen der Messbildschirm für die Kraftschriebe erkennbar, am rechten Rand sind zum anderen die drei zugehörigen Ladungsverstärker zu sehen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die abgebildeten Messungen auf den Systemen keine repräsentativen Aufnahmen darstellen. Die Bilder sind beim Einfahren des ganzen Messaufbaus entstanden, bei dem die Zerspanungsparameter und Proben Temperaturen noch nicht den eigentlichen Versuchsbedingungen entsprechen.



Abbildung 5-9: Messarbeitsplatz mit Laptop für Thermografieaufnahmen (links), Messrechner des Zwei-Farben-Pyrometers (Mitte) und Rechner zur Aufzeichnung der Kräfte (rechts)

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der optimalen Versuchsparmeter für die neue Prozesskette sieht einen zweistufigen Prozess vor. In einer ersten Versuchsreihe werden für die Spannungsdicke  $h = 37 \mu\text{m}$  eine Kurve der spezifischen Schnittkraft  $k_c$  über die Schnittgeschwindigkeit herausgefahren, um anhand des Schnittkraftverlaufs die Schnittgeschwindigkeit mit der geringsten Kraft für die Warmzerspannungsversuche auszuwählen. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass die Schnittkraft mit langsam steigender Schnittgeschwindigkeit zunächst hoch ist, aufgrund der durch den Schnitt in der Umformzone entstehenden Wärme wegen zunehmender Materialentfestigung abfällt, bis Reibungserscheinungen an den Schnitt- und Nebenflächen wieder zu einem Ansteigen der Schnittkraft führen. Diese Werte sind immer abhängig von den geometrischen Parametern der Schneide (vgl. Kapitel 4.4) und der Kombination von Spannungsdicke  $h$  und eingesetztem Werkstoff/Schneidstoff.

Die Kaltzerspannungsversuche werden mit weichgeglühten Proben aus 16MnCr5 und 42CrMo4 und den Schnittgeschwindigkeiten  $v_c$  von 7, 15, 30, 60, 80, 100, 120, 140,

160, 180 und 200 m/min mit jeweils 10 einzelnen Schnitten durchgeführt. Die Geschwindigkeiten sind bewusst recht nah beieinander gewählt, um einen möglichst detaillierten Verlauf der Kurve zu erhalten.

Bei den Warmzerspannungsversuchen ist das Vorgehen nahezu analog. Die Materialproben werden in einem Werkstatt-Wärmebehandlungs-ofen auf 350 °C erhitzt. Diese Temperatur wird gewählt, da ein Sicherheitsabstand zur Anlasstemperatur von 42CrMo4 gehalten werden soll. Weiterhin ist berücksichtigt, dass die Probe nach Entnahme aus dem Ofen und Montage in der Maschine bereits abkühlt und daher wurde eine höhere Temperatur als der Kalibrierungsbereich des Equipments gewählt. 42CrMo4 wird normalerweise bei ca. 560 - 680 °C bei der Ofen-Wärmebehandlung angelassen. Der Ofen ist für die Versuche örtlich neben der Maschine aufgestellt. In Abbildung 5-8, rechts sind die Isolationsmaterialien beispielhaft an der Probe angebracht. Im Versuch sind diese jedoch in der Probenaufnahme in der Maschine mit Hochtemperaturklebstoff befestigt. Die Proben werden mit einer Zange aus dem Ofen entnommen und in der Vorrichtung montiert. Nach der Montage werden die Schnittparameter eingestellt und nacheinander bei festen Parametern immer wieder Schnitte gefahren. Die Probe kühlt sich dabei laufend ab, was später zusammengefasst den Schnittkraftverlauf über die Temperatur bei festen Schnittdaten ergibt. Die Wahl der Schnittgeschwindigkeiten bei der Warmzerspannung kann nun in größeren Schritten erfolgen, da durch die Kaltzerspannung die korrespondierende Schnittkraftkurve bereits bekannt ist. Der schematische Ablauf der Versuchsdurchführung mit den entsprechenden Schnittgeschwindigkeiten ist in der folgenden Abbildung 5-10 dargestellt.

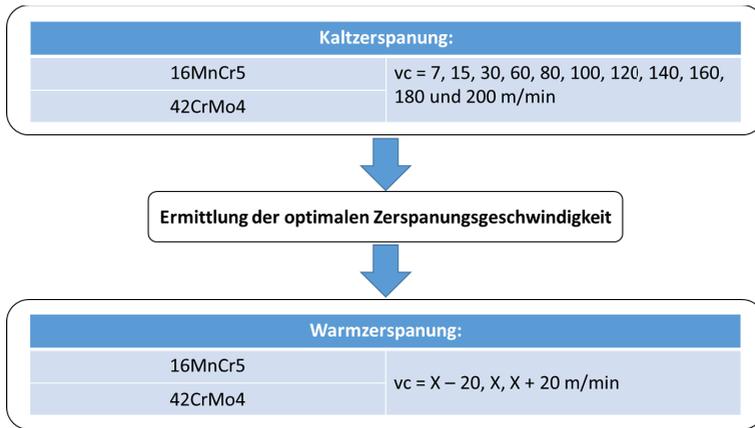


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung Versuchsdurchführung Zerspanungsversuche

## 5.4 Versuchsergebnisse

Zur Aufbereitung der Zerspanungsergebnisse werden die Kraftschriebe analysiert und ausgewertet. Den ersten Schritt stellt das Normieren der Hauptschnittkraft dar, wozu die Spanungsfläche bei den Versuchen berechnet wird. Bei einer Probenbreite von 15 mm, einer Spanungsdicke von 37  $\mu\text{m}$  und dem Spanwinkel von  $18^\circ$  beträgt die Spanungsfläche 1,104 mm<sup>2</sup>. Dies ist der Faktor, durch den die ermittelte Kraft für die Ermittlung der spezifischen Schnittkraft  $k_c$  dividiert werden muss. Insgesamt wurden zwischen 10 und 15 einzelne Schnitte pro Schnittgeschwindigkeit durchgeführt. Die normierten Kraftschriebe werden entsprechend pro Schnittgeschwindigkeit über eine Versuchsreihe gemittelt und in ein Diagramm eingetragen. Insgesamt werden für die Kaltzerspanungsuntersuchungen 165 einzelne Schnitte gemessen. Abbildung 5-11 stellt die normierten Kraftschriebe von 42CrMo4 auf der linken Seite und 16MnCr5 auf der rechten Seite bei einer Schnittgeschwindigkeit von 7 m/min dar. Bei dieser Schnittgeschwindigkeit wird auf die bereits erfolgten Äquivalenzversuche zurückgegriffen. Die gestrichelten Linien repräsentieren den Mittelwert der spezifischen Schnittkraft über die gesamte Versuchsreihe einer Schnittgeschwindigkeit. Bei beiden Kurven ist signifikant, dass zum Beginn der Schneideneintrittstoß als Überhöhung erkennbar ist. Nach Austritt

der Schneide und plötzlichem Abfallen der Kraft ist ein Nachschwingen der Zustellvorrichtung auf der Kraftmessplattform erkennbar. Dies wird anhand des hohen Eigengewichts des Aufbaus erklärt.

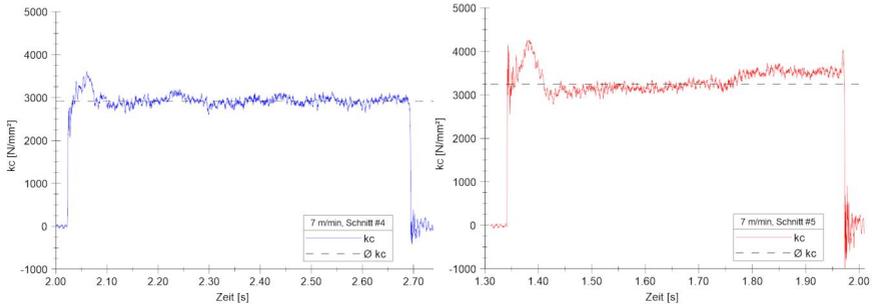


Abbildung 5-11: Spezifische Schnittkraft  $k_c$  bei 7 m/min von 42CrMo4 (links) und 16MnCr5 (rechts)

Bei näherer Betrachtung wird sichtbar, dass die Kräfte auf einem relativ ähnlichen Niveau um 3000 N/mm<sup>2</sup> liegen. Wider Erwarten ist die spezifische Schnittkraft von 42CrMo4 sogar geringer als die von 16MnCr5. Literaturwerte von 16MnCr5 und 34CrMo4 bei Spanungsdicken von  $h$  kleiner 0,1 mm bestätigen dieses Phänomen. Erst ab Werten für  $h$  größer 0,4 beginnt  $k_c$  einen für 42CrMo4 größeren Wert gegenüber 16MnCr5 anzunehmen. (Dietrich & Tschätsch, 2014)

Dieser Effekt wirkt sich positiv auf den Einsatz von 42CrMo4 als Schaltmuffenmaterial aus, da die Werkzeugbelastung bei den Geometriedaten der Räumnadel gegenüber 16MnCr5 sogar geringer ausfällt. Dieser Effekt lässt sich ebenfalls auf eine Schneidengeometrie für 42CrMo4 übertragen.

Der Effekt, dass 42CrMo4 geringere Werte der spezifischen Schnittkraft für  $h$  kleiner 0,1 mm gegenüber 16MnCr5 annimmt, lässt sich über den Schnittgeschwindigkeitsbereich von 7-130 m/min beobachten. Erst ab ca.  $v_c = 130$  m/min beginnt sich der Effekt wieder umzukehren. In Abbildung 5-12 sind die Kurven der spezifischen Schnittkraft  $k_c$  über die Schnittgeschwindigkeit als Ergebnis der Kaltzerspanungsversuche einzusehen.

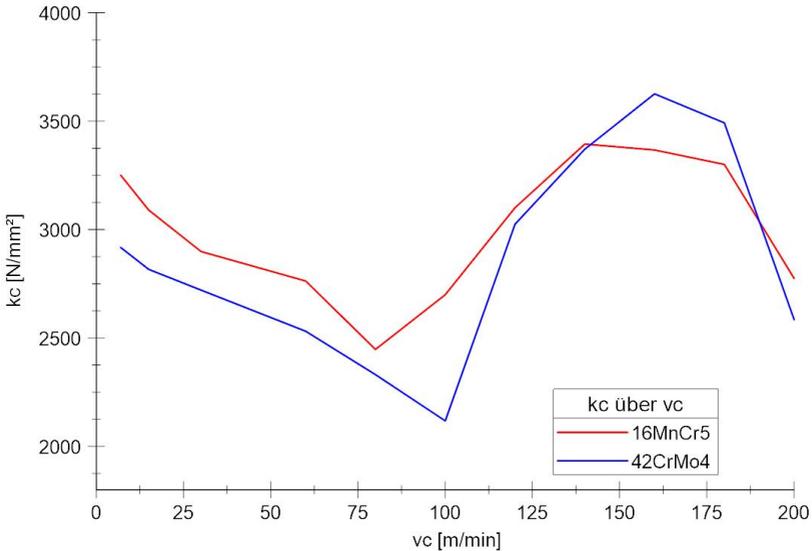


Abbildung 5-12: Spezifische Schnittkräfte von 16MnCr5 und 42CrMo4 über die Schnittgeschwindigkeit

Im Bereich von 7-75 m/min liegt  $k_c$  von 16MnCr5 nahezu konstant etwa 200 N/mm<sup>2</sup> über den Werten von 42CrMo4. Erst ab 75 m/min bis etwa 110 m/min steigt der Wert darüber hinaus. Das liegt an dem weiteren Abfallen des  $k_c$ -Wertes von 42CrMo4 bis etwa 100 m/min. Ab dieser Schnittgeschwindigkeit nähern sich die beiden Werte wieder einander an. Im Bereich von 110 m/min bis etwa 135 m/min liegen sie sogar auf einem sehr ähnlichen Niveau, bis der  $k_c$  Wert vom Einsatzstahl erstmalig unter den des Vergütungsstahls fällt. Die beiden Werte fallen von da an wieder etwa synchron ab, bis sie bei ca. 180 m/min rapide abfallen. Die Kurven beschreiben den zu erwartenden Verlauf des kontinuierlichen Abfallens und Wiederansteigens der Schnittkräfte, was bereits aus der Literatur bekannt ist. Das Wiederansteigen wird dadurch begründet, dass mit der weiter steigenden Umformgeschwindigkeit neben der materialverfestigenden Wirkung auch zunehmend Reibungskräfte ansteigen. Das rapide Abfallen der Schnittkräfte ab 175 m/min kann mit einem partiellen Ausbrechen der Schneide erklärt werden. Aufgrund der geringen Zustellung ist ein Ausbrechen der Schneide mit einer Reduktion der

Zustelltiefe gleichzusetzen, was das Abfallen der Kraftschriebe erklärt. Dieses Phänomen kann bei den Versuchsreihen bei 200 m/min Schnittgeschwindigkeit mehrfach beobachtet werden. Als Nachweis darüber werden vor und nach dem Versuch konfokale Aufnahmen der Oberflächentopografie mit dem Messgerät  $\mu$ surf der Firma nanofocus angefertigt. Abbildung 5-13 führt je eine Aufnahme vor (links) und nach (rechts) der Versuchsreihe mit dem Material 42CrMo4 bei einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 200$  m/min auf.

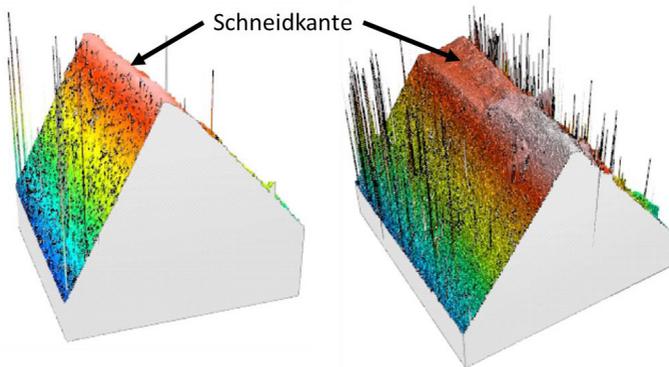


Abbildung 5-13: Konfokale Aufnahme der Schneidkante vor (links) und nach (rechts) Kaltzerspanungsversuchen mit  $v_c = 200$  m/min

Linksseitig ist der erodierte Zustand mit einem Schneidkantenradius von  $10\ \mu\text{m}$  sichtbar. Die Schneidkante ist gleichmäßig ausgeprägt. Auf der rechten Seite ist dieselbe WSP nach dem Versuch gezeigt. Etwa ab der Mitte ist ein deutlicher Ausbruch in Form einer Abflachung sichtbar. In dem der Seite zugewandtem Teil ist eine verschlissene Kante sichtbar. Der Schneidkantenradius ergibt einen Wert von  $52\ \mu\text{m}$  in diesem Bereich. Der Schnitt befindet sich also unterhalb der Mindestspannungsdicke und ist daraus resultierend mit einer abweichenden Schneidengeometrie erfolgt. Diese Beobachtungen bestärken die Annahme, dass ab dem Kraftabfall von oberhalb  $v_c = 175$  m/min die Werte nicht mehr repräsentativ sind und damit nicht in die Bewertung einfließen können. Der Verschleißeffekt setzt vermutlich oberhalb der Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 150$  m/min ein und nimmt mit wachsendem Verschleiß der Schneide zu.

Der Schnittgeschwindigkeitsbereich für die Warmzerspanungsversuche wird sich daher über die gesamte Spannweite von 7, 60 und 200 m/min für den Wert  $v_c$  ergeben. Im

Folgenden werden die Versuchsergebnisse für die Warmzerspannung dargestellt und analysiert.

### **Warmzerspannung**

Auf Ergebnisse der pyrometrischen Temperaturanalyse mit dem Zwei-Farben-Pyrometer kann nach ersten Versuchen leider nicht zurückgegriffen werden. Das Pyrometer ist bauartbedingt zwar in der Lage, Temperaturveränderungen im Bereich von mehreren Kilohertz zu erfassen, jedoch erst ab Temperaturen von über 250 °C. Bei den Vorversuchen lässt sich kein stabiler Wert während der Versuche ermitteln. Die Wärmeleitung bzw. die in die Wendeschneidplatte bei der Zerspanung eingebrachte Wärmeenergie ist nicht in der Lage, die Temperatur an der Messposition über diesen Wert zu steigern. Die thermografischen Aufnahmen bestätigen weiterhin, dass die Temperaturen in diesem Bereich nicht wesentlich von der Raumtemperatur abweichen. Es wird daher auf die Aufzeichnung der Temperaturwerte mittels dieser Messmethode verzichtet.

Bei der Warmzerspannung wird trotz des Fokus auf 42CrMo4 auch 16MnCr5 als Versuchsmaterial zerspannt. Die Vorgehensweise ist dabei bei beiden Materialien identisch. Auch in diesen Versuchen wird pro Schnittgeschwindigkeit eine neue Schneide in das Werkzeug eingesetzt. Im Gegensatz zur Kaltzerspannung ist die Vorgehensweise zeitkritischer. Ab Entnahme der Proben aus dem Ofen beginnen diese rapide an der Luft abzukühlen. Die Proben müssen mit einer Zange entnommen und in einem Vorgang in der mit Isolierungsmaterial versehenen Aufnahme montiert werden. Ab Montage in der Maschine ist es notwendig, die Versuchsreihe umgehend zu starten, da die Auskühlung der Proben relativ rasch geschieht. Die Abkühlung von 350 °C auf ca. 90 °C im Randbereich der Probe benötigt nur 5 Minuten, wobei die Abkühlkurve erwartungsgemäß am Anfang sehr steil verläuft und während des Verlaufs abflacht. In der folgenden Abbildung 5-14 wird beispielsweise ein einzelner Schnittverlauf von 42CrMo4 bei 7 m/min Schnittgeschwindigkeit dargestellt. Die Abbildung beinhaltet den Kraftschrieb der spezifischen Schnittkraft, die Proben temperatur während des Spannungsvorgangs und das korrespondierende Thermografiebild. Zu allen einzelnen Schnitten einer Versuchsreihe sind entsprechende Kraftschriebe und Thermografiebilder vorhanden.

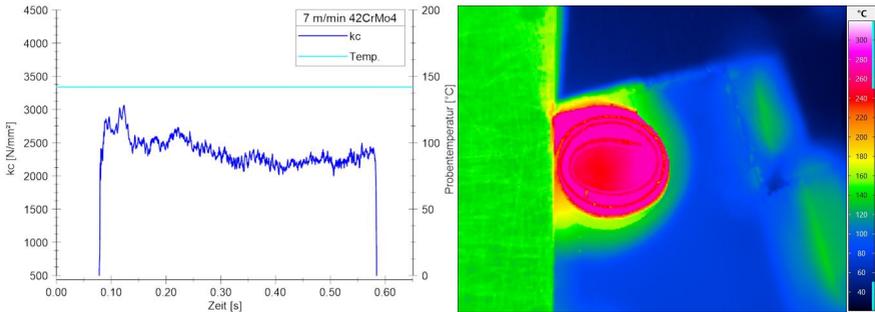


Abbildung 5-14: 42CrMo4  $v_c = 7$  m/min Kraftschrieb bei 141 °C Probestemperatur (links), Thermografieaufnahme (rechts)

Die Analyse der Kräfte und Temperaturen erfolgt parallel zu der Vorgehensweise bei der Kaltzerspanung. Nach Analyse und Aufbereitung der Rohdaten werden die Mittelwerte der Schnittkraft über einen Spannungsvorgang ermittelt und die Temperatur, bei der der Versuch abläuft. Die Datenaufbereitung erfolgt in der Analysesoftware Diadem Version 13 von National Instruments. Nach dem Einlesen wird der Kraftschrieb auf den relevanten Bereich beschnitten und per Funktion die Flanken des Kraftanstiegs und Abfalls gesucht. Der dadurch eruierte Bereich kann daraufhin zur Bildung des arithmetischen Mittels verwendet werden. Die Daten werden über die Versuchsreihen hinweg in ein Diagramm überführt und am Ende zusammengefasst dargestellt. Es kommt bei den Versuchsreihen vor, dass zu Beginn der Reihe einzelne Kraftschriebe der Zerspanungen nicht verwendet werden können, da die aufgezeichneten Daten keinen eigentlichen Spannungsvorgang, sondern nur überlagerte Schwingungen repräsentieren. Eine solche Aufzeichnung ergibt sich, wenn eine neue Probe in die Maschine eingespannt wird. Die Einspannung der vorgeheizten Probe muss sehr schnell erfolgen, da sie nach Entnahme aus dem Ofen bereits beginnt abzukühlen. Es kann daher nicht sichergestellt werden, dass jede neue Probe exakt auf die Nullebene ausgerichtet ist. Es werden daher etwa 1-2 Schnitte benötigt, bis sich die gleichmäßige Zustellung ergibt.

Die Wärmebild-Analyse erfolgt mittels der Software IRBIS 3 der Firma Infratec. Die Kamera zeichnet eine Sequenz als einzelne Bilder auf. Für die Analyse der Schnitte müssen alle Sequenzen nach dem Schnitt durchsucht und ein geeignetes Bild ausgewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der limitierten Aufzeichnungsrate der

Kamera die Spanne des Schnittbereichs mit steigender Schnittgeschwindigkeit kleiner wird. Während bei einer Schnittgeschwindigkeit von 7 m/min ein Schnitt noch aus ca. 40 Bildern besteht, sind bei einer Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min gerade einmal noch 3 Bilder in einer Sequenz vorhanden, die den Schnittvorgang visualisieren.

Das Ergebnis des spezifischen Schnittkraftverlaufs von 16MnCr5 bei  $v_c = 60$  m/min über die Temperatur ist in der nachfolgenden Abbildung 5-15 erkennbar. Charakteristisch für alle Versuchsreihen ist, dass der erste Schnitt mit einem sehr hohen Kraftwert geschieht. Dies liegt an der Gegebenheit, dass nach dem Einspannen der Probe direkt mit den Versuchen begonnen wird, ohne die Probe zunächst zu planen. Der rasche Temperaturverfall erfordert diese Vorgehensweise. Die Proben sind zwar alle vor der Bearbeitung auf exakt gleiche Abmaße in der Höhe und Breite geschliffen, jedoch kann beim Einspannen von keiner 100 %igen Wiederholgenauigkeit ausgegangen werden. Aufgrund der geringen Spannungsdicke von  $37 \mu\text{m}$  während der Versuche wirkt sich ein erster Schnitt mit einer erheblich größeren Tiefe von ca.  $100\text{-}150 \mu\text{m}$  entsprechend stark aus. Auch der zweite Schnitt ist oftmals noch nicht zu 100 % repräsentativ, da sich die charakteristischen Schnittbedingungen aufgrund des überhöhten ersten Schnitts zunächst einfahren müssen. Im Falle des dargestellten Verlaufs von  $k_c$  bei 60 m/min Schnittgeschwindigkeit konnten Daten zu Spannungsvorgängen im Bereich von  $270 \text{ }^\circ\text{C}$  bis knapp unter  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgezeichnet werden.

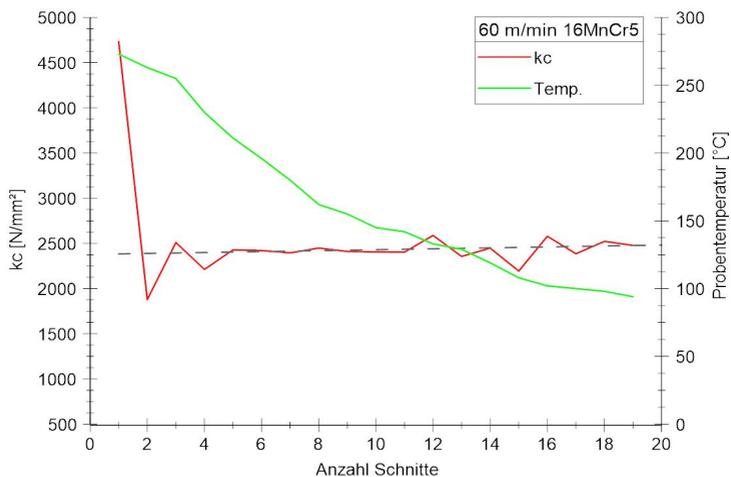


Abbildung 5-15: Spezifische Schnittkraft über Temperatur von 16MnCr5

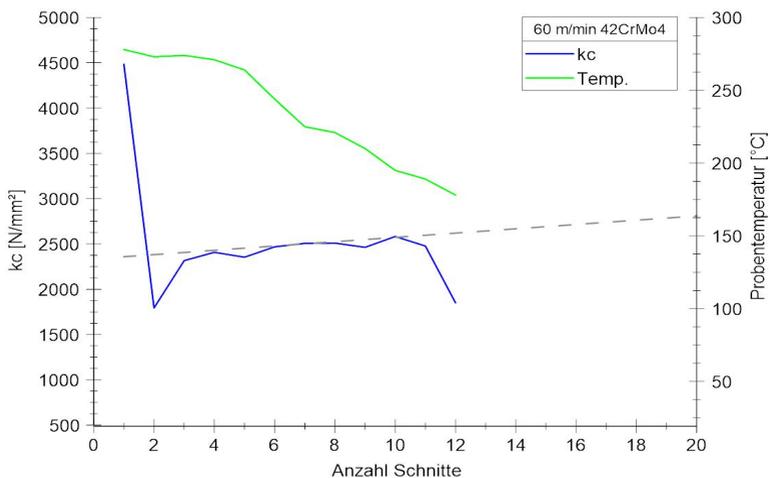


Abbildung 5-16: Spezifische Schnittkraft über Temperatur von 42CrMo4

Die Kurve in Abbildung 5-15 zeigt über den Verlauf von 19 Einzelschnitten einen approximierten leichten Anstieg der Schnittkraft. Beginnend bei ca. 2300 N/mm<sup>2</sup> steigen die Kräfte mit fallender Temperatur auf rund 2500 N/mm<sup>2</sup> an.

Abbildung 5-16 repräsentiert das entsprechende Schaubild für den Werkstoff 42CrMo4 bei ebenfalls  $v_c = 60$  m/min. Auch bei diesem Schaubild fällt der überhöhte erste Schnitt – gefolgt von einem „Einspielen“ des Schnittvorgangs – auf. Es sind in dieser Versuchsreihe aber nur Daten von 12 Schnitten aufgezeichnet worden. Bei Spannungsvorgang 12 ist ein rascher Abfall der Schnittkraft ersichtlich, was auf den Bruch der Schneide am Ende dieser Versuchsreihe zurückgeführt wird. Auch in diesem Schaubild ist eine approximierte Gerade der Schnittkräfte über den Temperaturverlauf eingezeichnet. Es ist deutlich erkennbar, dass im Fall des Vergütungsstahls die Steigung der Geraden größer ist. Beginnend bei etwa 2300 N/mm<sup>2</sup> steigt sie auf ca. 2650 N/mm<sup>2</sup> an. Die Darstellung dieser beiden Einzelergebnisse erfolgt aufgrund der Erkenntnisse bei der Kaltzerspannung über die Schnittgeschwindigkeit. Im Bereich um  $v_c = 60$  m/min hatten beide Materialien etwa ihren niedrigsten Wert der spezifischen Schnittkraft erreicht.

Als eines der Hauptergebnisse für die durchgeführten Versuchsreihen sind in Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 die jeweiligen Resultate von drei Schnittgeschwindigkeiten zusammen dargestellt.

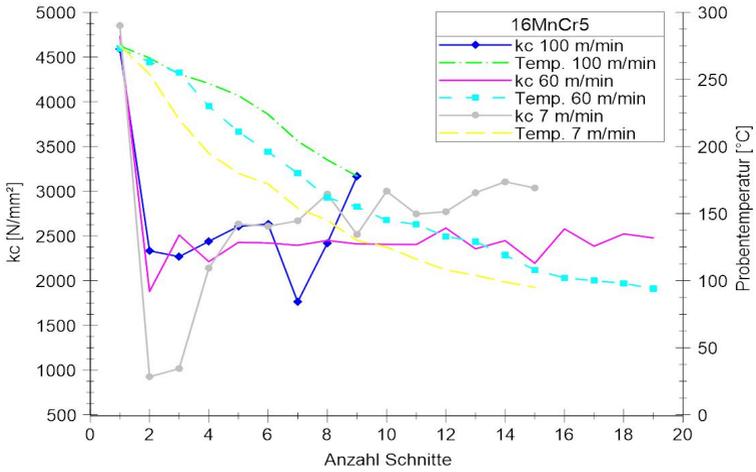


Abbildung 5-17: Spezifische Schnittkräfte 16MnCr5 bei  $v_c = 7, 60$  und  $100$  m/min über Temperatur

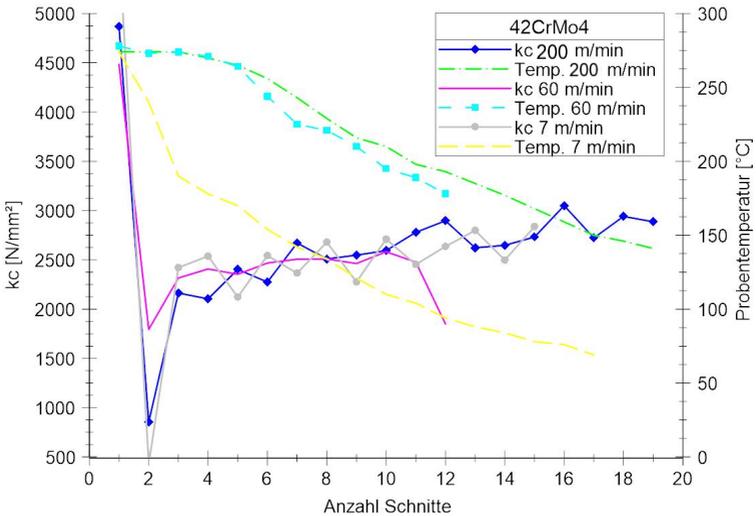


Abbildung 5-18: Spezifische Schnittkräfte 42CrMo4 bei  $v_c = 7, 60$  und  $200$  m/min über Temperatur

Die Versuchsreihe von 16MnCr5 konnte im Falle der Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min leider nicht verwendet werden. Durch einen Fehler bei der Aufzeichnung sind die Daten der Kraftschriebe nicht verwertbar. Ersatzweise wird daher auf die Daten bei  $v_c = 100$  m/min zurückgegriffen.

In beiden Diagrammen ist klar erkennbar, dass die Temperatur bei den Versuchsreihen unterschiedlich schnell fällt. Dies ist in den Varianten der Schnittgeschwindigkeiten zu ergründen. Bei langsamerer Fahrt des Schlittens ist die Dauer des Schnitts größer und die Probe hat mehr Zeit abzukühlen. Zusätzlich ist in Abbildung 5-18 erkennbar, dass die Temperaturkurve von 42CrMo4 bei einer Schnittgeschwindigkeit von 7m/min deutlich schneller abfällt als bei 16MnCr5. Die Reihe entstand ganz zu Beginn der Versuche, bei dem die Werkstückaufnahme der Maschine noch mit Raumtemperatur temperiert war. Mit steigender Anzahl an Versuchen hat sich diese erwärmt, was in einer langsameren Abkühlung der Proben resultierte. Bei 6 von 6 Reihen ist der erste Schnitt kräftemäßig überhört. 5 von 6 Reihen benötigen ein „Einspielen“ der Schnittbedingungen, bis die Reihe charakteristischen Verlauf aufzeigt. Da bei allen Kraftschrieben ein solcher Start der Reihe zum identischen Zeitpunkt beobachtet werden kann, wird dadurch die Erklärung der erhöhten Spannungsdicke nach dem Einspannen der Probe bekräftigt. Es ist bei allen Kraftschrieben der Reihen ersichtlich, dass sich die Temperatur positiv, also reduzierend, auf die Schnittkräfte auswirkt. Bei allen Kurven steigt die spezifische Schnittkraft mit sinkender Temperatur an. Bei 42CrMo4 ist der approximierter Verlauf bzw. die Steigung sogar nahezu identisch. Dies bedeutet entweder, dass sich das Kraftminimum, welches bei der Kaltzerspannung aufgetreten ist, in einen Bereich zwischen die untersuchten Schnittgeschwindigkeiten verschoben hat oder dass durch die Zuführung der Wärme das Ausbilden eines solchen Bereiches verhindert bzw. vermindert wird. Es müssten mehr Versuchsreihen mit feinen abgestuften Schnittgeschwindigkeiten gefahren werden, um diese Frage vollumfänglich zu beantworten. Im direkten Vergleich der Kurven fällt auf, dass sich der Effekt des Kraftanstiegs bei sinkender Geschwindigkeit bei 42CrMo4 stärker auszuwirken scheint. Der Verlauf der gemittelten Kurven ist minimal steiler als bei 16MnCr5, was auch in Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 erkennbar ist. Dieses Phänomen kann auf die höhere Festigkeit von 42CrMo4 gegenüber 16MnCr5 zurückgeführt werden. Daraus kann die Erkenntnis abgeleitet werden, dass die Warmzerspannung im vorliegenden Fall für den Einsatz eines Vergütungsstahls als Schalmuffenbasmaterial lohnenswert ist.

Abbildung 5-19 nutzt eine abweichende Darstellungsweise zur Verdeutlichung der Ergebnisse. Sie dient einer quantitativen Übersicht über die Versuchsreihe. Das Diagramm führt alle einzelnen Schnitte der Reihe 42CrMo4 bei  $v_c = 200$  m/min in einem Schaubild auf. Die Kurven sind geglättet, um diese Darstellungsart zu ermöglichen. Es gilt der korrespondierende Temperaturverlauf aus Abbildung 5-18. In dieser Darstellungsweise wird ebenfalls klar, dass das Kraftniveau mit sinkender Temperatur zunimmt.

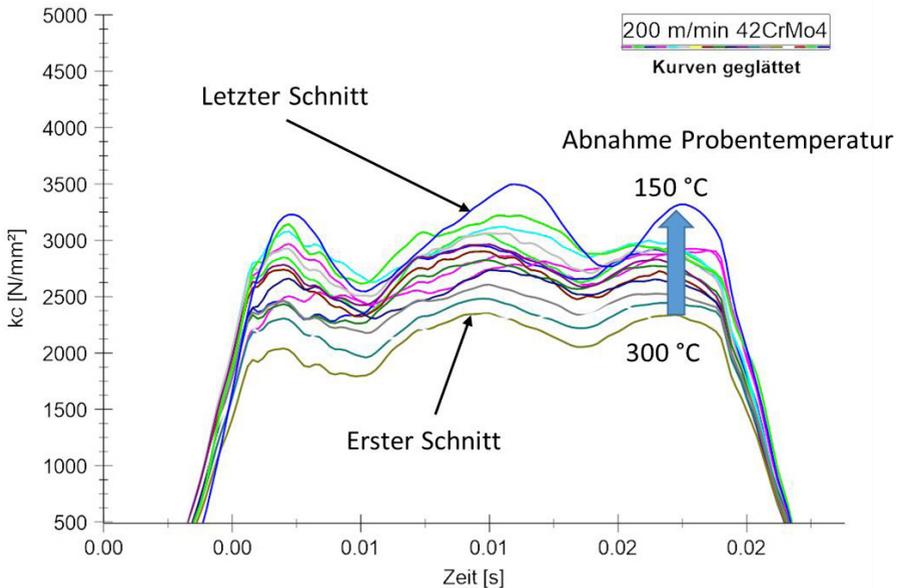


Abbildung 5-19: Spezifische Schnittkräfte von 42CrMo4 bei  $v_c = 200$  m/min bei unterschiedlichen Temperaturen.

Eines der Ziele dieser Untersuchung ist die Antwort auf die Frage, ob das Einbringen von Wärme in den Werkstoff zum Herabsetzen der Festigkeit des Basismaterials zur Herstellung von Getriebeschaltmuffen bei der Zerspanung führt. Die Frage kann klar mit einem positiven Ergebnis beantwortet werden. Die Versuche und die nachgeschaltete Analyse der Daten haben gezeigt, dass ein Einbringen von ca. 300 °C in einen Einsatz- und Vergütungsstahl die Zerspanung positiv beeinflusst. Beim Vergütungsstahl wirkt sich der Effekt sogar etwas stärker aus. Dieses Ergebnis war anzunehmen,

obwohl Untersuchungen in der Forschung oder Literatur sich meist auf hochfeste Materialien wie Nickelbasis- oder Titanlegierungen beschränken. Es war insbesondere unerforscht, wie stark sich der Effekt auswirkt und ob dieser sich auch bei einem relativ geringen Temperaturbereich von ca. 200 °C schon bemerkbar macht.

Die zweite große Aufgabe besteht in der Klärung der Frage nach einem möglichen gesteigerten Werkzeugverschleiß durch die eingebrachte Wärmeenergie in Folge von gesteigerter Temperatur der Zerspanung und somit einer höheren thermischen Last auf die Schneidkante. Die Frage soll nun durch die Betrachtung der Ergebnisse der Wärmebildaufnahmen untersucht werden.

Beginnend mit den Aufnahmen des Vergütungsstahls in Abbildung 5-20, Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 ist eine Momentaufnahme während der Zerspanung für die drei untersuchten Schnittgeschwindigkeiten nachfolgend aufgeführt. Die Bilder zeigen jeweils den ersten Schnitt der Versuchsreihe auf der linken Seite und den letzten Schnitt auf der rechten Seite. Auf der linken Seite eines jeden Bildes ist als Rechteck das Probenmaterial zu sehen. Je nach Ausgangstemperatur der Probe wird dies durch eine entsprechende Einfärbung des thermografischen Bildes sichtbar. Die Temperaturskala ist bei allen Bildern in gleicher Weise gewählt. Die Spanne reicht von 20 °C bis 320 °C. In den Bildern ist im mittleren, oberen Teil der Aufnahme die Schneide als blauer Keil erkennbar. Die Schneide formt den Span, der sich vor der Schneide aufbaut und je Spanbedingung unterschiedlich ausgeprägt ist. Beginnend mit den Aufnahmen für 42CrMo4 bei  $v_c = 7$  m/min ist beim ersten Schnitt eine Probenoberfläche von rund 250 °C zu sehen. Der Probenkörper ist in dunkelrot / orange abgebildet. Der sich bildende Span ist in Pink gefärbt, was für eine Temperatur von ca. 280 °C steht. Auf der rechten Seite im letzten Schnittbild ist ein regelmäßig ausgeprägter Span kurz vor Ende des Versuchs ausgeformt. Im direkten Vergleich der beiden Späne links und rechts im Bild fällt auf, dass der Span links viel breiter wirkt. Tatsächlich sieht die Spanbildung je Versuch aus, wie auf der rechten Seite erkennbar. Bei thermografischen Aufnahmen spielen Spiegelungen und Streuungen jedoch eine große Rolle. Je mehr Wärme sichtbar ist, desto mehr Streuung entsteht aus Sicht der Kamera. Das führt dazu, dass ein Span, der nur um die 50 µm dick ist, im Bild strahlt, als wäre dieser bedeutend dicker. Ein weiterer Grund für diese Erscheinung ist, dass bei den Aufnahmen mit 7 m/min Schnittgeschwindigkeit der Spannungsvorgang länger andauert als bei 60 und 100 m/min. Die Aufnahme entstand kurz vor Versuchsende, wohingegen die linke Aufnahme vom Versuchsanfang stammt. Der Span am Versuchsende hatte daher auch

schon mehr Zeit zum Abkühlen an der Luft. Bei den höheren Geschwindigkeiten lässt sich ein solches Verhalten nicht mehr erkennen und damit erklären. Der bedeutendste Punkt in den beiden Aufnahmen des Schnitts bei 7 m/min besteht jedoch darin, dass die höchste Temperatur am Span beim ersten Schnitt – also mit vorgeheizter Probe – gleich der dem letzten Schnitt mit abgekühlter Probe ist. Das pinke Farbniveau und damit die Temperatur vor oder an der Schneide ist beim vollständig ausgebildeten Span auf der rechten Seite ebenfalls sichtbar (grüne Pfeile).

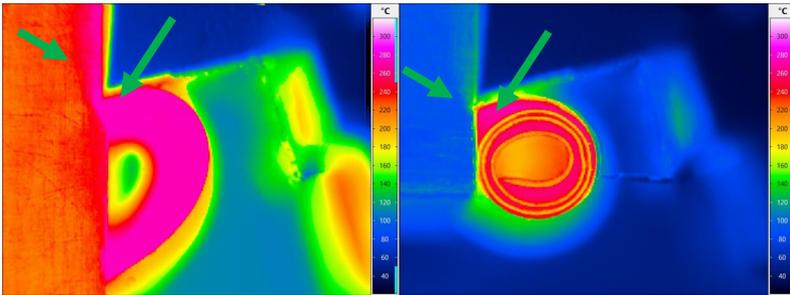


Abbildung 5-20: 42CrMo4 erster und letzter Schnitt  $v_c = 7$  m/min

Die folgenden Abbildungen zeigen die Aufnahmen für 60 und 200 m/min Schnittgeschwindigkeit. Abgesehen davon, dass die Proben temperaturen beim letzten Schnitt bei etwa 170 °C und 130 °C liegen, sind die Aufnahmen fast identisch. Es fällt jedoch auf, dass der Zerspannungsvorgang einen regelrechten Wärme-Schweif in der Oberfläche hinterlässt. Bei  $v_c = 60$  m/min ist dieser im rechten Bild eher rötlich diffus mit einer Konzentration im Bereich der Schneidkante, bei  $v_c = 200$  m/min (ebenfalls rechts) ist der Schweif nur noch gelblich diffus, die Konzentration der roten Zone ist jedoch weiterhin vorhanden (grüne Pfeile). Da die Kamera orthogonal auf die Probe ausgerichtet und die Schneide breiter als die Probe ist, kann hierbei ansatzweise das Phänomen der Spanbildung beobachtet werden. Die Schneide schiebt die Umformzone mit erhöhter Materialspannung durch das Material, welches im Spangrund aufgrund der Spannungsüberhöhung reißt und über die Spanfläche abrutscht und den Span ausbildet.

Dies geschieht in Form von erst elastischer, dann plastischer Deformation, welche durch die erzwungene Formänderung Energie in Form von Wärme erzeugt. Diese Wärme wird in den beiden Aufnahmen sichtbar. Bei der Schnittgeschwindigkeit von 7 m/min ist der Effekt ebenfalls beobachtbar in Form eines grünen (rechts) und pinkfarbenen (links) Schweifs. Das Phänomen ist jedoch rechts nicht so stark ausgeprägt, da

die erzeugte Wärme bei einem Schnitt im Vergleich zur Wärmekapazität der Probe relativ gering ausfällt. Das bedeutet, dass diese Energie bei kühlerer Probe schneller und umfassender absorbiert werden kann. Auf der linken Seite hat der Schweiß dieselbe Farbe und somit Temperatur wie der Span.

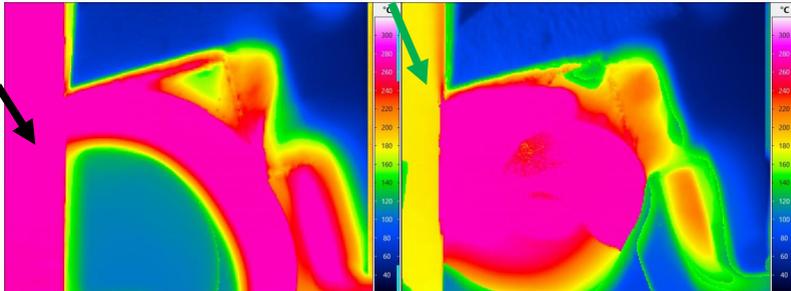


Abbildung 5-21: 42CrMo4 erster und letzter Schnitt  $v_c = 60$  m/min

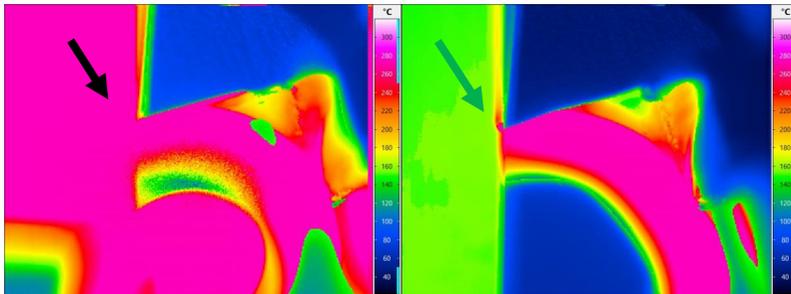


Abbildung 5-22: 42CrMo4 erster und letzter Schnitt  $v_c = 200$  m/min

Bei gemeinsamer Betrachtung der sechs Aufnahmen fällt auf, dass genau ein Farbniveau in allen Schnitten auftaucht. Es handelt sich um das pinkfarbene Niveau bei ca. 280 °C. Keiner der Versuche ruft ein höheres Niveau hervor und sowohl bei heißem als auch bei bereits abgekühltem Probenkörper kann diese Temperatur beobachtet werden. In den Bildern der heißen Proben wäre analog zu den kälteren Proben davon auszugehen, dass es ebenfalls einen Bereich um und hinter der Schneide gibt, welcher durch die Formänderungsenergie der Zerspanung in Form eines Schweißs mit Konzentration nahe der Schneidkante sichtbar wird. Dies kann jedoch nicht beobachtet werden.

Im nächsten Schritt werden diese Beobachtungen bei den korrespondierenden Aufnahmen des Einsatzstahls in Abbildung 5-23, Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 geprüft.

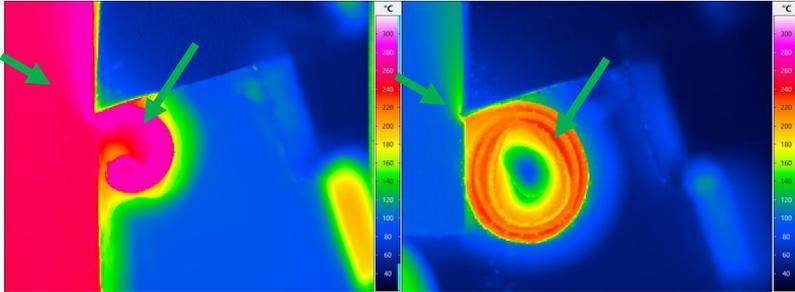
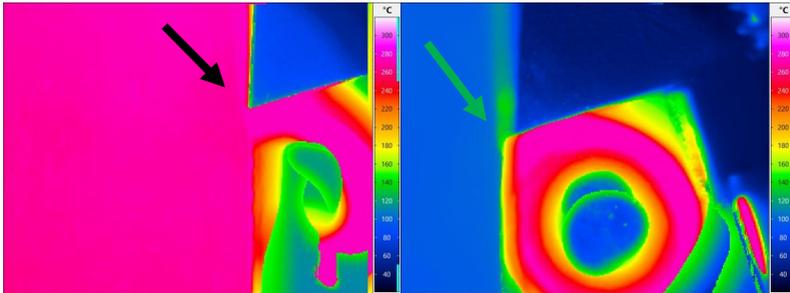
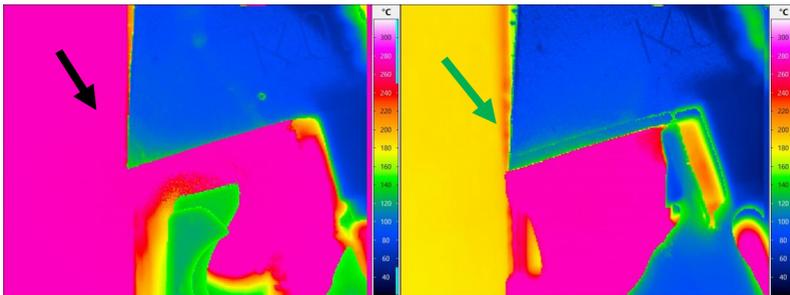


Abbildung 5-23: 16MnCr5 erster und letzter Schnitt  $v_c = 7$  m/min

Die thermografischen Bilder des Einsatzstahls unterscheiden sich kaum von den Bildern des Vergütungsstahls. Bei der Schnittgeschwindigkeit von 7 m/min ist wieder ein regelrecht ausgebildeter Span am Ende des Spanvorgangs beim letzten Schnitt sichtbar. Der Span ist etwas enger gerollt als bei dem 42rMo4 und es lässt sich kaum ein Ansatz des pinkfarbenen Temperaturniveaus erkennen. Der dunkelrote Bereich zwischen den Spanwindungen ist jedoch mit über 250 °C ersichtlich (grüner Pfeil). Die Probentemperatur beim ersten Schnitt liegt mit ca. 260 °C höher als beim entsprechenden Versuch bei 7 m/min Schnittgeschwindigkeit. Es ist aber der gleiche Schweiß in pink bei der heißen Probe und in grün bei der abgekühlten Probe zu sehen (grüne Pfeile). Auch bei den folgenden Schnittgeschwindigkeiten von 60 und 200 m/min sind exakt dieselben Beobachtungen feststellbar. In den kühleren Proben können die thermischen Einflüsse der Spanbildung beobachtet werden (grüne Pfeile) und die Temperaturen der heißen Proben steigen über kein Niveau höher als ca. 280 °C im pinkfarbenen Bereich (schwarze Pfeile).

Abbildung 5-24: 16MnCr5 erster und letzter Schnitt  $v_c = 60$  m/minAbbildung 5-25: 16MnCr5 erster und letzter Schnitt  $v_c = 200$  m/min

Beide Materialien weisen in Bezug auf die Warmzerspannung im überprüften Bereich exakt das gleiche Verhalten auf. Bei Temperaturen unter  $280\text{ °C}$  Probenoberfläche zeigt sich die von der Zerspanung ausgehende Wärme in der Probenoberfläche. Darüber hinaus ist kein höherer Temperaturbereich erkennbar. Ebenfalls bleiben die Span-temperaturen auf gleichem Temperaturniveau. Ist die Schnittgeschwindigkeit gering, kann etwas weniger Wärmestrahlung des Spans bei abgekühlter Probe beobachtet werden. Dieses Verhalten lässt sich jedoch auf die übrigen Schnittgeschwindigkeiten übertragen, wenn nach dem Schnitt noch um den gleichen Zeitbetrag abgewartet werden würde. Signifikant ist die Beobachtung, dass in den Versuchen keine Temperatur größer als  $280\text{ °C}$  erreicht werden kann, weder bei den Spänen noch bei den Proben, auch wenn diese auf Temperatur gebracht werden. Ein Vorwärmen von  $280\text{ °C}$  ruft daher gegenüber der Zerspanung bei Raumtemperatur keine Temperatursteigerung des Spans und auch keine erkennbare Steigerung der Temperatur nahe der Oberfläche

während der Zerspanung hervor. Es wird verhältnismäßig deutlich, dass die eingebrachte Energie in Form von Wärme das Niveau für die Zerspanung hebt, aber gleichzeitig keine weitere Temperaturerhöhung nach sich zieht, so als würde bei Raumtemperatur zerspannt werden.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die beobachtbare Wärmeenergie nahe des Spanbereichs in Form eines Schweißs mit Temperaturkonzentration nahe der Schneidkante zur Senkung der spezifischen Spankräfte beiträgt, wie es aus den Kraftschrieben hervorgeht. Da die Temperatur nie über den Bereich der 280 °C hinaus steigt, wird angenommen, dass die Schneide ebenfalls nicht stärker thermisch belastet wird als bei der Zerspanung bei Raumtemperatur. Dies muss jedoch durch weitere Versuche belegt werden.

Die zweite Hauptfrage der Untersuchung kann daher ebenfalls positiv beantwortet werden. Im Bereich der in dieser Arbeit untersuchten Parameter senkt die Vorwärmung des Basismaterials die Bearbeitungskräfte um rund 10-20 %. Die Temperaturvorwärmung wirkt sich dabei nicht sichtbar negativ auf die Zerspanungstemperaturen aus. Es ist daher davon auszugehen, dass die Schneide durch die Maßnahme der Vorwärmung nicht stärker verschlissen wird als bei Zerspanung bei Raumtemperatur. Durch den Abfall der Kräfte kann sogar davon ausgegangen werden, dass der Verschleiß noch durch die geringere Belastung sinkt.

In weiteren Untersuchungen sollte dies anhand von Dauerversuchen belegt werden, um die Auswirkung auf einen möglichen Serienprozess umfassend bewerten zu können. Weiterhin muss untersucht werden, wie sich Material und Zerspanung bei einer weiteren Erhöhung der Temperatur verhalten. Es wird vermutlich ein Maximum für die Temperatur geben, ab dem sich die Vorwärmung negativ auf die Haltbarkeit des Werkzeugs auswirkt.

Die Wärmebildausnahmen der einzelnen Schnitte bei den jeweiligen Schnittgeschwindigkeiten sind zur Übersicht im Anhang beigefügt.

Ist die maximal mögliche Temperatur gefunden, muss im nächsten Schritt der Verschleiß der Werkzeugschneide untersucht werden. In den Thermografieaufnahmen ist erkennbar, dass die Temperatur in der Umformzone nicht weiter mit der Proben temperatur ansteigt. Es könnte angenommen werden, dass dadurch kein zusätzlicher Verschleiß der Schneide entsteht. Es gibt aber noch weitere Faktoren wie z. B. thermochemische Prozesse, die bei der Zerspanung stattfinden. Der Einfluss dieser ist in den

Aufnahmen nicht erkennbar. Eine Versuchsreihe, die rein den Verschleiß adressiert, ist daher als „Proof of Concept“ unabdingbar für die Umsetzung einer angepassten Prozesskette. Diese Untersuchungen müssen in folgenden Arbeiten erfolgen.

## 5.5 Auswirkung auf Energie- und Kosteneffizienz

Bei der Zerspanung ist der Verschleiß der Werkzeughauptschneide ein die Standzeit wesentlich beeinflussender Faktor. Die Schneide bzw. deren Geometrie ist für die entsprechende Werkzeug-/Werkstoffpaarung optimiert. Ändern sich die geometrischen Verhältnisse an der Hauptschneide durch z. B. Ausbrüche oder eine übermäßige Schneidkantenverrundung, so hat dies direkt Auswirkungen auf den Zerspanungsprozess und die erreichte Qualität und Maßhaltigkeit des gefertigten Werkstücks.

Da die Aufbereitung des Werkzeuges insbesondere beim Räumen sehr aufwendig ist, wirkt sich dies direkt auf die Prozess- und Kosteneffizienz des Herstellungsprozesses aus. In den Diagrammen der Versuche für 16MnCr5, Abbildung 5-20 und 42CrMo4, Abbildung 5-21 ist ersichtlich, dass die spezifische Schnittkraft in beiden Diagrammen über die Versuchsreihe hinweg um ca.  $600 \text{ N/mm}^2$  abnimmt. Der betreffende Temperaturbereich liegt dabei immer beginnend bei  $280\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$  und endet bei ca.  $50\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Im Falle von 16MnCr5 verringert sich die Schnittkraft damit um  $19,36 \%$ , wohingegen bei 42CrMo4 eine Reduzierung von  $20,7 \%$  zu beobachten ist. Tabelle 5-1 fasst die aktualisierten Werte für Energie- und Werkzeugkosten zusammen. Bei der möglichen Einsparung im Bereich des Werkzeuges wird vom bestmöglichen Fall ausgegangen und die Senkung der Bearbeitungskräfte um  $20 \%$  direkt auf die Werkstückzahl umgerechnet, um lediglich einen Anhaltspunkt zu erhalten. Diese Korrelation muss jedoch in weiteren Versuchen belegt werden.

Tabelle 5-1: Übersicht Energie- und Kostendifferenz Kalt-/Warmzerspanung

Prozess	16MnCr5			42CrMo4		
	[Wh]	[Cent]	[Cent] Wkz.	[Wh]	[Cent]	[Cent] Wkz.
Weichräumen kalt	4,44	0,13	10,00	5,83	0,17	12,00
Weichräumen warm	3,56	0,10	8,00	4,67	0,14	9,60
Wärmebehandlung	198,33	1,27		53,61	1,55	
Hartbearbeitung	0,83	0,02	20,00			-
Strahlen	94,44	2,74		94,44	2,74	
<b>Summe Kalt</b>	<b>298,06</b>	<b>4,16</b>	<b>30,00</b>	<b>153,89</b>	<b>4,46</b>	<b>12,00</b>
<b>Summe Warm</b>	<b>297,17</b>	<b>4,14</b>	<b>28,00</b>	<b>152,72</b>	<b>4,43</b>	<b>9,60</b>
<b>Einsparung</b>	<b>0,89</b>	<b>0,03</b>	<b>2,00</b>	<b>1,17</b>	<b>0,03</b>	<b>2,40</b>

Wie zu erwarten, fällt die mögliche Einsparung im Bereich Weichräumen aufgrund der gesunkenen Bearbeitungskräfte mit 0,07 Cent bei 16MnCr5 und 0,09 Cent bei 42CrMo4 gering aus. Dennoch könnten durch eine Anpassung der Prozesskette diese Einsparung an Energie und den damit verbundenen Kosten erreicht werden. Das größte Potential möglicher Einsparung liegt daher wie bereits angenommen in der Reduzierung des Werkzeugverschleißes und damit der Standzeiterhöhung des Werkzeuges.

Die in Tabelle 5-1 aufgeführten Einsparungen für das Werkzeug müssen jedoch noch belegt werden. Die Auswirkung der gesenkten Bearbeitungskräfte auf den Verschleiß der Schneide ist von vielerlei Faktoren abhängig. Dabei spielen bei der erhöhten Materialtemperatur des Werkstücks geänderte Reibungsverhältnisse, chemische Prozesse etc. eine Rolle. Diese wirken sich in unvorhersehbarer Weise auf den Zerspanungsprozess aus. Es ist zwar erwiesen, dass hohe Bearbeitungstemperaturen an der Hauptschneide eines Schnellarbeitsstahl-Werkzeuges zu erhöhtem Verschleiß und früherem Versagen führen (Opitz, 1967), eine letztendliche Aussage über die expliziten Auswirkungen auf einen Prozess muss aber auf Basis von Untersuchungen getroffen werden. Der zu untersuchende Prozess muss dabei in jeglicher Hinsicht dem Serienprozess, der angepasst werden soll, entsprechen. Lediglich der Parameter „Temperatur des Werkstücks“ soll entsprechend erhöht und der Zerspanungsprozess frei untersucht werden. (Opitz, 1967)

Diese Vorgehensweise stellt einen sehr kostenintensiven Schritt dar. Äquivalenzversuche, wie sie in diesem Kapitel beschrieben werden, sind jedoch eine Möglichkeit, eine tendenzielle Aussage darüber zu treffen, ob eine Versuchsführung mit einem Serienprozess lohnenswert erscheint. Im vorliegenden Fall fällt die Senkung der Bearbeitungskraft bei 300 °C gegenüber der Bearbeitung bei Raumtemperatur mit 20 % erheblich aus. Die mögliche Reduktion der Werkzeugkosten und die damit erreichbare Steigerung der Werkstückzahl bei gleichzeitig effizienterer Ausnutzung der eingesetzten Energie rechtfertigen die Ausweitung der Untersuchungen im Prozess mit Serienparametern.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Untersuchung einer Fertigungsprozesskette zur Herstellung einer Getriebeschaltmuffe im Rahmen des Graduiertenkolleg 1483. Die Schaltmuffe kommt in einem manuellen Schaltgetriebe für PKW zum Einsatz und wird in der Serie aus dem Einsatzstahl 16MnCr5 hergestellt. Das Ziel der Arbeit ist die Analyse der gesamten Prozesskette in Bezug auf Energieflüsse und das Schaffen eines Ansatzes, wie diese aus energetischer Sicht verbessert werden kann.

Als Analyse der Prozesskette wird in der Arbeit auf sowohl theoretische Recherchen als auch Untersuchungen beim Industriepartner vor Ort zurückgegriffen. Die wesentlichen Prozesse bei der Fertigung der Schaltmuffe sind die Weichbearbeitung, die Wärmebehandlung und die Hartbearbeitung. Anschließend ist noch ein Strahlprozess angeschlossen, der die Bauteile reinigt. Die Wärmebehandlung als größten Energieverbraucher zu analysieren, ist die größte Herausforderung, da diese bei einem Einsatzstahl in großen Durchstoßöfen durchgeführt wird, welcher eine große Menge an einzelnen Energieflüssen, Parametern und zu berücksichtigenden Fragestellungen beinhaltet. Alternativ zum Einsatzstahl kann bei der Wärmebehandlung auch auf 42CrMo4, einen Vergütungsstahl, zurückgegriffen werden. Dieser kann durch seinen höheren Gehalt an Kohlenstoff einer induktiven Randschichthärtung unterzogen werden, was von der energetischen Effizienz dem Einsatzhärten weit überlegen ist. So entsteht bei der Analyse der vorhandenen Prozesskette gleichzeitig der Ansatz, das Bauteil alternativ aus Vergütungsstahl mit einer induktiven Härtung herzustellen.

Die Untersuchung der Energieflüsse wird daher auf zwei parallele Prozessketten für die beiden Stähle erweitert. Anhand der im industriellen Umfeld gesammelten Daten kann ein Modell des Durchstoßofens für die Einsatzhärtung modelliert und der Energiefluss für die Herstellung und Härtung einer Schaltmuffe bestimmt werden. Parallel wird dies für die übrigen Prozesse Räumen und Strahlen durchgeführt. Sofern keine Daten aus den Analysen vorliegen, wird auf Literaturwerte zurückgegriffen und diese anhand von Äquivalenzversuchen am Institut validiert. Das Ergebnis der energetischen Analyse der beiden Prozessketten liegt nach dem ersten Abschnitt der Arbeit vor. Die Untersuchungen ergeben, dass neben der reinen Betrachtung von Energie auch der Kostenaspekt mit in Betracht gezogen werden muss. Aufgrund der Kenntnis über die erforderlichen

Energiemengen zur Fertigung der Schalmuffe lässt sich kein weitreichender Ansatz zur Verbesserung der Energieeffizienz generieren.

Nach Einbeziehung der Kosten für Energie und Werkzeuge kann ein Ansatz zur Verbesserung der gesamten Prozesskette generiert werden. Es soll auf den Vergütungsstahl ausgewichen und die Prozesskette verkürzt werden. Darüber hinaus soll ein Teil der zur Wärmebehandlung eingebrachten Energie dazu genutzt werden, das Werkzeug vorzuheizen und dadurch eine Entfestigung des Materials zu erwirken, was sich wiederum reduzierend auf die Zerspanungskräfte und den Werkzeugverschleiß auswirken soll. Diese Idee zur Anpassung der Prozesskette wirft zwei neue Fragen auf: Wie hoch muss das Werkstück vorgeheizt werden, um einen positiven Effekt auf die Zerspanung hervorzurufen? Zieht diese Vorheizung eine um den Betrag der Vorheizung gesteigerte Temperatur in der Zerspanungszone im Material nach sich, was sich wiederum negativ auf die Standfestigkeit des Werkzeugs auswirkt?

Zur Beantwortung der Fragen werden daraufhin Untersuchungen der Materialien 16MnCr5 und 42CrMo4 durchgeführt. Die Materialien werden bei gleichen Bedingungen bei Raumtemperatur zerspannt und über mehrere Schnittgeschwindigkeiten ein charakteristisches Diagramm der spezifischen Schnittkraft über die Schnittgeschwindigkeit erstellt. Mittels dieses Diagramms kann ein Bereich abgeleitet werden, bei welcher Schnittgeschwindigkeit die Zerspanungskräfte am geringsten ausfallen und als Basis für Warmzerspannungsversuche dienen. Bei der Warmzerspannung werden Materialproben identischer Abmaße in einem Ofen vorgeheizt und in einer elektrischen Räummaschine zerspannt. Während der Untersuchungen erfolgt die Sammlung von Kraftschrieben der einzelnen Schnitte und die Anfertigung von Thermografieaufnahmen. Als Ergebnis liegen Daten zur Beantwortung der Fragestellung nach der notwendigen Vorheiztemperatur und die Antwort auf eine mögliche Temperaturerhöhung des gesamten Spanungsvorgangs und somit einer möglichen thermischen Schädigung der Schneide durch diese vor.

Das Ergebnis bekräftigt den Ansatz zur Anpassung der Prozesskette unter den Gesichtspunkten zur Energie- und Kosteneffizienz, da mittels Vorheizen des Bauteils die Zerspanungskräfte gesenkt und dadurch die Standzeiten der Werkzeuge und damit Kosten ebenfalls reduziert werden können.

## 6.2 Ausblick

Die Ergebnisse der Warmzerspannungsversuche haben gezeigt, dass der Einsatz von Wärmeenergie zur Entfestigung des Materials als lohnenswerter Ansatz gesehen werden kann. Die Bearbeitungskräfte können bei Temperaturen im Bereich 300 °C um ca. 400-600 N gesenkt werden. Dies entspricht einer prozentualen Senkung von ca. 15-20 %.

Der Warmzerspannungsansatz sollte daher weiterverfolgt werden. So sollten im nächsten Schritt explizite Standzeituntersuchungen des Werkzeugs durchgeführt werden. Der Werkzeugverschleiß ist ausschlaggebend dafür, wie viele Bauteile mit einem Werkzeug hergestellt werden können. Es gilt nun zu untersuchen, ob sich die Senkung der Bearbeitungskräfte auch in gleichem Maße auf die zu fertigende Werkstückanzahl überträgt und in welchem Maße thermo-chemische Prozesse die Bearbeitung beeinflussen.

Die Versuchsreihe sollte daher unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden, jedoch mit dem Fokus auf das Werkzeug und die Oberflächenqualität. Erst wenn die Warmzerspannung zu einem signifikanten Anstieg der möglichen Bearbeitungen bei gleichbleibender Oberflächenqualität führt, kann der Ansatz auf die Serie übertragen werden. Führt die Vorwärmung zu keiner weiteren Schädigung des Werkzeugs, sollte die Versuchsführung dahingehend geändert werden, dass nun Schaltmuffen unter Warmzerspannungs-Bedingungen bearbeitet werden. Als Versuchsmaschine und Werkzeug sollte dafür eine Räumzelle zum Einsatz kommen, die der Serienmaschine und dem Serienprozesswerkzeug möglichst entspricht. Als Werkstücke kommen vorge drehte Schaltmuffen-Rohlinge zum Einsatz, die vor der Bearbeitung im Ofen stufenweise in 50 °C-Schritten bis auf 300 °C erwärmt werden. Die vorgewärmten Schaltmuffen werden daraufhin in die Maschine auf eine Kraftmessplattform eingelegt und die Bearbeitung gestartet. Die Zerspannungsuntersuchungen sollten bei jedem Temperaturschritt mit einem nachgeschärften Räumwerkzeug durchgeführt werden.

Als Ergebnis sollen äquivalente Prozesswerte wie bei den Untersuchungen aus der vorliegenden Arbeit entstehen, aus denen vergleichbare Schaubilder und somit Ergebnisse abgeleitet werden können. Im Anschluss daran sollten wieder Standzeituntersuchungen nachgeschaltet und ausgewertet werden. Nach positiven Beobachtungen kann der Versuchsaufbau auf eine Serienanwendung übertragen werden.

## 7 Literaturverzeichnis

Studentische Arbeiten, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden und vom Autor angeleitet worden sind, stehen am Anfang dieses Verzeichnisses und sind mit einem vorangestellten "A" gekennzeichnet

- A\_Wille, C. (2015). Analyse des Energiebedarfs von Prozessketten zur Herstellung einer Schaltmuffe für manuelle PKW-Getriebe aus 16MnCr5 und 42CrMo4. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik Karlsruhe.
- Abele, E. & Eisele, C. (2010). *Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung: Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes eSimPro*. [http://www.ptw.tu-darmstadt.de/media/fachgebietptw/dokumente\\_3/forschung\\_4/aktuelle\\_projekte/up\\_1/esimpro\\_1/Abschlussbericht\\_eSimPro\\_FI-NAL\\_web.pdf](http://www.ptw.tu-darmstadt.de/media/fachgebietptw/dokumente_3/forschung_4/aktuelle_projekte/up_1/esimpro_1/Abschlussbericht_eSimPro_FI-NAL_web.pdf), [12.07.2017].
- Abele, E., Sielaff, T. & Holland, L. (2013). *Abschlussbericht EnergieMSP „Energiebedarfsoptimierte Motorspindel und angepasster elektrischer Antriebsstrang“ – BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/63635/>, [21.06.2017].
- ALDUCTO AG. (1999). *Induktionshärten: Die Wärmebehandlung mit Zukunft*. <http://www.alducto.ch/projekt/downloads/firmenbroschuere.pdf>. [20.05.2017]
- Baehr, H. D. & Kabelac, S. (2012). *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen* (15. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Springer Berlin Heidelberg.
- Bargel (Hrsg.). (2018). *Springer-Lehrbuch. Werkstoffkunde* (12. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
- Bejnoud, F. (2017). *Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe* (1. Aufl.). *Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Band 208*. Shaker Verlag Düren.
- Berns, H. & Theisen, W. (2008). *Eisenwerkstoffe: Stahl und Gusseisen* (4., bearb. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
- Blesl, M. & Kessler, A. (2013). *Energieeffizienz in der Industrie*. Springer Berlin Heidelberg.

- Braun, S. (2012). *Teilprojekt 5 / IfW: Energieverbrauchsbeeinflussung auf Prozess- und Verfahrensebene*. [http://www.ifw.uni-stuttgart.de/forschung/forscherguppe\\_1088/](http://www.ifw.uni-stuttgart.de/forschung/forscherguppe_1088/), [16.05.2018].
- Clausen, R. (1981). *Untersuchung zur Erfassung von Einflussgrößen bei Kugelstrahlen: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. Walter de Gruyter GmbH Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (September 2003). *DIN 8589-5:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen\_- Teil\_5: Räumen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe* (DIN 8589-5:2003-09). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2015). *DIN EN ISO 683-17:2015-02, Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle\_- Teil\_17: Wälzlagerstähle (ISO\_683-17:2014); Deutsche Fassung EN\_ISO\_683-17:2014* (DIN EN ISO 683-17:2015-02). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2018). *DIN EN ISO 683-2:2018-09, Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle\_- Teil\_2: Legierte Vergütungsstähle (ISO\_683-2:2016); Deutsche Fassung EN\_ISO\_683-2:2018* (DIN EN ISO 683-2:2018-09). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2020). *DIN 8580:2020-01, Fertigungsverfahren\_- Begriffe, Einteilung* (DIN 8580:2020-01). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1973). *DIN 1415-1:1973-09, Räumwerkzeuge; Einteilung, Benennungen, Bauarten* (DIN 1415-1:1973-09). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Oktober 1982). *DIN 6584:1982-10, Begriffe der Zerspanntechnik; Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen* (DIN DIN 6584:1982-10). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1985). *DIN 6580:1985-10, Begriffe der Zerspanntechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges* (DIN 6580:1985-10). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1989). *DIN 17022-3:1989-04, Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen; Verfahren der Wärmebehandlung; Einsatzhärten* (DIN 17022-3:1989-04). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Januar 1994a). *Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen* (DIN EN 10052:1994-01). Berlin. Beuth Verlag.

- Deutsches Institut für Normung e. V. (1994b). *DIN 17022-1:1994-10, Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen\_ - Verfahren der Wärmebehandlung\_ - Teil\_1: Härten, Bainitisieren, Anlassen und Vergüten von Bauteilen* (DIN 17022-1:1994-10). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Dietrich, J. & Tschätsch, H. (2014). *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung* (11., überarb. und erw. Aufl.). Springer Vieweg Wiesbaden.
- Dmytro, R. (2013). *Induktives Randschichthärten von Zahnrädern des Vergütungsstahls 42CrMo4 mittels Wasser-Luft-Spraykühlung* [Dissertation]. Gottfried-Wilhelm-Leibniz Universität, Hannover.
- EnergieAgentur.NRW. (2005). *Energieeffizienz in Unternehmen: Ein Leitfaden der Energieagentur NRW für Entscheider und Energieverantwortliche*. EnergieAgentur.NRW. [http://www.klimastiftung-thueringen.de/fileadmin/media/Tagung/FT\\_2013-07-04/Gruendig\\_\\_Energieeffizienz\\_2006.pdf](http://www.klimastiftung-thueringen.de/fileadmin/media/Tagung/FT_2013-07-04/Gruendig__Energieeffizienz_2006.pdf), [02.05.2017].
- Fiedler, A. (2013). *Einfluss des Werkstoffzustandes auf das Wärmebehandlungsergebnis beim induktiven Randschichthärten*. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2012.
- Fleischer, J., Pabst, R. & Kelemen, S. (2007). Heat Flow Simulation for Dry Machining of Power Train Castings. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 117–122.
- Fritz, A. H. & Schulze, G. (Hrsg.). (2015). *Springer-Lehrbuch. Fertigungstechnik*. Springer Berlin Heidelberg.
- Giancoli, D. C. (2009). *Physik: Lehr- und Übungsbuch* (3. Aufl.). Pearson Studium - Physik. Pearson Studium München.
- Gramberg, U. (1978). *Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln. Ein Handbuch über Strahltechnik und Strahlanlagen. Von J. Horowitz. 1976, Forster Verlag AG, Zürich* (Bd. 29). Vulkan-Verlag Essen.
- Grosch, J. (2016). *Einsatzhärten: Grundlagen, Verfahren, Anwendung : Eigenschaften einsatzgehärteter Gefüge und Bauteile : mit 8 Tabellen* (4. Aufl.). Kontakt & Studium: Bd. 356. expert-Verl. Renningen.
- Herziger, G., Loosen, P., Backes, G. (1993). *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung: Grundlagen, Systeme, Verfahren*. C. Hanser München.
- Kalhöfer, E. & Kress, J. (2013). *Wege zu höherer Energieeffizienz in der Zerspaltung*. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/wege-zu-hoeherer-energieeffizienz-in-der-zerspaltung-a-425515/>, [10.07.2018].

- Karsten, S. (2010). *Energieeffizienter Neubau.: Von Komfortgewinn und geringen Betriebskosten*. EnergieAgentur.NRW. <https://broschueren.nordrheinwestfalendirekt.de/broschuerenservice/pageflip/energieagentur/energieeffizienter-neubau-von-komfortgewinn-und-geringen-betriebskosten/1189>, [12.07.2018].
- Kegel, K. (1961). *Die Praxis der induktiven Warmbehandlung*. Springer Berlin Heidelberg.
- Kerspe, J. H. (2000). *Aufgaben und Verfahren der Oberflächenbehandlung: Neuere Entwicklungen in der Oberflächentechnik. Kontakt & Studium: Bd. 588*. expert-Verl. Renningen.
- Klocke, F., Brinksmeier, E. & Weinert, K. (2005). Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(2), 22–45.
- Klocke, F. & König, W. (2008). *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren* (8. Aufl.). *VDI-Buch*. Springer Berlin Heidelberg.
- Klocke, F. & Bergs, T. (Hrsg.) (1999). *Laserunterstütztes Hartdrehen von Bauteilen aus Siliziumnitridkeramik. Werkstoffe für die Fertigungstechnik / Symposium 5. Werkstoffe für den Maschinenbau / Symposium 6 / Klocke, F [u.a.] Hrsg. - Werkstoffwoche*. Wiley-VCH. RWTH-CONV-176702
- Kohtz, D. (1994). *Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe: Grundlagen und Verfahren*. *VDI-Buch*. Springer Berlin Heidelberg.
- König, W., Essel, K. & Witte, L. (1982;). *Specific cutting force data for metal-cutting*. Düsseldorf.
- König, W. & Zaboklicki, K. (Hrsg.). (1994). *Laser Assisted Net shape Engineering: Bd. 1. Laser-assisted hot machining processes technological potentials*. Meisenbachverlag Bamberg.
- König, W. & Klocke, F. (1997). Materialbearbeitung mit Hochleistungslasern (LBM). In W. König & F. Klocke (Hrsg.), *Fertigungsverfahren 3* (S. 153–207). Springer Berlin Heidelberg.
- Kühn, K. D. (2010). *Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden: In. Fritz, A.H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. 9. Auflage*. Springer Berlin Heidelberg.
- Kuttkat, B. (2012). *Energieeffiziente Gebäudetechnik nutzt natürliche Ressourcen*. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/energieeffiziente-gebaeudetechnik-nutzt-natuerliche-ressourcen-a-359940/> , [08.07.2018].

- Läpple, V. (2014). *Wärmebehandlung des Stahls: Grundlagen, Verfahren und Werkstoffe* (11. Aufl.). *Bibliothek des technischen Wissens*. Verlag Europa Lehrmittel Haan.
- Liedtke, D. (2008). *Einsatzhärten: Merkblatt 452* (W. Stahl, Hg.). Wirtschaftsvereinigung Stahl Düsseldorf.
- Liedtke, D. (2009). *Wärmebehandlung von Stahl - Randschichthärten: Merkblatt 236*. Stahl-Informations-Zentrum Düsseldorf.
- Loosen, P., Treusch, H.-G., Haas, C. R., Gardenier, U., Weck, M., Sinnhoff, V., Kasperowski, S. & vor dem Esche, R. (1995). High-power diode lasers and their direct industrial applications. In K. J. Linden & P. R. Akkapeddi (Hrsg.), *SPIE Proceedings, Laser Diodes and Applications* (S. 78). SPIE.
- Macherauch, E. & Zoch, H.-W. (2014). *Praktikum in Werkstoffkunde: 95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik* (12., überarb u. erw. Aufl. 2014). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Mayer, F. (2014). *Werkzeugmaschinen produzieren effizienter: Forscher reduzieren den Energieverbrauch moderner Bearbeitungszentren*. FIZ Karlsruhe - Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH. [http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2014/Projekt\\_03-2014/ProjektInfo\\_0314\\_internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2014/Projekt_03-2014/ProjektInfo_0314_internetx.pdf), [23.7.2018].
- Meier, H. (2018). *Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette Weichbearbeitung - Wärmebehandlung - Hartbearbeitung* (1. Aufl.). *Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Bd. 215*. Shaker Düren.
- Melsa, P. (2012). Abschlussarbeit. Harträumen von einsatzgehärtetem 20MnCr5. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik Karlsruhe.
- Müller, E., Engelmann, J., Löffler, T. & Strauch, J. (2009). *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Springer Berlin Heidelberg.
- Neugebauer, R [Reimund], Westkämpfer, E., Klocke, F., Kuhn, A., Schenk, M., Michaelis, A., Spath, D. & Weidner, E. (2008). *Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion. Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Chemnitz*. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb09/59008982X.pdf>, [25.07.2018].

- Neugebauer, R [R.]. (2012). *Werkzeugmaschinen: Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. VDI-Buch. Springer Berlin.
- Opitz, H. (1967). *Untersuchung der Verschleißreaktionen bei der Bearbeitung von Stahl mit Schnellarbeitsstahlwerkzeugen*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. VS Verlag für Sozialwissenschaften Wiesbaden.
- Paucksch, E., Holsten, S., Linß, M. & Tikal, F. (2008). *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen* (12. Aufl.). Studium. Vieweg+Teubner Wiesbaden.
- Pehnt, M. (Hrsg.). (2010). *Energieeffizienz: Ein Lehr- und Handbuch* (1. korrigierter Nachdruck). Springer Berlin Heidelberg.
- Plaul, H. U., Grimm, W. & Chatterjee-Fischer, R. (1979-94). Wärmebehandlung von Stählen. In G. Spur & T. Stöferle (Hrsg.), *Handbuch der Fertigungstechnik* (S. 715–921). Hanser München.
- Rodman, D. (2013). *Induktives Randschichthärten von Zahnrädern des Vergütungsstahls 42CrMo4 mittels Wasser-Luft-Spraykühlung*. Berichte aus dem IW: Bd. 2013,9. PZH-Verl. Garbsen.
- Schulze, V., Meier, H., Strauss, T. & Gibmeier, J. (2012). High Speed Broaching of Case Hardening Steel SAE 5120. *Procedia CIRP*, 1, 431–436.
- Schürmann, H. (2012). *Werkzeugmaschinen offenbaren Stromsparerpotenzial*. <http://www.ingenieur.de/Themen/Werkzeuge-Maschinen/Werkzeugmaschinen-offenbaren-Stromsparerpotenzial>, [02.07.2018].
- Scholtes, B. & Vöhringer, O. (1989). Grundlagen der mechanischen Oberflächenbehandlung. In E. Broszeit (Hrsg.), *Mechanische Oberflächenbehandlung: Festwalzen - Kugelstrahlen - Sonderverfahren* (S. 3–20). DGM-Informationsgesellschaft Oberursel.
- Spur, G. (2014). *Handbuch der Fertigungstechnik* (2. Aufl.). Ed. *Handbuch der Fertigungstechnik*. Hanser München.
- Starck, A. von, Mühlbauer, A. & Kramer, C. (2005). *Handbook of thermoprocessing technologies: Fundamentals, processes, components, safety / Axel von Starck, Alfred Mühlbauer, Carl Kramer (ed.)*. Vulkan-Verlag Essen.
- Thomas, T. (1995). *Laser-Assisted Machining (LAM) processes and their industrial developments* (Abschlußbericht des Brite/EuRam Projekts 1995).

- Tian, Y. & Shin, Y. C. (2006). Thermal Modeling for Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics With Complex Features. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*(128), 425–434.
- Tönshoff, H. K. & Denkena, B. (2011). *Spanen: Grundlagen* (3. Aufl.). *Engineering online library*. Springer Berlin Heidelberg.
- Verein Deutscher Ingenieure. (2006). *VDI-Wärmeatlas: [Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübertragung]* (10., bearbeitete und erw. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
- Warnecke, G. (1974). *Fertigungstechnische Berichte: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen*. Resch Gräfelfing.
- Wohlfahrt, H. (1989). *Kugelstrahlen*. DGM Informationsges. Verlag Oberursel.
- Zaboklicki, A. K. (1998). *Laserunterstütztes Drehen von dichtgesinterter Siliciumnitrid-Keramik*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1997. *Berichte aus der Produktionstechnik: Bd. 98, 16*. Shaker Verlag Düren.

## 8 Anhang

Die in diesem Kapitel aufgeführten Berechnungen entstanden zum Teil unter Anleitung in einer Abschlussarbeit (C. Wille 2015).

### A1 – Berechnung der Wandverluste

Der VDI-Wärmeatlas Abschnitt Fa2 dient als Basis zur Berechnung des konvektiven Wärmestroms für frei umströmbare Flächen. (VDI 2006).

Die Stoffwerte von Luft bei einer Temperatur in der Wärmeübergangszone bei 40 °C und 1 bar Umgebungsdruck ((Verein Deutscher Ingenieure, 2006), Dbb2):

---


$$\lambda_L = 0,027 \text{ W/mK} ; \nu_L = 172,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} ; Pr = 0,71 \quad \text{Formel A-1}$$


---

Mit Luft als idealem Gas kann der Wärmeausdehnungskoeffizient des Trägerfluids berechnet werden:

---


$$\beta = \frac{1}{T_U} = \frac{1}{293 \text{ K}} = 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K} \quad \text{Formel A-2}$$


---

Die Ofenaußenwand mit  $l_{An} = h = 2,6 \text{ m}$  dient als Anströmlänge. Daraus folgt die Berechnung der Grashof-Zahl in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz:

---


$$Gr = \frac{g l^3 \beta (\vartheta_A - \vartheta_U)}{\nu^2} = 20,99 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{K}} (\vartheta_A - \vartheta_U) \quad \text{Formel A-3}$$


---

Die Raleigh-Zahl basiert auf  $Ra = Gr \cdot Pr$ . Mittels Einfluss der Prandtl-Zahl:

---


$$f_1(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} = 0,348 \quad \text{Formel A-4}$$


---

Die Nusselt-Zahl ergibt sich zu:

---


$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 \left[ 5,2 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{K}} (\vartheta_A - \vartheta_U) \right]^{1/6} \right\}^2 \quad \text{Formel A-5}$$


---

Der Wärmeübergangskoeffizient zu:

---


$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{l_{An}} = 0,0135 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \left\{ 0,825 + 0,387 \left[ 5,2 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{K}} (\vartheta_A - \vartheta_U) \right]^{1/6} \right\}^2 \quad \text{Formel A-6}$$


---

Wärmestrom durch konvektiven Wärmeübergang von Ofenwand an Umgebung:

---


$$\dot{q}_V = \alpha (\vartheta_A - \vartheta_U)$$

$$\dot{q}_V = 0,0135 \left\{ 0,825 + 0,387 \left[ 5,2 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{K}} (\vartheta_A - \vartheta_U) \right]^{1/6} \right\}^2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (\vartheta_A - \vartheta_U) \quad \text{Formel A-7}$$


---

Der Wärmestrom mittels Wärmeleitung durch die Ofenwand entspricht im stationären Fall dem Wärmestrom durch Konvektion in die Umgebung (VDI 2006, Ea1 & Fa2):

$$\dot{q}_V = \dot{q}_V = \frac{(\vartheta_I - \vartheta_A)}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} = \alpha(\vartheta_A - \vartheta_U) \quad \text{Formel A-8}$$

Nach Einsetzen der bekannten Größen folgt:

$$0,375 (885 - \vartheta_A) = 0,0135 \{0,825 + 0,387 [5,2 \cdot 10^8 (\vartheta_A - 20)]^{1/6}\}^2 \cdot (\vartheta_A - 20) \quad \text{Formel A-9}$$

Die Gleichung liefert als Lösung die Außenwandtemperatur zu  $\vartheta_A = 68 \text{ °C}$ . Damit lässt sich der flächenspezifische Wärmeverluststrom angeben zu:

$$\dot{q}_V = 0,375 \frac{W}{m^2 K} (885 \text{ °C} - 68 \text{ °C}) = 306,4 \frac{W}{m^2} \quad \text{Formel A-10}$$

Mit der Oberfläche der Ofenwände  $A = 99 \text{ m}^2$  beträgt der Verlustwärmestrom  $\dot{Q}_V = \dot{q}_V A = 30 \text{ kW}$ .

## A2 – Wärmeübergangskoeffizient beim Chargieren

Stoffwerte von Luft bei einer mittleren Temperatur in der Wärmeübergangszone von  $450 \text{ °C}$  und  $1 \text{ bar}$  Umgebungsdruck ((Verein Deutscher Ingenieure, 2006), Db2):

$$\lambda_L = 0,053 \text{ W/mK} ; \nu_L = 725,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} ; Pr = 0,71 \quad \text{Formel A-11}$$

Mit Luft als idealem Gas lässt sich der Wärmeausdehnungskoeffizient des übertragenden Fluids folgendermaßen berechnen:

$$\beta = \frac{1}{T_U} = \frac{1}{293 \text{ K}} = 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K} \quad \text{Formel A-12}$$

Die Anströmlänge entspricht der Höhe der Chargierungsöffnung  $l_{An} = h = 1 \text{ m}$ . Mit diesen Angaben lässt die Grashof-Zahl in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz angeben zu:

$$Gr = \frac{g l^3 \beta (\vartheta_A - \vartheta_U)}{\nu^2} = 5,5 \cdot 10^9 \quad \text{Formel A-13}$$

Die Raleigh-Zahl entspricht  $Ra = Gr \cdot Pr$ . Für die weitere Berechnung muss nun der Einfluss der Prandtl-Zahl bestimmt werden:

$$f_1(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} = 0,348 \quad \text{Formel A-14}$$

Damit ergibt sich die Nusselt-Zahl zu:

$$Nu = \{0,825 + 0,387 [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6}\}^2 = 259,6 \quad \text{Formel A-15}$$

Und der Wärmeübergangskoeffizient zu:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{l_{An}} = 13,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Formel A-16

## A3 – Wärmekapazität

### A3.1 Formel

Ableitung nach Verlauf der Wärmekapazität niedriglegierter Stähle (Macherauch & Löhe 1987, S. 596):

$$c_p(T) = 0,46 \frac{J}{gK} + 1,95 \cdot 10^{-4} \frac{J}{gK^2} (T - 273 \text{ K}) \quad T = 273 \text{ K} \dots 1042 \text{ K}$$

$$c_p(T) = 0,71 \frac{J}{gK} \quad T = 1042 \text{ K} \dots 1273 \text{ K}$$

Formel A-17

### A3.2 Integration

$$Q = m \int_{T_0}^{T_A} c_p(T) dT$$

$$Q = m \left[ 0,41 \frac{J}{gK} (T_C - T_0) + 9,75 \cdot 10^{-5} \frac{J}{gK^2} (T_C^2 - T_0^2) + 0,71 \frac{J}{gK} (T_A - T_C) \right]$$

Formel A-18

$T_0$  = Ausgangstemperatur

$T_A$  = Austenitisierungstemperatur

$T_C$  = Curietemperatur (1042 K)

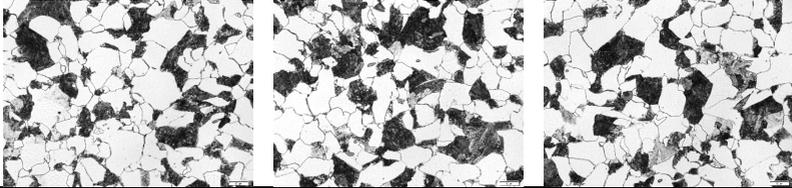
**A4 – Schliffbilder**

Abbildung A4-1: 16MnCr5 aus industriellem Umfeld normalisiert 142 HV20, 8s Nital geätzt, Mitte, 1000x

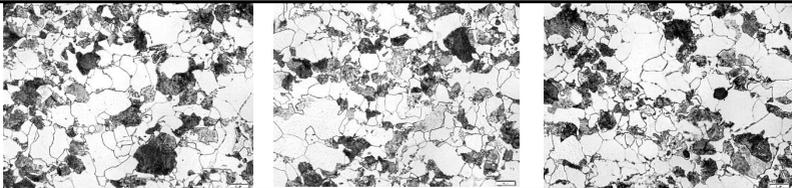


Abbildung A4-2: 16MnCr5 selbst normalisiert 146 HV20, 8s Nital geätzt, Mitte, 1000x

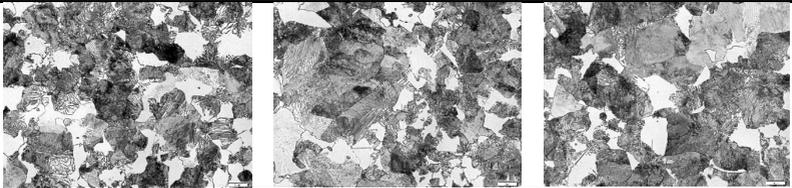


Abbildung A4-3: 42CrMo4 selbst normalisiert 183 HV20, 8s Nital geätzt, Mitte, 1000x

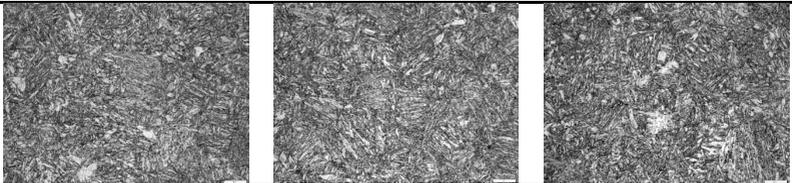


Abbildung A4-4: 42CrMo4 vergütet 340 HV30, 8s Nital geätzt, Mitte, 1000x

## A5 – Chemische Analyse Weichraumproben

### A5.1 Probe A 16MnCr5

Datum: 05.10.2015

#### Zeugnis nach DIN 50049 / 3.1B

Analysenergebnisse O B L F - Spektrometer  
=====

Prüfdatum : 05.10.2015  
Proben-Nr.: 2894 *A 16MnCr5*

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Cr	Ni	Mo
0.176	0.138	1.258	0.013	0.032	<0.001	0.167	1.00	0.099	0.05
Ti	Al	Sn	Co	Ta	V	Nb	B	W	
0.002	0.029	0.012	0.03	0.01	0.003	0.002	0.0001	0.02	

Abbildung A5-1: Chemische Analyse einer Weichraumprobe aus 16MnCr  
(Charge Schwarz im Lager Ehrenhof)

### A5.2 Probe B 42CrMo4

Datum: 05.10.2015

#### Zeugnis nach DIN 50049 / 3.1B

Analysenergebnisse O B L F - Spektrometer  
=====

Prüfdatum : 05.10.2015  
Proben-Nr.: 2895 *B 42CrMo4*

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Cr	Ni	Mo
0.439	0.264	0.76	0.018	<0.10		0.164	0.980	0.168	0.226
Ti	Al	Sn	Co	Ta	V	Nb	B	W	
0.003	0.012	0.011	0.014	0.01	0.003	0.001	0.000	<0.01	

Abbildung A5-2: Chemische Analyse einer Weichraumprobe aus 42CrMo4

## A6 – Prozesse und Bauteilzustände

Tabelle A-1: Prozesse und Bauteilzustände beider Verfahrensrouten

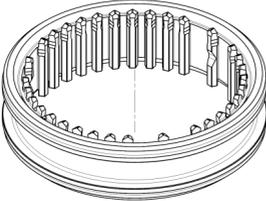
Z/P	16MnCr5 – Route Einsatzhärten (Variante Direkthärten)	42CrMo4 – Route Induktionshärten (Variante Normalisiert)
Z 0	Form: Ring Kern/Rand: Ferrit-Perlit 180 HV ; R <sub>m</sub> 550 N/mm <sup>2</sup>	Form: Ring Kern/Rand: Ferrit-Perlit 240 HV ; 750 N/mm <sup>2</sup>
P 1	Prozess: Weichräumen Werkzeug: HSS + TiN Energie: 45 kJ	Prozess: Weichräumen Werkzeug: HSS + TiN Energie: 55 kJ
Z 1/2	Form: Innenverzahnter Ring Kern/Rand: Ferrit-Perlit 180 HV ; 550 N/mm <sup>2</sup>	Form: Innenverzahnter Ring Kern/Rand: Ferrit-Perlit 240 HV ; 750 N/mm <sup>2</sup>
P 2	Prozess: Aufkohlen Anlage: Ofen Energie: 780 kJ	Prozess: Austenitisierung der Randschicht Anlage: Induktionsanlage Energie: 190 kJ
Z 2/3	Form: Innenverzahnter Ring Kern: 0,16 % C; 885 °C Rand: 0,3 – 0,7 % C ; 885 °C	Form: Innenverzahnter Ring Kern: < 700 °C Rand: 1100 °C
P 3	Prozess: Abschrecken Anlage: Ölbad / Gasatmosphäre Energie: < 5 kJ	Prozess: Abschrecken Anlage: Brause Polymerlösung / Härtedorn Energie: < 1 kJ
Z 3/4	Form: Innenverzahnter Ring + Verzug Kern: 450 HV; 1200 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 8 % Rand: 740 HV , 1600 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 3 % DES	Form: Innenverzahnter Ring + geringer Verzug Kern: 450 HV; 1200 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 8 % Rand: 740 HV ; 1600 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 3 % ; DES
P4	Prozess: Anlassen Anlage: Ofen Energie: 100 kJ	Prozess: Kurzzeitanlassen Anlage: Induktionsanlage Energie: 20 kJ
Z 4/5	Form: Innenverzahnter Ring + Verzug Kern: 400 HV; 1000 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 16 % Rand: 720 HV ; 1400 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 12 % ; DES	Form: Innenverzahnter Ring Endmaß Kern: 400 HV 1; 1000 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 16 % Rand: 720 HV 1 , 1400 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 12 % ; DES
P 5	Prozess: Harträumen Werkzeug: Hartmetall ; γ – E = < 5 kJ	- Entfällt -
Z 5/6	Form: Innenverzahnter Ring Endmaß Kern: 400 HV 1; 1000 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 16 % Rand: 720 HV 1 , 1400 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 12 % ; DES	- entspricht Z 4/5 -
P 6	Prozess: Reinigungsstrahlen Strahlmittel: Strahlsand E = 340 kJ	Prozess: Reinigungsstrahlen Strahlmittel: Strahlsand E = 340 kJ
Z E	Form: Innenverzahnter Ring Endmaß Kern: 400 HV 1; 1000 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 16 % Rand: 720 HV 1 , 1400 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 12 % ; DES+	Form: Innenverzahnter Ring Endmaß Kern: 400 HV 1; 1000 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 16 % Rand: 720 HV 1 , 1400 N/mm <sup>2</sup> ; A <sub>5</sub> = 12 % ; DES+

## A7 – Bauteildaten

### Daten Schalmuffe

In Abbildung A7-1 sind wichtige Daten des Bauteils, die für die Berechnungen in dieser Arbeit verwendet wurden, zusammengefasst:

---

	Durchmesser:	79	mm
	Volumen:	21,35	cm <sup>3</sup>
	Oberfläche:	156,3	cm <sup>2</sup>
	Werkstoff:	16MnCr5	
	Masse Fertigteil:	154	g
	Masse Schmiederohling:	426	g
	Zähnezahl:	39	
	Modul:	1,665	

---

Abbildung A7-1: Kerndaten des Demonstratorbauteils

---

## A9 – Prozessparameter Fertigung Schaltmuffe 5. Gang

Die Daten in der folgenden tabellarischen Form sind während des Besuchs im industriellen Umfeld ermittelt worden.

### A9.1 Durchstoßanlage

Tabelle A9-1: Prozess- und Anlagenparameter Aufkohlen

<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Aufkohlungstemperatur	885 °C
Aufkohlungsdauer inkl. Guterwärmung	285 Min
Taktzeit	9,5 Min
Nutzlänge	12 m
Werkstückträgerpositionen	30
Masse Werkstückträger Leergestell	20 kg
Masse Werkstückträger mit Aufbau	32 kg
Abmaße Werkstückträrgestelle (L x B x H)	400 mm x 500 mm x 450 mm
Anzahl Werkstücke pro Gestell (Säulenchargierung)	9 x 11 = 99
Netto-Chargenmasse	16 kg
Heizgas	Erdgas bei 0,6 bar
Heizwert	40,2 MJ/m <sup>3</sup>
Trägergas	Endogas
Regelgas C-Pegel	Methan
Mittlere Wandtemperatur	77 °C
Masse Schaltmuffe 5. Gang	0,16 kg
Masse Schaltmuffe 4. Gang	0,26 kg
Masse Schieberad	0,35 kg

Tabelle A9-2: Prozess- und Anlagenparameter Ofenanlassen

<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Anlasstemperatur	180 °C
Länge Anlassofen	8,5 m
Taktzeit	16,5 Min

Tabelle A9-3: Prozessparameter Trägertgasherstellung

<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Art der Trägertgases	Endogas
Ausgangsstoff	Erdgas
Volumenstrom Erdgas zur Prozessbeheizung	13,5 m <sup>3</sup> /h
Endogasproduktion	22,5 m <sup>3</sup> /h

## A9.2 Induktionshärten

Tabelle A9-4: Prozessparameter Induktionshärten

<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Heizphase 1 Härten Wirkleistung	8 kW
Heizphase 1 Härten Heizdauer	8 s
Heizphase 2 Härten Wirkleistung	10 kW
Heizphase 2 Härten Heizdauer	8 s
Abschrumpfen Wirkleistung	5 kW
Abschrumpfen Dauer	6 s
Anlassen Wirkleistung	2 kW
Anlassen Heizdauer	10 s

## A9.3 Strahlen

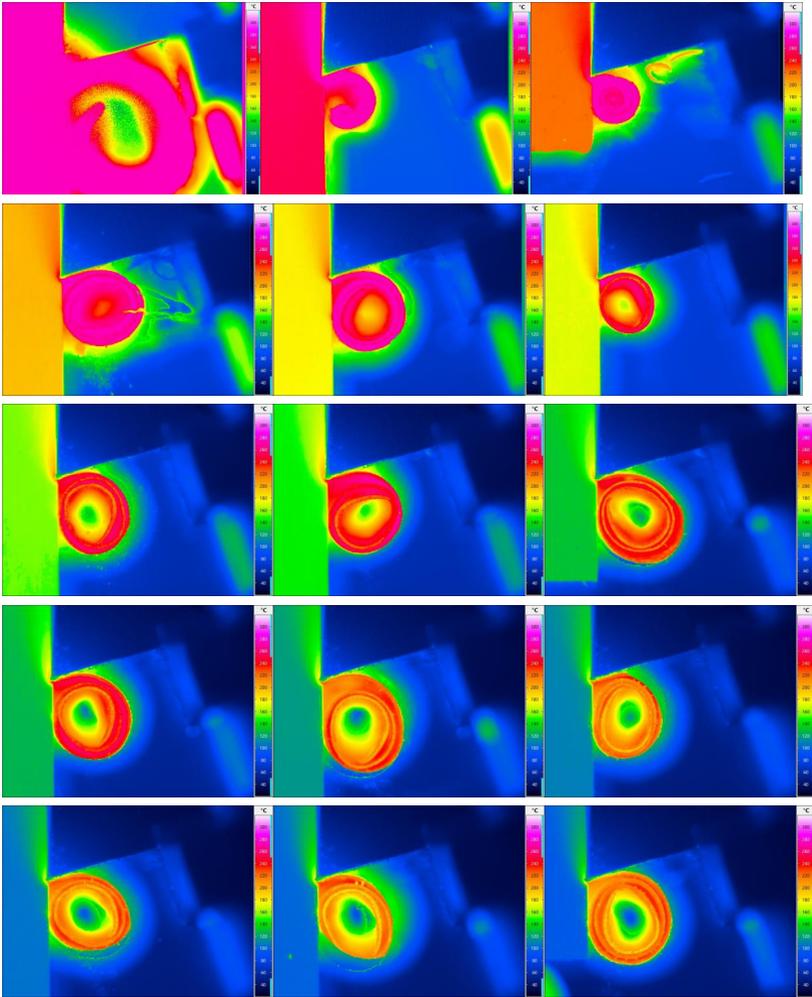
Tabelle A9-5: Prozess- und Anlagenparameter Reinigungsstrahlen

<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Wirkleistungsbezug Strahlprozess	38,5 kW
Taktzeit Strahlprozess	9 Min
Wirkleistungsbezug Blaskammer	28 kW
Taktzeit Blaskammer	7 Min
Wirkleistungsbezug Nebenzeit	20 kW
Anzahl Werkstücke pro Trägertraube	16 x 6 = 96
Massenstrom Strahlgut pro Turbine	187 kg/min
Anzahl Turbinen in der Strahlkabine	2
Abwurfgeschwindigkeit	50 – 90 m/s
Beschleunigungsleistung pro Turbine	7,8 kW
Strahlmittel	Strahlsand

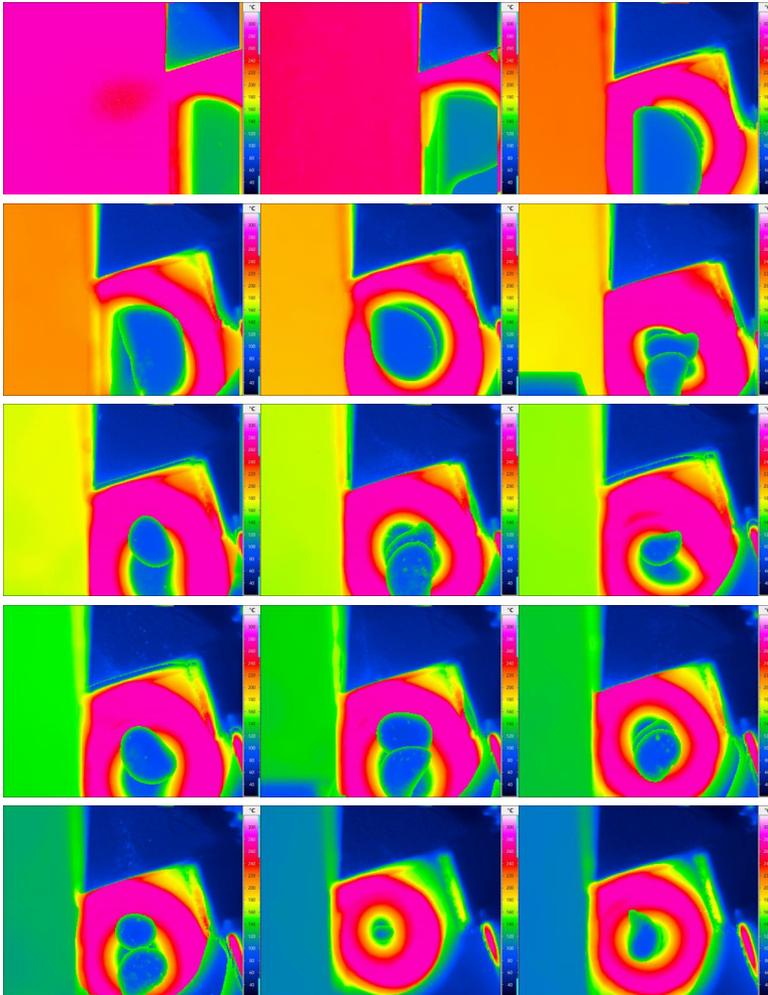
Tabelle A9-6: Prozess- und Anlagenparameter Verfestigungsstrahlen

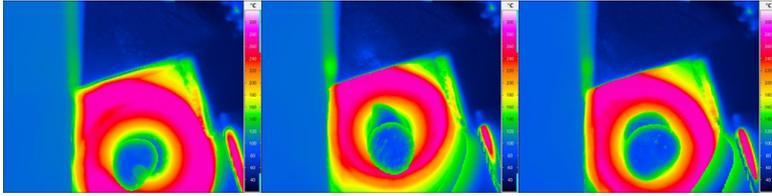
<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Leiterstrom Strahlprozess	100 A
Leiterstrom Nebenzeit (Grundlast)	48 A
Prozesszeit Strahlen	2 x 15 s
Zahnräder pro Werkstückträger	8
Karussellpositionen	20
Zykluszeit inklusive Nebenzeit	23 s
Strahlmittel	Stahldrahtkorn
Mittlerer Korndurchmesser	0,6 mm

16MnCr5 7m/min Schnittgeschwindigkeit, Spanungsdicke 37  $\mu\text{m}$

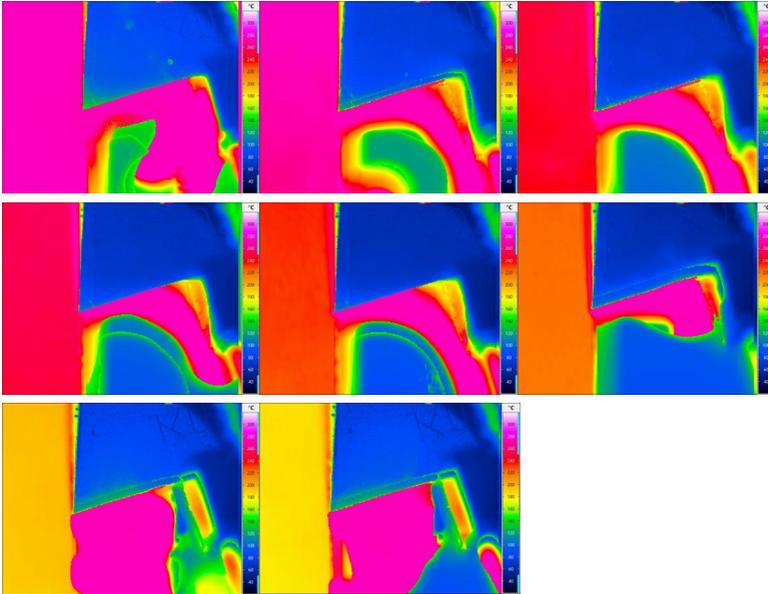


16MnCr5 60m/min Schnittgeschwindigkeit, Spanungsdicke 37  $\mu\text{m}$

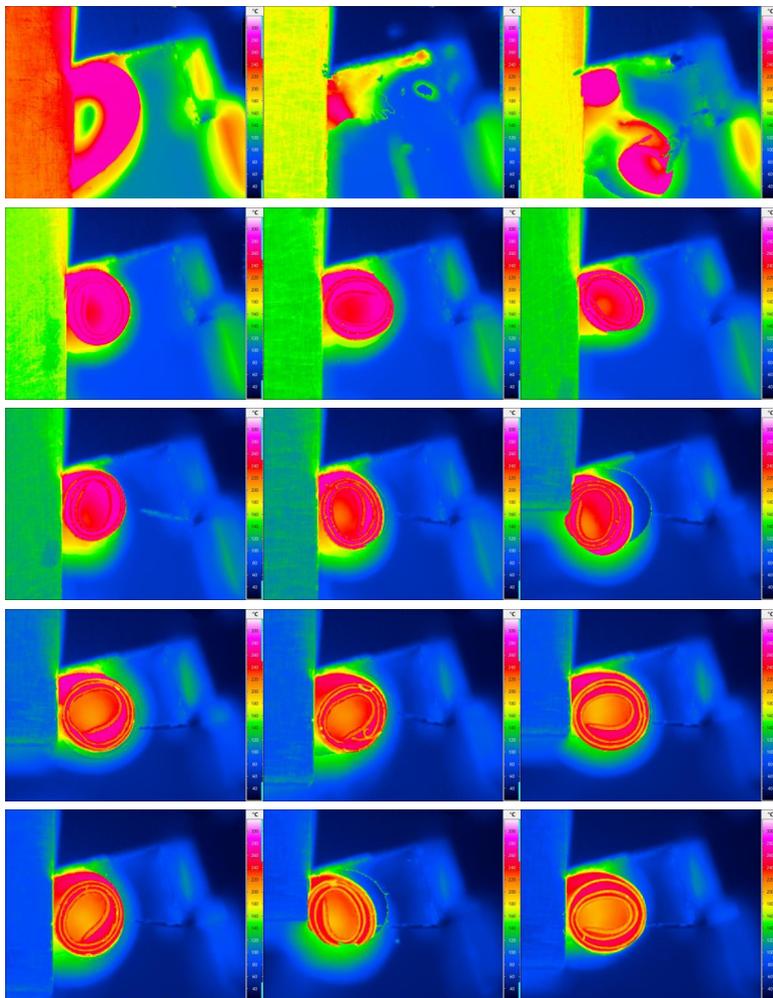




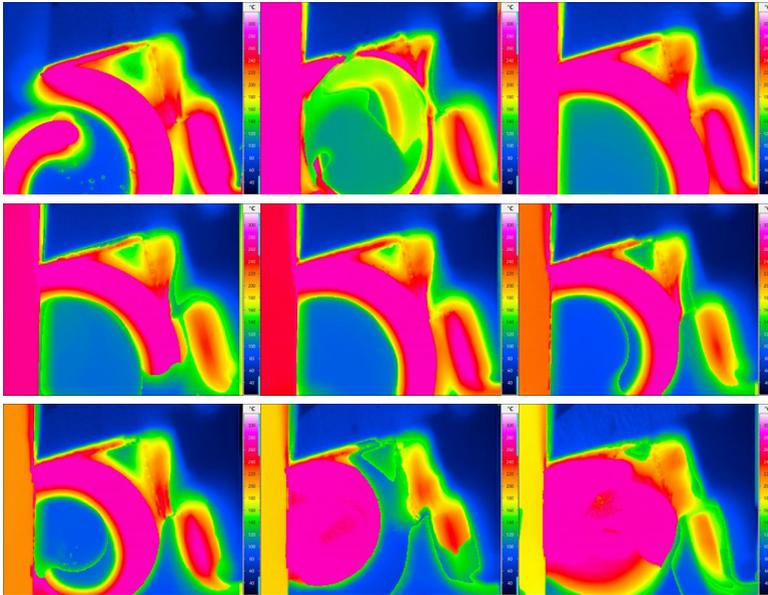
16MnCr5 100 m/min Schnittgeschwindigkeit, Spanungsdicke 37  $\mu\text{m}$



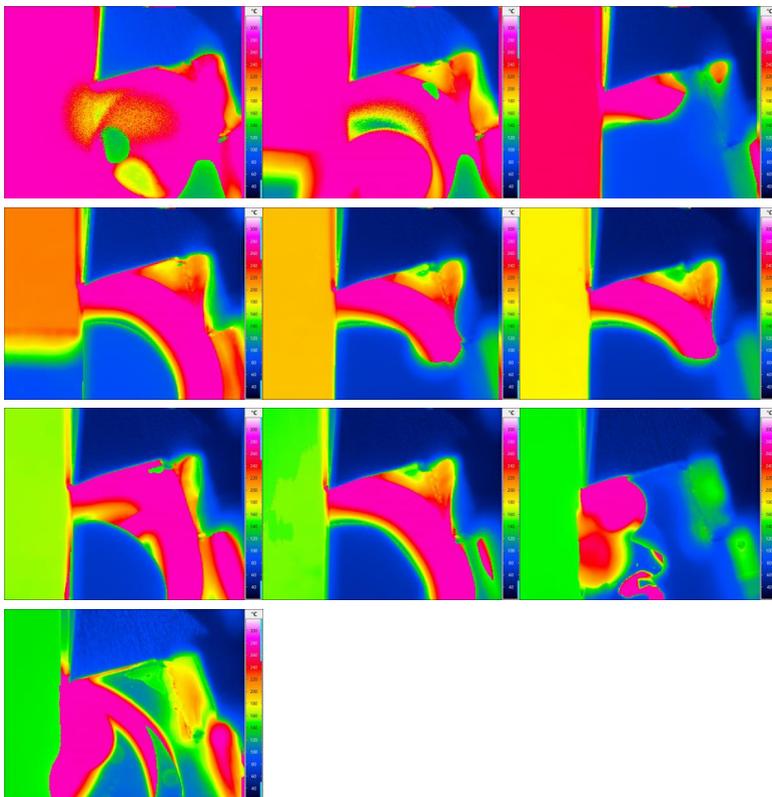
42CrMo4 7m/min Schnittgeschwindigkeit, Spanungsdicke 37  $\mu\text{m}$



42CrMo4 60m/min Schnittgeschwindigkeit, Spanungsdicke 37  $\mu\text{m}$



42 CrMo4 200 m/min Schnittgeschwindigkeit, Spanungsdicke 37  $\mu\text{m}$



## 9 Beruflicher / wissenschaftlicher Werdegang

### 10/2019 ANDREAS STIHL AG & Co. KG

- Gruppenleiter Additive und CNC-Fertigung
- Verantwortung für 10 Mitarbeiter
- CAD/CAM-Kopplung Additive und CNC-Fertigung
- Materialerweiterung LBM-Fertigung

### 10/2018 ANDREAS STIHL AG & Co. KG

- Fertigungstechnologe
- CNC-Fertigung (5-Achs Fräsen, Fräs-/Drehbearbeitung)
- Additive Fertigung (FDM, SLS, LBM)
- Versuchsteile für Prototypen
- Sonderwerkzeuge für die Kolbenherstellung

### 01/2013 – 12/2017 Institut für Produktionstechnik wbk

- Wissenschaftlicher Angestellter
- Aufbau Zentrum für additive Fertigung
- Industrieprojekte
- Forschungsprojekte
- Fertigungsverfahren: LBM, Lithografie, EDM, 5-Achs Bearbeitung, Räumen

### 09/2004 – 12/2012 Studium

- Karlsruher Institut für Technologie / Universität Karlsruhe
- Allgemeiner Maschinenbau, Diplom
- Diplomarbeit: Entwicklung eines Antriebskonzeptes für den Einsatz in Unterwasser-Tauch Scootern, Institut für Produktentwicklung
- Studienarbeit: Bewertung von Fertigungsverfahren für Faserverbundwerkstoffe im Hinblick auf den Entwurf einer Leichtbau-Felge für einen Formular Student Rennwagen, Institut für Produktentwicklung

### 05/2004 – 12/2010 Firma Heligraphix GdbR.

- Konstruktion und Bau von Prototypen
- Kameraführung
- Koordination von Versuchen

### 10/2003 – 07/2004 Berufsakademie Karlsruhe

- Volksbank-Stutensee-Hardt
- Betriebswirtschaftslehre (BA) Fachrichtung Bank

### 11/1997 – 06/2004 Dietrich Messebau & Promotion

- Gestaltung der Webseiten und Betreuung der IT
- Umsetzen von Werkstattaufträgen für Messestände

### 06/1998 – 0/2001 Music Pool Musikfachgeschäft

- Verkaufsberatung und Verkauf samstags

## Veröffentlichungen

Götze, E.; Heinzl, Y.; Matuschka, B.; Zanger, F.; Schulze, V.; Rohde, M.; Krügelstein, A. & Franke, J. (2017), „Optimierung der Aktivlotzusammensetzung für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Herstellung von innenliegenden Leiterbahnen“. 8. Kolloquium Mikroproduktion, Hrsg. F. Vollertsen, J. W., BIAS Verlag, S. 129-134.

Matuschka, B.; Boev, N.; Zanger, F. & Schulze, V. (2016), „Simulation based reduction of the impact load occurring in the moment of cutting edge entrance in order to prolong tool-life“. Applied Mechanics and Materials, Hrsg. TPP, S. 112-118.

Matuschka, B.; Granser, T.; Rohde, M.; Schulze, V. & Seifert, H. (2015), „Alternative Herstellung von elektrischen Leitern in der Mikrotechnik“, wt Werkstattstechnik online, Band 11, S. 800-804.

Hoppen, P.; Kacaras, A.; Matuschka, B. & Schulze, V. (2015), „Bearbeitung metallischer Gläser auf Fe- und Zr-Basis mittels Mikrofräsen, Mikrofunkenerosion und Mikrolaserabtragen“. 7. Kolloquium Mikroproduktion, Hrsg. Institut für Kunststoffverarbeitung.

Matuschka, B.; Schulze, V.; Rohde, M. & Seifert, H. (2015), „Leiterbahnen zur Versorgung von Leistungselektronik auf Spritzgegossenen, keramischen Grundkörpern“. MikroSystemTechnik Kongress, Hrsg. GMM - VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, S. 242-245.

Matuschka, B.; Ruhs, C. & Schulze, V. (2013), „Qualitätssicherung in der Mikrofunkenerosion“. Kolloquium Mikroproduktion, Hrsg. Rainer Tutsch (Hrsg.), S. 14.

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

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System  
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die  
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung  
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

**Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich**

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an  
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

**Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen**

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

**Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien**

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

**Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung**

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

**Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung**

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16  
Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17  
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18  
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19  
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20  
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21  
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22  
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24  
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

**Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen**

Band 25  
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren**

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

**Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung**

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

**Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem**

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

**Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder**

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

**Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen**

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

**Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen**

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

**Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben**

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

**Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen**

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

**Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen**

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

**Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik**

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

**Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen**

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

**Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion**

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

**Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen**

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

**Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen**

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

**Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen**

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

**Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung**

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

**Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen**

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

**Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

**Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen**

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

**Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes**

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

**Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen**

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

**Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung**

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

**Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen**

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

**Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

**Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem**

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

**Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus**

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

**Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation**

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

**Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten**

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90  
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91  
Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92  
Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung**

Band 93  
Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94  
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95  
Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96  
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97  
Dr.-Ing. Frank Reinboth

**Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren**

Band 98  
Dr.-Ing. Lutz Trender

**Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung**

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

**Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining**

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

**Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen**

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

**Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement**

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

**Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen**

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

**Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses**

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

**Turbulenzreaktionsprozesse**

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

**Fabrikplanung im turbulenten Umfeld**

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden  
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms  
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau  
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der  
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration  
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V**

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ MIM-Bauteile**

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

**Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe**

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**  
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit  
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**

Band 230  
Dr.-Ing. Tom Stähr

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung**

Band 231  
Dr.-Ing. Jan Schwennen

**Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile**

Band 232  
Dr.-Ing. Sven Coutandin

**Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem**

Band 233  
Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz**  
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234  
Dr.-Ing. Stefan Treber

**Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**  
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235  
Dr.-Ing. Marius Dackweiler

**Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Band 236  
Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

**Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion**

Band 237  
Dr.-Ing. Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen**

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion**

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

**Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission**

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung**

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning  
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry**

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation  
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung**

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

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

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

**Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen**

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

**Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements**

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

**Hochiterative Technologieplanung**

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener  
Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms  
im Faserblasverfahren**

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels  
simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung**

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

**Regionalized implementation strategy of smart  
automation within assembly systems in China**

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

**Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung  
für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion**

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms**

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und  
der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

**Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen  
Computertomographie**

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation  
von Schwingungen in Werkzeugmaschinen**

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

**Wälzschälern mit kleinen Achskreuzwinkeln**

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

**Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound**

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

**Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik**

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

**Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures**

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

**(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken**

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

**Integration des Vereinzelnungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung**

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion**

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

**Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien**

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

**Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von  
Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5**