Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands bei der Arbeitsplanung am Beispiel des Bauteilverzugs von hochfesten Stahlbauteilen der Antriebstechnik

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Dieter Klein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Dieter Thoben

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch

Tag der mündlichen Prüfung: 14.01.2015

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen (BIBA). Hier hatte ich die Möglichkeit, mein Thema zu entwickeln und meine Ansätze auf Konferenzen mit internationalen Teilnehmern zu diskutieren.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Dieter Thoben, dass ich mich auch als Quereinsteiger mit diesem Thema auseinandersetzen durfte. Vielen Dank auch für die gesamte Begleitung meiner Arbeit, den vielen fachlichen Hinweisen und hilfreichen Ratschlägen, den fruchtbringenden Diskussionen und der wohlwollenden Unterstützung dieser Arbeit.

Ferner gilt mein besonderer Dank Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch für die Übernahme des Korreferats, worüber ich mich sehr gefreut habe. Mein besonderer Dank gilt ebenso den weiteren Mitgliedern des Prüfungsausschusses Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann, Prof. Dr.-Ing. Marcus Seifert, Ingo Westphal und Jakub Mak-Dadanski für die Bereitschaft, am Prüfungsausschuss mitzuwirken sowie für das Interesse an der Arbeit. Die in der vorliegenden Dissertationsschrift erzielten Forschungsergebnisse basieren auf Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 570 „Distortion Engineering“, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert wurde. Dem Förderer gilt mein aufrichtiger Dank. Ohne die Unterstützung anderer ist eine solche Arbeit nicht zu realisieren. Deshalb möchte ich mich für die vielen anregenden und hilfreichen Diskussionen im Kreise meiner Kolleginnen und Kollegen aus dem BIBA recht herzlich bedanken. Mein besonderer Dank gilt hier Jannicke Baalsrud Hauge, Heiko Duin, Thorsten Wuest, Pierre Kirisci, Stefan Wiesner und Falk Graser. Auch möchte ich mich ganz herzlich bei meinen ehemaligen studentischen Hilfskräften Steffen Niermann und Jeremy Prasetyo bedanken. Ebenso möchte ich mich ausdrücklich für die sehr gute Zusammenarbeit bei meinen Kolleginnen und Kollegen im SFB 570 bedanken. Hier vor allem bei Dr.-Ing. Thomas Lübben für die sehr hilfreichen Ratschläge und bei Dr. rer. nat. Friedhelm Frerichs für die vielen Fragen, die er mir immer gerne beantwortet hat. Meinem Freund Jörn Kleinekathöfer danke ich recht herzlich für die abschließende Durchsicht der Arbeit.

Schließlich möchte ich bei meiner Familie, besonders bei meinen Eltern Ingeborg und Josef, für die liebevolle Unterstützung bedanken. Aus *tiefstem Herzen* danke ich meiner Frau Yvonne für Ihre Geduld und Liebe. Ohne Sie wäre diese Arbeit nicht entstanden. Ihr widme ich diese Dissertationsschrift. Vergessen möchte ich auch nicht meine Kinder Fabian und Celine, die sich manchmal gewünscht hätten, dass Papa mehr Zeit für sie gehabt hätte.

Für Yvonne

1 Einleitung 1
1.1 Motivation 1
1.2 Problemstellung 2
1.3 Zielsetzung 7
1.4 Aufbau der Arbeit 8
2 Grundlagen und Problembeschreibung 11
2.1 Bauteilverzug 12
2.2 Innerer Werkstückzustand von Stahlbauteilen 12
2.3 Prozesskette zur Fertigung hochfester Stahlbauteile in der Antriebstechnik 16
2.4 Systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs 18
2.5 Arbeitsplanung in der mechanischen Fertigung 21
2.6 Zusammenfassung der Problembeschreibung 31
3 Stand der Technik 35
3.1 Arbeiten im Sonderforschungsbereich „Distortion Engineering“ 36
3.2 Verzug als Systemeigenschaft 44
3.3 Arbeitsplanung und Planungshilfsmittel in der mechanischen Fertigung 46
3.4 Zusammenfassung 48
4 Konzept für die systematische Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands bei der Arbeitsplanerstellung 49
5 Systematische Beschreibung des Bauteilverzugs entlang von Prozessketten 53
5.1 Systemanalytische Betrachtung des Bauteilverzugs 54
5.2 Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ 79
5.3 Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“ 85
6 Planungshilfsmittel zur Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands aus Sicht der Arbeitsplanerstellung 94
6.1 Handlungsempfehlungen für die Arbeitsplanerstellung 94
6.2 Verzugsgerechter Arbeitsplan 102

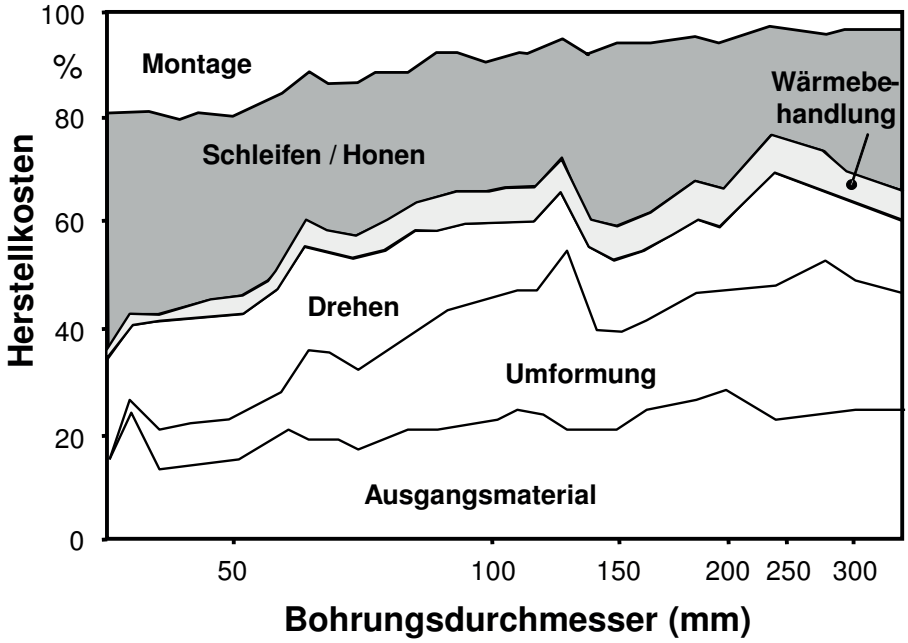
7 Zusammenfassung und Ausblick 110
7.1 Zusammenfassung 110
7.2 Ausblick 111
8 Literaturverzeichnis 112
9 Anhang 125
9.1 Glossar 126
9.2 Prozesskettenvergleich verschiedener Prozessketten 134

1 Einleitung

Nacharbeit kostet Geld und desto später ein Fehler nachgearbeitet werden muss, desto teurer wird es. Die Fehlerfortpflanzung vom Lastenheft über die Produktentwicklung, die Arbeitsplanung, die Produktion bis zum Produkt beim Kunden bedeutet eine Potenzierung der Fehlleistungsaufwendungen. Dieser Zusammenhang ist z. B. durch die sogenannte Zehnerregel bekannt [VDA4.1 1996, S. 20], [Pfeifer 2001a, S. XXVIII]. Der einfache Hintergrund der Zehnerregel besagt, dass es ein paar Cent kostet, in der Planungsphase auf dem Papier einen Fehler zu korrigieren. Muss allerdings im Fertigungsprozess durch Nacharbeit ein Fehler behoben werden, kostet dies ein Vielfaches mehr. Die teuerste Variante der Fehlerfortpflanzung tritt auf, wenn die Folgen eines Fehlers erst beim Einsatz des Produktes beim Kunden erkannt werden. Dementsprechend kann eine vorausschauende Planung viel Geld sparen.

1.1 Motivation

Zur optimalen Einstellung der werkstoffbezogenen Bauteileigenschaften erfolgt bei der Fertigung von hochfesten Bauteilen aus Stahl in der Antriebstechnik (z.B. Wälzlagerringe, Wellen und Zahnräder) in der Regel gegen Ende des Fertigungsprozesses eine Wärmebehandlung. Durch diese abschließende Wärmebehandlung verändern sich neben den Werkstoffeigenschaften jedoch in nahezu allen Fällen auch die Maße und Formen der Bauteile. Diese ungewollten Maß- und Formänderungen werden als „Verzug“ bezeichnet und stellen im Sinne der Zehnerregel die Folge einer Fehlerfortpflanzung dar. Überschreitet der Verzug die zulässigen Bauteiltoleranzen, müssen die Bauteile spanend, z. B. durch Schleifen, nachbearbeitet werden. Da diese Korrektur am hochharten Zustand erfolgen muss, entstehen hier in der Regel hohe Zusatzkosten. Schleifkosten können einen erheblichen Anteil an den gesamten Fertigungskosten besitzen. Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang der Fertigungskosten in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers bei Wälzlagerringen nach [Zoch 2006, S. 6]. Abhängig von der Größe des Bohrungsdurchmessers der Werkstücke können die Schleifkosten 30-40% der Fertigungskosten ausmachen.



Wälzlagerringe

Abbildung 1: Fertigungskosten in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers [Zoch 2006, S. 6].

Schon 1996 wird in [Volkmuth 1996, S. 145] berichtet, dass die Reduzierung von Verzug immer stärker an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnt. Dies zeigte sich u.a. auch an der steigenden Anzahl an Veröffentlichungen und Forschungsaktivitäten zu dieser Thematik. Insgesamt besteht von Seiten der Unternehmen und der Forschung also ein großes Interesse daran, den Bauteilverzug zu reduzieren bzw. zu beherrschen [Mayr et al. 2001, S. 1ff], [Hoffmann et al. 2002, S. 213ff], [Volkmuth 2005a, S. 57] und [Heeß et al. 2007, Vorwort].

Nach der Zehnerregel können die Kosten durch eine den Verzug berücksichtigende Planung deutlich reduziert werden. Die Motivation dieser Arbeit ist die Betrachtung der Planungsphase und hier speziell die Arbeitsplanung, um den Bauteilverzug in der späteren Fertigung schon während der Planung so gering wie möglich zu gestalten.

1.2 Problemstellung

Dass die Wärmebehandlung am Ende des Fertigungsprozesses nicht allein verantwortlich für den Bauteilverzug ist, ist Stand des Wissens [Thoben et al. 2002, S. 276]. Ebenso beeinflussen vorgelagerte Prozesse wie das Drehen, das Schmieden und die Stahlerzeugung den später sichtbaren Bauteilverzug. Abbildung 2 zeigt beispielhaft vier Hauptprozesse zur Fertigung von hochfesten Stahlbauteilen, hier am Beispiel eines Wälzlagerings.

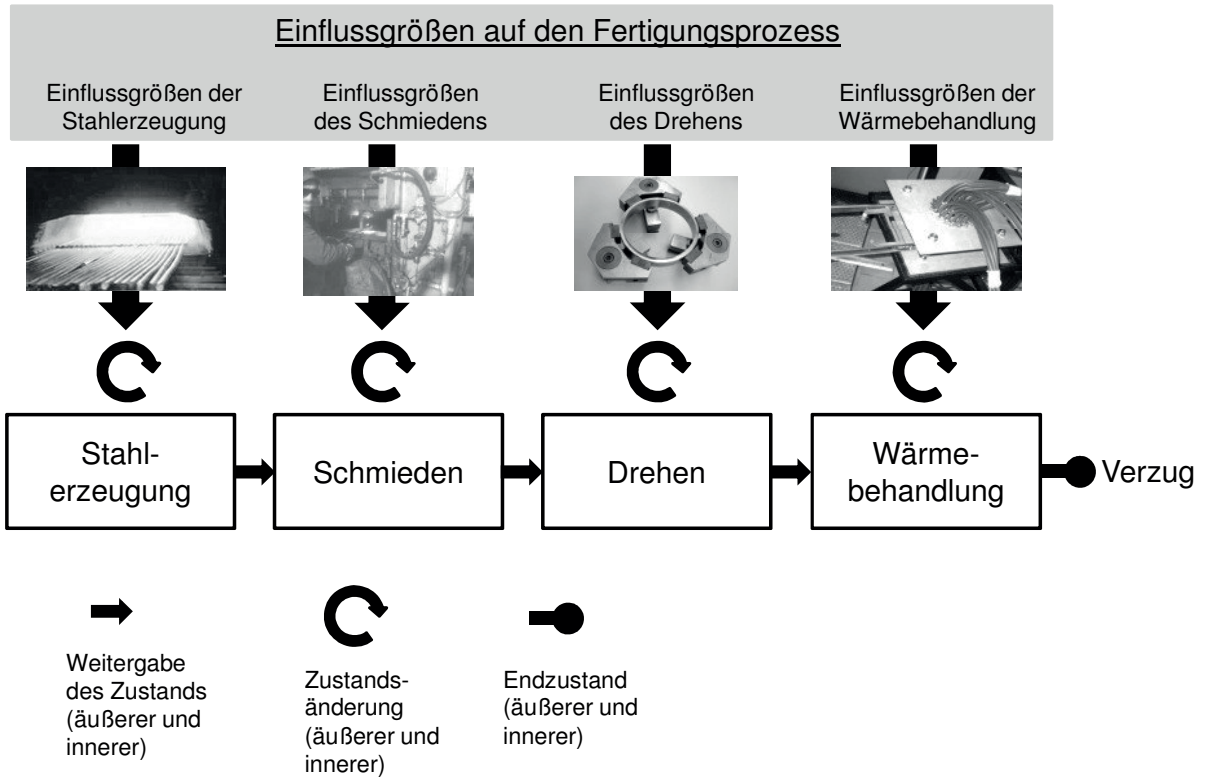


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung von vier Hauptprozessen zur Fertigung von hochfesten Stahlbauteilen am Beispiel Wälzlagerring

Von der Stahlerzeugung bis zur abschließenden Wärmebehandlung wird kontinuierlich der Zustand eines Werkstücks verändert (siehe Abbildung 2). Unter Zustand wird hier der äußere und innere Zustand eines Werkstücks verstanden. Der äußere Zustand bezeichnet alle Eigenschaften, die zur Geometrie des Werkstücks gehören (z.B. Form, Oberflächenrauheit usw.). Der innere Zustand ist die Summe aller Eigenschaften, die das Innere des Werkstücks betreffen, wie z.B. Seigerungen, Gefüge oder auch Eigenspannungen. Die vier Hauptprozesse bestehen aus weiteren Unterprozessen, die nach DIN 8580 [N.N. 2003a] verschiedenen Fertigungsverfahren zugeordnet werden können (Abbildung 3).

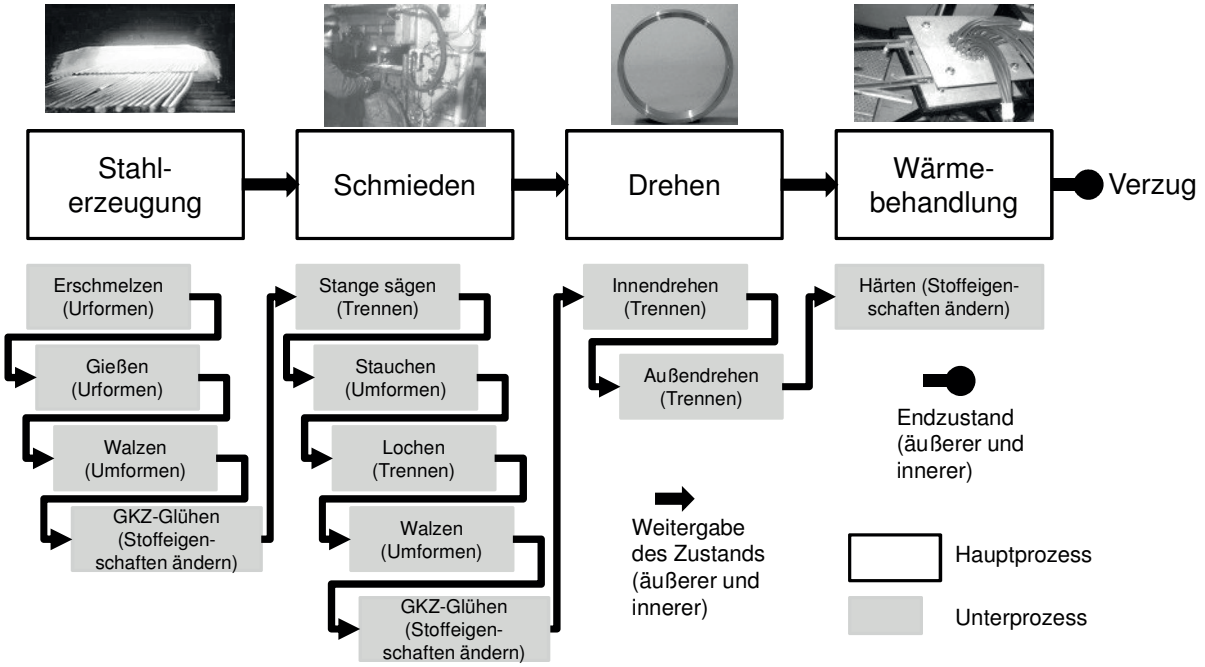


Abbildung 3: Hauptprozesse und Unterprozesse mit Angabe von Fertigungsverfahren am Beispiel Ringfertigung

Die Unterprozesse in Abbildung 3 wurden in Anlehnung an industrielle Prozessketten zur Fertigung gewählt und orientieren sich im weiteren Verlauf an den Prozessen zur Fertigung im Sonderforschungsbereich SFB 570 „Distortion Engineering“ [Clausen et al. 2004, S. 1]. Problematisch ist, dass der innere Werkstückzustand während der vorgelagerten Prozesse nicht sichtbar ist. Hinzu kommt weiterhin, dass der Zusammenhang zwischen Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess und hier im Speziellen auf den inneren Zustand bislang nicht vollständig beschreibbar bzw. berechenbar ist (siehe z.B.[Sölter 2010, S. 95]). Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess und auf den inneren Zustand bei den der Wärmebehandlung vorgelagerten Prozessen (Stahlerzeugung, Schmieden und Drehen) und dem Verzug ist nicht vollständig bzw. nicht präzise herzuleiten (Abbildung 4). So wird bei Form ändernden Verfahren - Umformen und Trennen (siehe Abbildung 3) - meist nur der äußere Zustand eines bearbeiteten Werkstücks gewollt verändert. Mit der Änderung des äußeren Werkstückzustands wird aber gleichzeitig der innere Werkstückzustand z. B. die Seigerung und/oder die Gefüge- bzw. Eigenspannungsverteilung verändert, dies allerdings meist ungewollt. Die Bearbeitung der Geometrie kann somit zu ungewollten inneren Zuständen führen, die nach einer abschließenden Wärmebehandlung in Form von Verzug als Maß- und Formänderungen sichtbar werden.

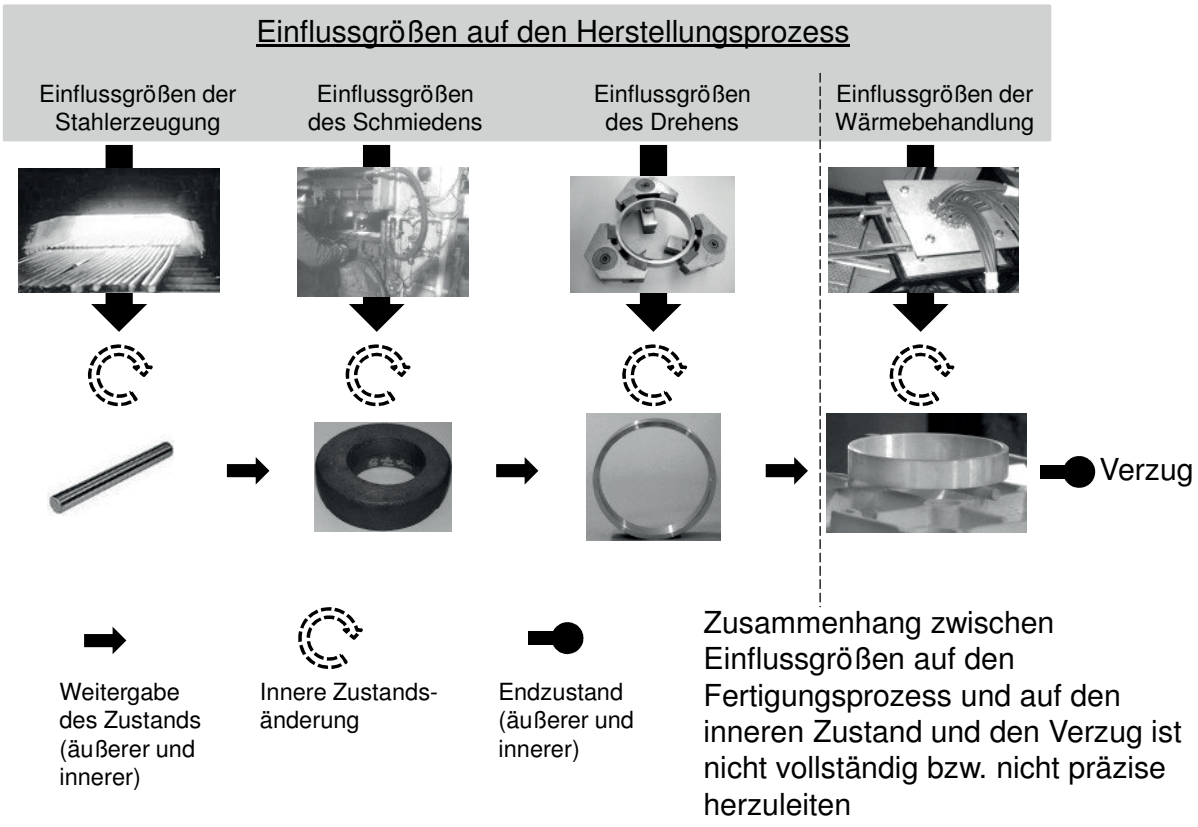


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess, den inneren Zustand und Verzug

Während bei Urform- und Stoffeigenschaft ändernden Prozessen die Berücksichtigung des inneren Zustands u.a. auch bezogen auf den Verzug zum Stand der Technik gehören, ist dies bei Form ändernden Prozessen (Umformen und Trennen) meist nicht der Fall. Bei Urformprozessen wie Erschmelzen und Gießen im Stahlwerk wird beispielweise darauf geachtet, dass der Stahl so seigerungsfrei wie möglich ist. Bei den Wärmebehandlungen –Vor-, Zwischen- und/oder Endwärmebehandlung– (Stoffeigenschaft ändern) werden beim inneren Werkstückzustand vor allem die (Eigen-) Spannungen, Dehnungen und das Gefüge berücksichtigt. Gerade bei den Form ändernden Prozessen wird aber meist nur die geometrische Änderung geplant. Im Vordergrund steht die Änderung der äußeren Form und nicht die Berücksichtigung der inneren Zustände. Für die beispielhafte Prozesskette in Abbildung 3 bedeutet dies, dass bei den Umform- und Trennprozessen Informationen über den inneren Werkstückzustand fehlen bzw. Größen dahingehend nicht geplant werden (siehe Abbildung 5).

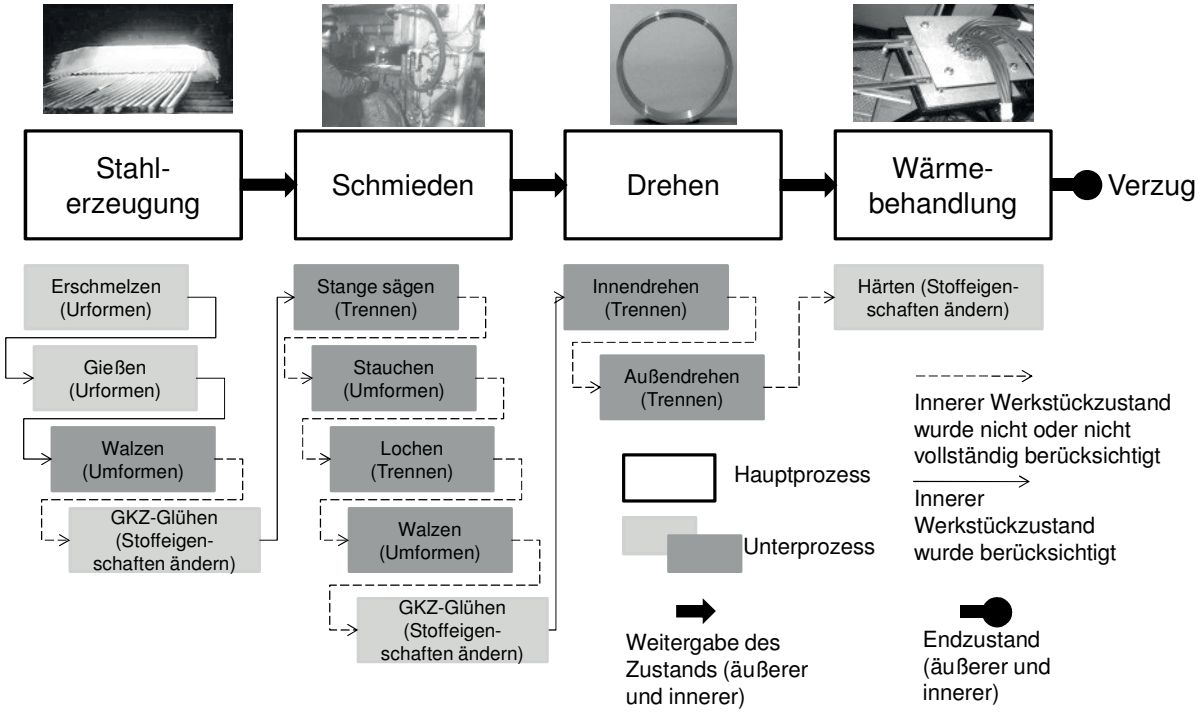


Abbildung 5: Problemstellung anhand der Ringfertigung

Abbildung 5 soll skizzenhaft verdeutlichen, dass gerade bei den Umform- und Trennprozessen entlang der Hauptprozessschritte der innere Werkstückzustand nicht oder nicht vollständig berücksichtigt wird. Dies wird in Abbildung 5 durch die gestrichelten Linien verdeutlicht. Im Besonderen betrifft dies den Hauptprozess „Drehen“. Der Verzug ist aber als Systemeigenschaft zu betrachten und muss folglich auch prozessübergreifend, also das gesamte System betrachtend, geplant und berücksichtigt werden [Mallener 1990, S. 67], [Zoch 1995, S. 103], [Volkmuth 1996, S. 145], [Hoffmann et al. 2002, S. 213], [Volkmuth 2002, S. 57] und [Volkmuth 2005a, S. 30].

Durch die Konstruktion und Arbeitsplanung werden die Werkstückzustände durch bereits getroffene, bauteilbezogene Entscheidungen für die spätere Fertigung maßgeblich bestimmt. Die Arbeitsplanung im Bereich der mechanischen Fertigung wird in der Literatur und Industrie hauptsächlich im Bereich der Weichbearbeitung betrachtet (siehe z.B. [Eversheim und Schuh 1999, S. 9, Kapitel 14], [Beitz und Grote 2001, S. S105], [Eversheim 2002, S. 18], [Awiszus et al. 2003, S. 341], [Jacobs und Dürr 2002, S. 13]). Die weiteren Ausführungen zur Arbeitsplanung beziehen nun sich auf die Weichbearbeitung (u.a. Drehen). Soll der Verzug in der Weichbearbeitung minimiert werden, muss er in der Planungsphase berücksichtigt werden. Für die Konstruktion lauten die Vorgaben, u.a. das Werkstück so symmetrisch wie möglich zu konstruieren bzw. den entsprechenden Werkstoff zu bestimmen. Randbedingungen dabei sind u.a. die Funktion des Bauteils, das Gewicht oder die Abmessungen. Allerdings ist

mindestens genauso wichtig, wie das Werkstück aus der Ausgangsgeometrie in die Endgeometrie transformiert wird. Denn jeder Fertigungsprozess verändert den Werkstückzustand und es gibt meist mehrere Möglichkeiten, die Endgeometrie zu fertigen und dessen Funktionseigenschaften einzustellen. Somit kommt der Arbeitsplanung eine große Bedeutung zu [Eversheim 2002,S. 3], denn die zur Planung festgelegten Größen (u.a. Maschinen, Werkzeuge und ihre Einstellparameter) bestimmen direkt die Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess. Ein wichtiges Instrument der Arbeitsplanung ist der Arbeitsplan, nach dessen Vorgaben das Bauteil später gefertigt wird. Bei Umform- und Trennprozessen werden meist nur Planungsvorgaben zur Änderung der Form, also der äußeren Geometrie, durch den Arbeitsplan festgelegt. Der sich gleichzeitig verändernde innere Zustand wird bislang im Arbeitsplan nicht explizit berücksichtigt. Dies liegt u.a. auch daran, dass Planungshilfsmittel für diese Aufgabe fehlen. Während es z.B. für die Oberflächenbeschaffenheit nach DIN 4766 Tabellen zur Verfahrensauswahl gibt (siehe u.a. [Dürr et al. 2003, S. 124]), existieren keine Tabellen zur Verfahrensauswahl bzw. der Auswahl technologischer Kennwerte bzgl. des inneren Werkstückzustands, z.B. von Eigenspannungsverteilungen oder auch der Gefügeverteilung. Dies führt zu dem Problem, dass die zur Planung eingesetzten Größen, die den inneren Werkstückzustand mit beeinflussen, den Verzug gar nicht oder nur teilweise und somit unvollständig berücksichtigen. Ursache dafür sind die zz. noch meist unbekannten Zusammenhänge zwischen den zur Planung festgelegten Größen und den Verzugsmechanismen und deren Wechselwirkungen mit vor- und nachgelagerten Prozessen der Weichbearbeitung. Unter Verzugsmechanismus soll hier die physikalische Wirk- und Funktionsweise zur Beschreibung im Innern des Werkstücks bezogen auf die Verzugsentstehung verstanden werden. Eine Folge daraus ist, dass der Verzug in der Planung nicht prozessübergreifend betrachtet wird. Eine den Verzug berücksichtigende Arbeitsplanung ist heute nicht möglich. Planungshilfsmittel, mit dem der innere Werkstückzustand entlang einer Prozesskette vom Beginn der Stahlerzeugung bis zur abschließenden Wärmebehandlung unterstützend geplant werden kann, sind nur rudimentär vorhanden.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag dahingehend zu leisten, die Arbeitsplanung durch Hilfsmittel wie Vorgehensweisen, Methoden und Erkenntnisse bei der Verzugsbeschreibung von hochfesten Stahlbauteilen der Antriebstechnik entlang von Prozessketten zu unterstützen. Dabei soll im Besonderen der innere Werkstückzustand in die Planung bei den Form ändernden Prozessen einbezogen bzw. berücksichtigt werden.

Im Vordergrund dieser Arbeit stehen weder FEM-Simulationen noch die mathematische Modellbildung zur Beschreibung bzw. Vorhersage von Verzug.

Vielmehr geht es um solche Hilfsmittel, die die Arbeitsplanung durch experimentelles Wissen und oder Expertenwissen bzgl. des Verzugs unterstützen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung in Kapitel 1 werden in Kapitel 2 zuerst grundlegende Begriffe erklärt, die für das Verständnis der Problembeschreibung wichtig sind (siehe Abbildung 6). Zunächst werden zu Anfang der Bauteilverzug und der innere Werkstückzustand von Stahlbauteilen näher erläutert. Anschließend wird auf die Besonderheiten der Fertigung hochfester Bauteile eingegangen. Hier werden Fertigungsverfahren im Hinblick auf die Form ändernden Prozesse beschrieben, die innerhalb der Prozesskette zur Fertigung hochfester Bauteile stattfinden. Diese Betrachtung ist notwendig, da hochfeste Bauteile am Ende des Fertigungsprozesses gehärtet werden, um die geforderten Gebrauchseigenschaften zu erlangen. In diesem Kontext ist die Verzugsberücksichtigung von besonderem Interesse. Da der Bauteilverzug eine Systemeigenschaft darstellt, erfordert die Verzugsberücksichtigung die Auseinandersetzung mit dem gesamten System des Fertigungsprozesses. Dieses System besitzt viele Einflussgrößen, die wechselwirken können. Insgesamt ist die systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs neben der Arbeitsplanung ein zentraler Punkt dieser Arbeit und wird an dieser Stelle für das besondere Problemverständnis näher erläutert. Da sich diese Arbeit mit der Arbeitsplanung in der mechanischen Fertigung von Stahlbauteilen befasst, wird daraufhin der Produktionsbereich der Arbeitsplanung besprochen. Aufbauend auf diesen Grundlagen wird die Problembeschreibung abschließend zusammengefasst.

Kapitel 3 analysiert den Stand der Technik. Die Arbeit entstand innerhalb des Sonderforschungsbereichs SFB 570 „Distortion Engineering“. Ziel des SFB 570 war die Erforschung der eigentlichen Ursachen des Verzugs aus systemorientierter Sicht einer gesamten Prozesskette. Deshalb wird als erstes die Literatur, die im Rahmen des Distortion Engineering ausgewertet wurde, in die Betrachtung dieser Arbeit einbezogen. Anschließend wird die Literatur (recherchiert in speziellen Datenbanken wie DOMA - Maschinenbau und Anlagenbau) zum Themenkomplex „Verzug als Systemeigenschaft“ und „Arbeitsplanung und Planungshilfsmittel“ analysiert. Zum Schluss wird noch der Stand der Technik aus Lehrbüchern und Firmenbesuchen dokumentiert und die Ergebnisse zusammengefasst.

In Kapitel 4 werden das Konzept und eine detaillierte Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung behandelt. Das Konzept sieht vor, aufbauend auf einer systemorientierten Verzugsbeschreibung mittels des Top-Down-Ansatzes Planungshilfsmittel zur Unterstützung der Arbeitsplanerstellung zur Verfügung zu stellen.

Die Umsetzung des Konzepts wird in Kapitel 5 besprochen. Das Planungshilfsmittel soll zuerst aus Systemsicht erstellt und anschließend auf die Sicht der Arbeitsplanerstellung angepasst werden. Mittels einer Systemanalyse wird gezeigt, wie die Komplexität von Systeminformationen für das System „Verzug“ geeignet reduziert werden kann. Für die Verzugsbetrachtung sollen nur die relevanten Informationen in den Planungshilfsmitteln verwendet werden. Anschließend werden zwei Vorgehensweisen besprochen, die als Grundlage für Planungshilfsmittel aus Systemsicht dienen können. Diese Vorgehensweisen müssen das gesamte System einer Prozesskette, den inneren Werkstückzustand sowie den Verzug berücksichtigen können. Die Systemanalyse sowie die Vorgehensweisen werden anhand von Beispielprozessketten durchgeführt. Nach der Durchführung stehen jeweils Planungshilfsmittel aus Systemsicht zur Verfügung, die im Weiteren Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ und Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“ genannt werden.

Die Planungshilfsmittel aus Systemsicht müssen nun überprüft werden, ob sie auch als Planungshilfsmittel aus Sicht der Arbeitsplanung in der mechanischen Fertigung geeignet sind oder noch angepasst werden müssen. Mit diesen Planungshilfsmitteln kann der Arbeitsplaner hinsichtlich seiner Planungsaufgaben anschließend Entscheidungen treffen, um einen verzugsgerechten Arbeitsplan zu erstellen. Dies wird in Kapitel 6 gezeigt. Das Ergebnis von Kapitel 6 stellt abschließend einen verzugsgerechten Arbeitsplan dar.

Kapitel 7 fasst noch einmal alles zusammen und gibt einen Ausblick bzgl. Anwendbarkeit, Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit auf andere Prozessketten. Abbildung 6 zeigt übersichtlich die Gliederung dieser Arbeit.

2.1 Bauteilverzug	2.2 Innerer Werkstückzustand von Stahlbauteilen	**Kapitel 2: Grundlagen und Problembeschreibung**
2.3 Prozesskette zur Herstellung hochfester Stahlbauteile in der Antriebstechnik	2.4 Systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs	
2.5 Arbeitsplanung in der mechanischen Fertigung	2.6 Zusammenfassung der Problembeschreibung	
3.1 Arbeiten im Sonderforschungsbereich „Distortion Engineering“	3.2 Verzug als Systemeigenschaft	**Kapitel 3: Stand der Technik**
3.3 Arbeitsplanung und Planungshilfsmittel in der mechanischen Fertigung	3.4 Zusammenfassung	
		Kapitel 4: Konzept für die systematische Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands bei der Arbeitsplanerstellung
5.1 Systemanalytische Betrachtung des Bauteilverzugs	5.2 Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“	**Kapitel 5: Systematische Beschreibung des Bauteilverzugs entlang von Prozessketten**
5.3 Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“		
6.1 Handlungsempfehlungen für die Arbeitsplanerstellung	6.2 Verzugsgerechter Arbeitsplan	**Kapitel 6: Planungshilfsmittel zur Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands aus Sicht der Arbeitsplanerstellung**
7.1 Zusammenfassung	7.2 Ausblick	**Kapitel 7: Zusammenfassung und Ausblick**

Abbildung 6: Gliederungsübersicht

2 Grundlagen und Problembeschreibung

In diesem Kapitel werden zuerst die Begriffe und Grundlagen erläutert, die für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Zunächst wird detaillierter auf den Begriff Bauteilverzug eingegangen Der Bauteilverzug ist eine ungewollte Eigenschaft des Fertigungsprozesses. Der Begriff Verzug wird meist umgangssprachlich benutzt, um auszudrücken, dass sich das Werkstück verzogen hat. Für die weitere Betrachtung dieser Arbeit ist es wichtig, den Begriff Verzug exakter zu beschreiben (2.1). Es ist bekannt, dass der Bauteilverzug durch den inneren Werkstückzustand in Form des Verzugspotenzials beeinflusst wird. Der innere Werkstückzustand ist abhängig von den inneren Werkstückeigenschaften. Für das Konzept dieser Arbeit ist das Verständnis der inneren Werkstückeigenschaften von Stahlbauteilen und deren Wirkung auf den Verzug wichtig. In diesem Abschnitt erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Eigenschaften des inneren Werkstückzustands (2.2). Bei der Arbeitsplanung von besonderer Bedeutung ist das Wissen darum, welche Ergebnisse in der späteren Fertigung erzielt werden. Eine, den Verzug berücksichtigende, verzugsgerechte Arbeitsplanung hat zum Ziel, am Ende der Fertigung ein Bauteil mit möglichst geringen Abweichungen zu den geforderten Maßen aus der Konstruktionszeichnung herzustellen. Zum Verständnis dieser Arbeit ist es somit wichtig, die einzelnen Fertigungsschritte und die Komplexität der Fertigung von Stahlbauteilen aufzuzeigen, um die Berücksichtigung von Bauteilverzug in der Arbeitsplanung besser verstehen zu können. Dazu wird eine Prozesskette zur Fertigung am Beispiel eines Stahlbauteils beschrieben. Aufgrund der identifizierten Defizite im Bereich der Form ändernden Prozesse wird ebenfalls auf die einzelnen Fertigungsverfahren kurz eingegangen (2.3). Der Fertigungsprozess stellt ganz allgemein ein System dar. Zur Erarbeitung von Lösungsansätzen kann eine Systembetrachtung hilfreich sein. Zum einen geht es um das grundsätzliche Verstehen von Systemen und deren Zusammenspiel zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Zum anderen wird die Systembetrachtung gebraucht, um Wechselwirkungen berücksichtigen zu können. Zu diesem Zweck wird eine systemorientierte Betrachtung zum Thema Bauteilverzug vorgestellt (2.4). Über das Verständnis der Fertigung und deren Verfahren sowie der systemorientierten Betrachtung in Bezug auf hochfeste Stahlbauteile sind nun die Voraussetzungen für die Diskussion der Arbeitsplanung geschaffen worden. Die Arbeitsplanung wird näher beschrieben und die Bereiche der Arbeitsplanung identifiziert, bei denen eine Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands eine verzugsgerechte Planung ermöglicht (2.5). Mit diesen Grundlagen kann abschließend das Problem zusammenfassend beschrieben werden, warum der innere Werkstückzustand in der Arbeitsplanung bei den Form ändernden Prozessen nicht ausreichend berücksichtigt wird (2.6). Im Glossar sind die wichtigsten Begriffe der Übersichtlichkeit ebenfalls aufgeführt (siehe Seite 126).

2.1 Bauteilverzug

Als Bauteilverzug sollen Maß- und Formänderungen von Bauteilen verstanden werden. In dieser Arbeit wird die Definition von Maß- und Formänderungen nach [Heeß et al. 2007, S. 1] gemäß der DIN 17014 von 1975 verwendet. Dabei bezeichnet die Maßänderung „die Änderung der Maße ohne Formänderung". Unter Formänderung soll nach [Berns 1977, S. 149] (zitiert in [Heeß et al. 2007, S. 1]) „die Veränderung von Winkelbeziehungen und Krümmungen am Bauteil" verstanden werden. Die Änderung wird berechnet aus der Differenz aus den gemessenen Werten nach der abschließenden Wärmebehandlung abzüglich der Messwerte vor diesem Prozess. Der Begriff „Verzug" soll in Anlehnung an [Heeß et al. 2007, S. 1] ebenfalls rein umgangssprachlich verwendet werden, um anzudeuten, dass von Maß- und Formänderungen gesprochen wird. Meist besteht der Verzug aber aus einer Kombination aus Maß- und Formänderung.

Der Verzug kann in vermeidbaren und unvermeidbaren Verzug unterteilt werden [Heeß et al. 2007, S. 2]. Dabei wird unter dem unvermeidbaren Verzug verstanden, dass trotz idealisierter Bedingungen immer Verzug auftritt, „wenn durch die Wärmebehandlung eine Veränderung der Mikrostruktur bewirkt wird" [Heeß et al. 2007, S. 3]. Unvermeidbarer Verzug ist demnach bislang durch die Wärmebehandlungsprozesse vorgegeben und kann nur in einem begrenzten Maße beeinflusst werden. Neben der Veränderung der Mikrostruktur führen aber noch andere Änderungen des Werkstückzustands während der Wärmebehandlung zu Verzug. Diese werden z.B. durch Einflussgrößen der vorgelagerten Fertigungsprozesse beeinflusst und führen zu dem sogenannten vermeidbaren Verzug. Die Arbeit wird sich hauptsächlich mit dem vermeidbaren Verzug befassen.

2.2 Innerer Werkstückzustand von Stahlbauteilen

Stahl ist eine metallische Fe-C-Legierung, deren Hauptbestandteil aus Eisen (Fe) und einem Kohlenstoffgehalt (C) bis 2,06 Gewichtsprozent besteht [Bargel und Schulze 2000, S. 140]. Stähle haben den Vorteil, dass sie ohne weitere Nachbehandlung im allg. warmumformbar sind [Berger et al. 2001, S. E35]. Gusseisenwerkstoffe sind dagegen in der Regel spröde, sodass daraus herzustellende Bauteile nur durch Gießen und spanabhebende Verfahren ihre Form erhalten können [Bargel und Schulze 2000, S. 139]. Weitere Charakteristika von Stahl sind u.a. seine Zähigkeit, Härte, sowie seine hohe Festigkeit nach einer entsprechenden Wärmebehandlung.

Mit der Fertigstellung eines Stahlprodukts entsteht aus einem Werkstück ein Stahlbauteil. Das Werkstück kann durch seinen Zustand charakterisiert werden. Unter einem Zustand wird die Gesamtheit aller Eigenschaften verstanden, die zur Abgrenzung und Unterscheidung des Werkstücks zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Fertigung von einem anderen Zeitpunkt nötig sind. Der Zeit-

punkt kann sich auf vor oder nach einem Prozess bzw. auch während eines Prozesses beziehen. Somit ergibt sich z.B. ein Zustand vor dem Prozess (Anlieferzustand), ein Zustand während des Prozesses, der sich mit der Zeit ändert und ein Zustand nach dem Prozess (Ablieferzustand). In dieser Arbeit wird zwischen dem äußeren und dem inneren Zustand eines Werkstücks unterschieden. Äußere Zustände beziehen sich auf die Oberfläche des Werkstücks. Dies sind u.a. die geometrische Form, Rauheit, Oberflächenverunreinigungen usw. Im Gegensatz dazu bezeichnet der innere Zustand die Summe aller Eigenschaften, die sich auf das Innere eines Werkstücks, also unterhalb der Oberfläche, beziehen. Dazu kann das Innere eines Werkstücks nach [Brinksmeier 1991, S. 15] weiter in die Randzone und einen Kernbereich unterteilt werden. Innere Eigenschaften wären beispielsweise innere Spannungen oder die Gefügeverteilung. Die Eigenschaft bezeichnet allgemein ein Merkmal oder eine Besonderheit einer Sache. Durch den Zustand bzw. durch die Eigenschaften lässt sich ein Werkstück ganz allgemein beschreiben.

In dieser Arbeit sollen die Zustände bzw. Eigenschaften eines Werkstücks am Beispiel von Stahlbauteilen betrachtet werden. Die zuvor erwähnten Eigenschaften von Stahl wie Zähigkeit, Härte oder Festigkeit können als Gebrauchseigenschaften bezeichnet werden und geben in Summe den Gebrauchszustand wieder. Im Fokus dieser Arbeit steht die Betrachtung der Zustände eines Werkstücks entlang der Fertigung hinsichtlich seiner späteren Verzugsneigung. Die Eigenschaften müssen also in Summe Rückschlüsse auf die Zielgröße „Verzug“ ermöglichen. Diese Eigenschaften geben nicht den Gebrauchszustand sondern den Qualitätszustand entlang der Fertigung an. In diesem Fall kann der Zustand während der Fertigung durch ein sogenanntes Verzugspotenzial charakterisiert werden [Hoffmann et al. 2002, S. 214]. Der Begriff „Verzugspotenzial“ wird an dieser Stelle eingeführt, da dadurch der Zustand des Werkstücks bezogen auf die zu berücksichtigende Zielgröße „Verzug“ beschrieben wird. Mit dem Begriff „Potenzial“ wird der Besonderheit Rechnung getragen, dass der Verzug erst am Ende des Fertigungsprozesses sichtbar wird. Während der zurückliegenden Fertigungsschritte ist der Verzug nicht sichtbar und nur als Potenzial vorhanden. Dieses Potenzial kann dann bei der abschließenden Wärmebehandlung ausgelöst werden. Das Verzugspotenzial beinhaltet nach [Hoffmann et al. 2002, S.214] „die Summe aller Einflussmöglichkeiten, Vorgänge auszulösen, welche die Maße und Formen eines Bauteils ungünstig beeinflussen können“. Demgegenüber existiert ebenso ein so genanntes Kompensationspotenzial, dass dem Verzugspotenzial entgegenwirkt [Hoffmann et al. 2002, S.214]. Im Idealfall heben sich Verzugs- und Kompensationspotenzial auf und es wird kein Verzug ausgelöst. Übersteigt das Kompensationspotenzial das Verzugspotenzial, so führt dies ebenfalls zu Verzug. Verzugs- und Kompensationspotenzial unterscheiden sich rein rechnerisch durch unterschiedliche Vorzeichen (Verzugspotenzial „+“, Kompensationspotenzial „-“).

Im Folgenden soll angenommen werden, dass, wenn eine homogene Verteilung der Eigenschaften vorliegt, kein Verzugspotenzial vorliegt. Das Verzugspotenzial entsteht erst, wenn eine inhomogene Verteilung der Eigenschaften im Werkstück vorliegt. Des Weiteren wird angenommen, dass eine homogenere Verteilung und somit ein geringeres Verzugspotenzial zu weniger Verzug führt. Demgegenüber führt eine inhomogenere Verteilung zu einem höheren Verzugspotenzial und kann zu höherem Verzug führen. Für die Verzugsbetrachtung sind die Eigenschaften in Bezug auf ihre Verteilung im Innern des Werkstücks zu berücksichtigen. Der Zustand wird durch das Verzugspotenzial widergegeben. Bezogen auf das Verzugspotenzial sollen dessen Eigenschaften durch die Träger des Verzugspotenzials beschrieben werden. Nach derzeitigem Stand werden folgende Träger des Verzugspotenzials benannt [Hoffmann et al. 2002, S. 214] und [Surm 2011b, S. 18] (Tabelle 1):

Träger des Verzugspotenzials
• Eigenspannungsverteilung • Verteilung der chemischen Legierungselemente (Seigerungen) • Gefügeverteilung • Geometrische Verteilung • Temperaturverteilung (Zustandsgröße) • Mechanische Historie (z.B. lokale Verfestigung) (Zustandsgröße)

Tabelle 1: Werkstückeigenschaften, die Rückschlüsse auf den Verzug zulassen

Eigenspannungsverteilung: Eigenspannungen sind mechanische Spannungen, die in einem Körper herrschen, an dem keine äußeren Kräfte und Momente angreifen und der sich im thermischen Gleichgewicht befindet. Sie können durch plastische Verformungen innerhalb eines Objektes verursacht werden [Macherauch et al. 1973]. Die Eigenspannungen werden in drei Arten aufteilt:

- Eigenspannungen 1. Art (makroskopisch)
- Eigenspannungen 2. Art (über mehrere Kristalle wirkend)
- Eigenspannungen 3. Art (innerhalb eines Kristalls)

Für die Ausführungen in dieser Arbeit sind die Eigenspannungen 1. Art von Bedeutung. Eigenspannungen 1. Art sind über größere Werkstoffbereiche (mehrere Körner) nahezu homogen.

Verteilung der chemischen Legierungselemente (Seigerungen): Seigerungen sind Entmischungen einer Schmelze bei der Metallherstellung. Sie entstehen beim Übergang der Schmelze in den festen Zustand. Dabei spielen die unterschiedliche Löslichkeit der Legierungselemente in flüssiger und fester Phase und unter anderem die unterschiedliche Dichte der Legierungselemente eine Rolle. Durch Seigerungen ergeben sich unterschiedliche Werkstoff- und Werkstückeigenschaften innerhalb eines Werkstückes [Weißbach 2004, S. 106].

Gefügeverteilung: Ein Gefüge beschreibt eine mehr oder weniger dichte Mischung von Kristalliten (Körner), deren Bestandteile in vorwiegend mechanischer Wechselwirkung miteinander stehen. Das Gefüge ist ein Oberbegriff für Körner, Dichten und Phasen. „Der Verband der Körner heißt Gefüge“ [Bargel und Schulze 2000, S. 8].

Geometrische Verteilung: Die Geometrie bezieht sich auf die durch die Konstruktion vorgegebene Sollgeometrie und ist eigentlich ein äußerlich sichtbarer Zustand eines Werkstücks. Hier geht es aber um die Vorstellung, über die Geometrie auf die innere Verteilung der Masse zu schließen. Über die Beziehung der Dichte, die ein Maß für die Masse pro Volumen darstellt, kann der Verzugspotenzialträger Geometrie über die Dichteverteilung charakterisiert werden.

Temperaturverteilung: Die Zustandsgröße Temperatur tritt z.B. auf, wenn ein Werkstück nicht gleichmäßig abgekühlt ist (z.B. ungleichmäßiges Abkühlen eines Rings nach dem Walzen in einer Gitterbox) und bereits wieder erwärmt wird (z.B. ungleichmäßig abgekühlter Ring wird GKZ-geglüht). Zustandsgrößen beschreiben alle Vorgänge in einem Bauteil.

Mechanische Historie: Die Zustandsgröße mechanische Historie kann z.B. durch die lokale Verfestigung beschrieben werden [Surm 2011b, S. 18]. Die Verfestigung ist ein Maß für den Widerstand gegen plastische Verformung [Bergmann 2008, S. 141]. Die mechanische Historie beginnt dort, wo die plastische Verformung eintritt (siehe auch Bauschingereffekt). Die plastische Verformung kann lokal im Werkstück unterschiedlich sein. Über diese Verteilung kann die Zustandsgröße während eines Prozesses beschrieben werden.

Für das Kompensationspotenzial gilt analog, dass die Eigenschaften ebenfalls durch die Träger des Kompensationspotenzials beschrieben werden. Im Weiteren wird überwiegend von den Trägern des Verzugspotenzials gesprochen, weil die Träger des Kompensationspotenzials durch einfache Vorzeichenumkehr in die Träger des Verzugspotenzials umgerechnet werden können. Die Gesamtheit aller Verzugspotenzialträger pro Prozessschritt trägt durch ihre Ausprägung zum

gesamten Verzugspotenzial eines Prozessschrittes bei, analog zu der Betrachtung zwischen Zustand und dessen Eigenschaften. In weiterer Analogie bedeutet eine homogene Verteilung der Verzugspotenzialträger, dass kein Verzugspotenzial vorhanden ist. Erst mit einer inhomogenen Verteilung der Verzugspotenzialträger entsteht ein Verzugspotenzial, welches nach der Wärmebehandlung zu Verzug führen kann.

2.3 Prozesskette zur Fertigung hochfester Stahlbauteile in der Antriebstechnik

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden in dieser Arbeit hochfeste Stahlbauteile betrachtet, da sie zur Erreichung ihrer Aufgabenerfüllung und somit ihrer Gebrauchseigenschaften meist gehärtet werden und dies zu Verzug führt. Unter hochfesten Bauteilen sollen hier z.B. Wälzlagerringe, Zahnräder für Getriebe und Wellen verstanden werden (Abbildung 7).

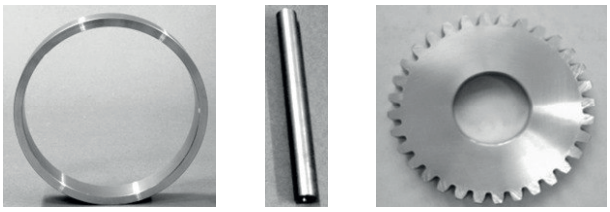


Abbildung 7: Beispiele für hochfeste Bauteile

Zu den verwendeten Stahlsorten zählen u.a. Baustähle, Vergütungsstähle, Wälzlagerstähle und Einsatzstähle [Bargel und Schulze 2000, S. 204]. Die Fertigung von hochfesten Stahlbauteilen erfolgt in mehreren Prozessen. Neben der Prozesskette der Ringfertigung in Abbildung 5, zeigt Abbildung 8 eine Prozesskette zur Fertigung hochfester Bauteile am Beispiel der Zahnradfertigung. Im Groben unterscheiden sich die zwei Prozessketten darin, dass das Zahnrad FP-geglüht und nicht GKZ-geglüht wird, beim Schmieden nicht gewalzt wird, bei der Weichbearbeitung einem Wälzfräsprozess unterzogen wird und bei der abschließenden Wärmebehandlung zusätzlich aufgekohlt wird. Die anderen Prozesse sind weitestgehend identisch. Hochfeste Stahlbauteile müssen besonders ausgeprägte Gebrauchseigenschaften aufweisen. Dies sind vor allem Kräfte und Momente übertragen sowie einen geringen Verschleiß besitzen. Dazu müssen sie besondere Bauteileigenschaften aufweisen wie hohe Festigkeit und eine hohe Härte. Festigkeit stellt eine Werkstoffeigenschaft dar und beschreibt den mechanischen Widerstand, den ein Werkstoff einer plastischen Verformung oder Trennung entgegensetzt. Härte ist der mechanische Widerstand, den ein Werkstoff der mechanischen Eindringung eines härteren Prüfkörpers entgegensetzt. Festigkeit und Härte werden bereits mit der Auswahl der chemischen Zusammensetzung vorgegeben.

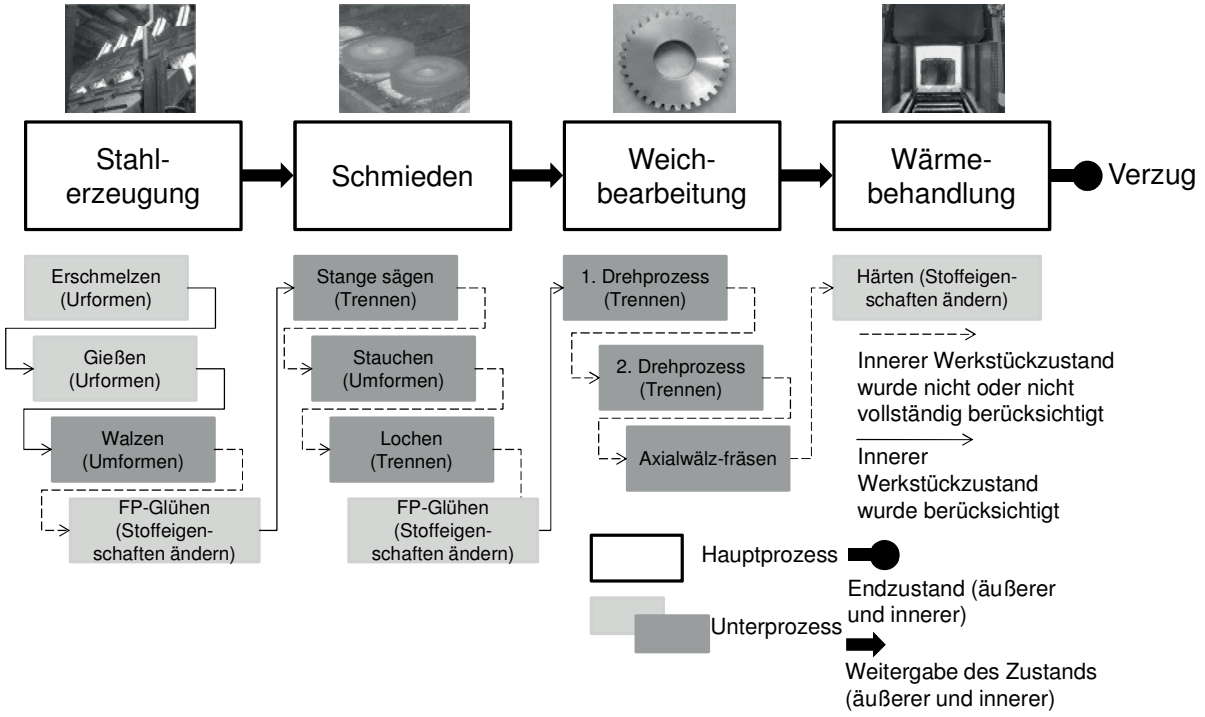


Abbildung 8: Beispielhafte Prozesskette zur Fertigung hochfester Bauteile am Beispiel der Zahnradfertigung

D.h., der Anteil von Kohlenstoff bzw. der Legierungselemente wie Chrom, Mangan usw. legt die maximale Festigkeit, Härte (in Form der Härtbarkeit des Werkstoffs) und weitere Bauteileigenschaften fest [Fischer et al. 2005]. Festigkeit und Härte sind aber auch prozessabhängig. Um eine höhere Festigkeit zu erzielen, werden diese Bauteile u.a bei der Stahlerzeugung mehrfach umgeformt. Dabei kann eine höhere Festigkeit u.a durch die Verringerung von Lunkern und Poren und durch speziell hergestellte Faserverläufe erreicht werden. Eine maximale Härte wird durch die abschließende Wärmebehandlung sichergestellt. Eine typische Form der Härtung für hochfeste Stahlbauteile ist u.a. das martensitische Härten. Dazu werden die Werkstücke entlang einer Zeit-Temperaturfolge auf Austenitisiertemperatur erwärmt und so abgeschreckt, dass am Ende des Prozesses, je nach Werkstoff, das Gefüge überwiegend aus Martensit besteht. Dieses Gefüge zeichnet sich durch eine besondere Härte aus.

Bislang wurde vor allem die Einstellung der inneren Eigenschaften wie Festigkeit und Härte besprochen. Neben diesen inneren Eigenschaften muss auch die äußere Eigenschaft der Geometrie hergestellt werden. Dies wird im Besonderen durch die Form ändernden Prozesse „Umformen“ und „Trennen“ erreicht (siehe auch [Westkämper und Warnecke 2004, S. 7]). Die Entscheidung, ein Werkstück zu schmieden (Umformprozess) oder evtl. aus dem Vollen zu drehen (Trennprozess), ist Stückzahl abhängig und wird aus wirtschaftlichen Gründen entschieden. Wird das Schmieden, wie in den Beispielprozessketten gezeigt,

durchgeführt, wird versucht, möglichst endformnah zu schmieden, um Kosten bei der Weichbearbeitung zu sparen. Somit dienen die Umform- und Trennprozesse in den gezeigten Prozessketten vor der Weichbearbeitung primär als Vorbereitung für die Erreichung der endgültigen Geometrie beim Drehen und/oder Fräsen. Die Weichbearbeitung findet statt, damit nach dem Härten nicht zu viel abgeschliffen werden muss.

Durch diesen Abschnitt sollte motiviert und begründet werden, welche Prozesse zur Fertigung von hochfesten Bauteilen typischerweise durchgeführt werden. Es wurde ersichtlich, dass die inneren Eigenschaften vor allem im Stahlwerk beim Gießen (chemische Zusammensetzung) und beim Härten (Martensit) eingestellt werden. Die äußeren, geometrischen Eigenschaften werden durch die Form ändernden Prozesse erreicht.

2.4 Systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs

Aufgrund der Tatsache, dass sich Verzugspotenziale aufbauen und wechselwirken und u.a. erst am Ende ausgelöst werden, müssen auch die vor- und nachgelagerten Hauptprozesse sowie deren Unterprozesse betrachtet werden (vgl. z.B. Abbildung 8). Somit kann eine Herangehensweise an das Problem „Verzug“ nur durch eine systemorientierte Betrachtung erfolgreich und vollständig sein. Der Verzug ist eine Systemeigenschaft und nicht eine Eigenschaft eines einzelnen Prozesses. Diese Aussage findet sich z. B. in [Bausch et al. 2006, S. 382]. Hier heißt es: „Die Formänderung und insbesondere der beeinflussbare Verzug sind eine Systemeigenschaft, bei der alle Einflussfaktoren mehr oder weniger stark mitwirken“. In [Volkmuth 2005a, S. 60] wird darauf hingewiesen, dass Maß- und Formänderungen durch eine Systembetrachtung und geeignete Maßnahmen in allen am Fertigungsprozess beteiligten Bereichen erheblich reduziert werden können. Auch in anderen Veröffentlichungen wird das Verzugsphänomen als sog. Systemeigenschaft verstanden [Heeß et al. 2007, Vorwort zur 1. Auflage] und [Hoffmann et al. 2002, S. 214], welches von einer Vielzahl sich z. T. gegenseitig beeinflussender Größen abhängt. Aufgrund dieser Zusammenhänge wurde die Arbeit aus der systemorientierten Betrachtungsweise heraus geschrieben.

In der Systemtheorie, die einen holistischen Ansatz verfolgt, wird angenommen, dass trotz des Verständnisses der Einzelteile das Ganze doch neue, unvorhersehbare Eigenschaften und Verhaltensweisen aufzeigen kann [Pulm 2004, S. 15]. Wichtig ist, dass die Planung und Berücksichtigung eines Bauteils hinsichtlich seiner Verzugstendenz für den gesamten Fertigungsprozess geplant wird und nicht nur für einzelne Haupt- bzw. Unterprozesse.

Im Folgenden wird das System „Verzug“ aus systemorientierter Sicht vorgestellt. Abbildung 9 a) zeigt zunächst die allgemeine Systembeschreibung.

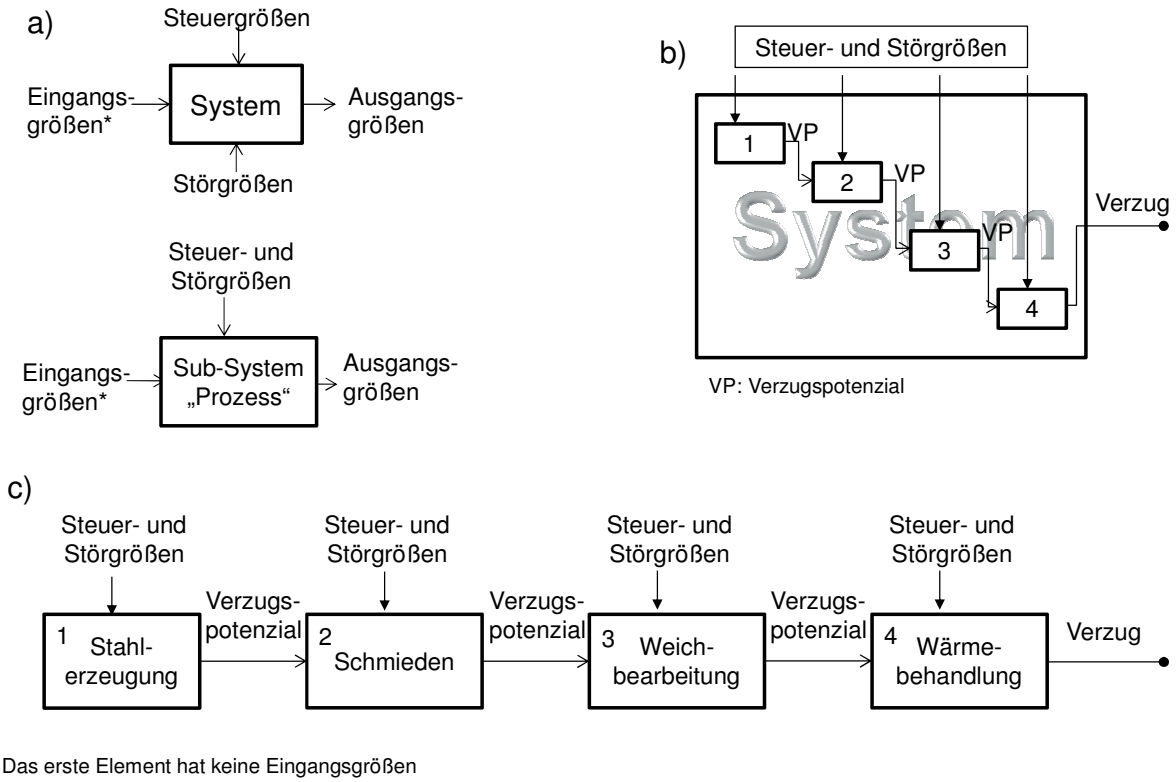


Abbildung 9: System „Verzug“ und Prozessbetrachtung

In ein System gehen Eingangsgrößen ein und Ausgangsgrößen hinaus. Über Steuergrößen können die Ausgangsgrößen gezielt verändert werden. Größen, die nicht bekannt sind, gehen als Störgrößen in das System ein. Ein System kann in Subsysteme aufgeteilt werden (siehe Abbildung 9 a) unten). In Abbildung 9 b ist das Sub-System „Prozess“ im System dargestellt. Abbildung 9 c zeigt die vier Sub-Systeme Stahlerzeugung, Schmieden, Weichbearbeitung und Wärmebehandlung aus der Sicht der Prozessbetrachtung. Diese Darstellung ist bereits aus Abbildung 5 und Abbildung 8 bekannt.

Nach DIN 19226 Teil 1 [N.N. 1994, S. 3] wird ein **Prozess** definiert als „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder auch Information umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird“. Der technische Prozess wird mithilfe von Einflussgrößen (hier Steuergrößen) gesteuert und liefert Ergebnisgrößen. Materie, Energie und Information fließt zu bzw. ab. Bezogen auf das System „Verzug“ und die besondere Betrachtung des Werkstückzustands bedeutet dies, dass Steuergrößen während eines Prozesses den äußeren und inneren Zustand und somit das Verzugspotenzial ändern und am Ende die Ergebnisgröße bzw. Ausgangsgröße Verzug beeinflussen.

Abbildung 10 a-c verdeutlicht den Zusammenhang der Sub-Systeme „Prozess“ und „Werkstück“.

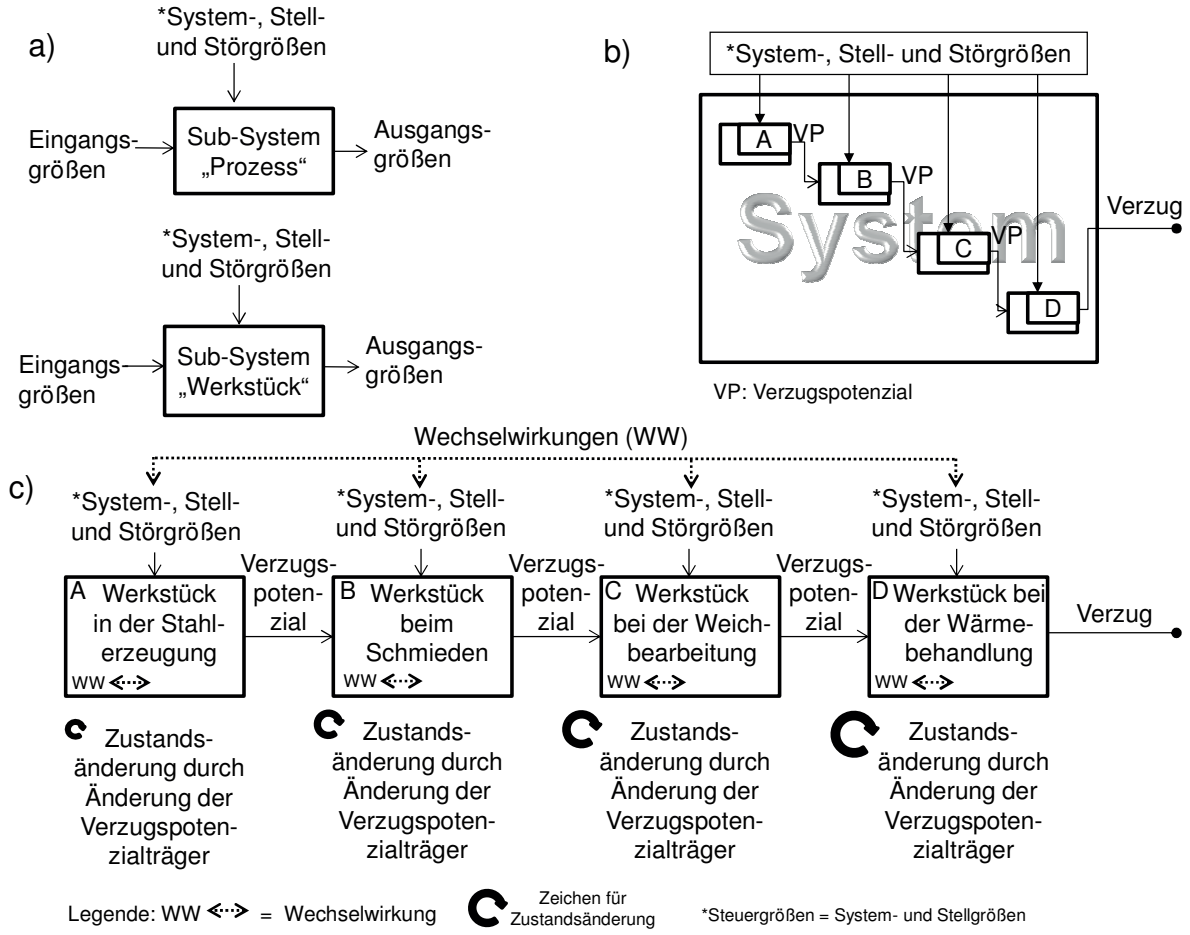


Abbildung 10: Prozesssicht und Werkstücksicht im System „Verzug“

Aus Abbildung 10 b) wird deutlich, dass die Änderung des Werkstückzustands (= Änderung der Verzugspotenzialträger) immer aus Sicht eines Prozesses erfolgt. Das verbindende Glied zwischen System, Prozess und Werkstück sind jeweils die Eingangs- und Ausgangsgrößen (Verzugspotenzial und am Ende der Verzug) sowie die Steuer- und Störgrößen. Der Vollständigkeit halber sind die Störgrößen in Abbildung 10 ebenfalls aufgeführt. Werden die Störgrößen nicht erwähnt oder nicht in einer Abbildung abgebildet, stehen die Steuergrößen im Fokus der Betrachtung, obgleich Störgrößen zur Betrachtung von Systemen immer dazu gehören. Weiterhin wurden für die Steuergrößen die Begriffe System- und Stellgrößen eingeführt. Diese Begriffe werden für den nächsten Abschnitt der Arbeitsplanung benötigt. In Anlehnung an [Brinksmeier 1991, S. 26] und [Brinksmeier 1999, S. 151] sollen unter Systemgrößen eines Fertigungsprozesses Maschine, Werkstück, Werkzeug, Kühlschmierung usw. verstanden werden. Ebenfalls in Anlehnung daran sollen unter einer Stellgröße die Größen eines Fertigungsprozesses verstanden werden, die für den Prozess z. B. an einer Maschine eingestellt werden können. Dies sind u.a. Temperatur, Umformgrade, Schnittparameter usw. Stellgrößen lassen sich direkt an den Maschinen bzw. Werkzeugen usw. einstellen.

Einen weiteren Einfluss auf das System „Verzug“ besitzen die Wechselwirkungen (siehe Abbildung 10c, im Sinne von gegenseitiger Abhängigkeit). Wechselwirkungen führen zu Änderungen von Zustandsgrößen durch andere Zustandsgrößen während eines Prozesses. Man spricht aber auch von Wechselwirkungen, wenn die System- und Stellgrößen eines Fertigungsprozesses, im Zusammenspiel mit den System- und Stellgrößen eines anderen Fertigungsprozesses, einen Einfluss auf das Ergebnis dieses anderen Fertigungsprozesses besitzen.

Innerhalb des Systems „Verzug“ wirken die System- und Stellgrößen, deren Anzahl sich entlang der Fertigung von Prozess zu Prozess erhöht, sowie die Wechselwirkungen auf das Sub-System „Werkstück“ ein. Diese Größen beeinflussen und verändern die Verzugspotenzialträger bei jedem einzelnen Prozessschritt. Die Veränderung der Verzugspotenzialträger führt zu einer Zustandsänderung (runder Pfeil in Abbildung 10), wodurch sich das Verzugspotenzial pro Prozess ändert. Während des letzten Prozesses, der abschließenden Wärmebehandlung, wird das kumulierte Verzugspotenzial ausgelöst und als Bauteilverzug sichtbar. Abbildung 9 und Abbildung 10 sollen weiterhin verdeutlichen, dass, wenn nur ein Prozess, z.B. das Schmieden, nicht im System berücksichtigt wird, Informationen über das Verzugspotenzial fehlen und eine exakte Verzugsbestimmung nicht möglich ist.

2.5 Arbeitsplanung in der mechanischen Fertigung

In diesem Abschnitt sollen zunächst die unmittelbaren Aufgabenbereiche der Arbeitsplanung identifiziert werden, die die System- und Stellgrößen planen und somit den Werkstückzustand und die Verzugspotenzialträger beeinflussen. Um dies weiter zu detaillieren, werden weiterhin die Tätigkeiten innerhalb der Aufgabenbereiche aufgezeigt. Hierbei geht es darum zu zeigen, welche Tätigkeiten direkten Einfluss auf die System- und Stellgrößen besitzen und welche Planungshilfsmittel an diesen Stellen verwendet werden können. Gleichzeitig werden die einzelnen Bereiche erklärt.

In der Regel sind immer mehrere Unternehmen an der Fertigung von hochfesten Bauteilen beteiligt. Eine Arbeitsplanung, die detailliert eine ganze Prozesskette in einem Unternehmen plant, gibt es nicht (siehe hierzu Abbildung 11 a). Eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsplanung findet sich dagegen in der Literatur oft aus Sicht der Weichbearbeitung (siehe auch 1.2). Die Arbeitsplanung wird im Folgenden aus dieser Sicht beschrieben (siehe Abbildung 11 b). Ganz allgemein wird die Planung und Festlegung der Fertigung und Montage von Produkten bzw. Bauteilen nach [Eversheim 2002, S. 2] in der Arbeitsvorbereitung durchgeführt. In Anlehnung an die Definition des Ausschusses für wirtschaftliche Fertigung (AWF) wird die Arbeitsvorbereitung in Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung untergliedert ([N.N. 1968] zitiert nach [Eversheim 2002, S. 3]).

Die Arbeitssteuerung gibt vor, wie viel, wann, wo und durch wen herzustellen ist [Eversheim und Schuh 1999; S. 7-73]. Da die Arbeitssteuerung nicht im Fokus dieser Arbeit steht, wird im Weiteren nur die Arbeitsplanung betrachtet.

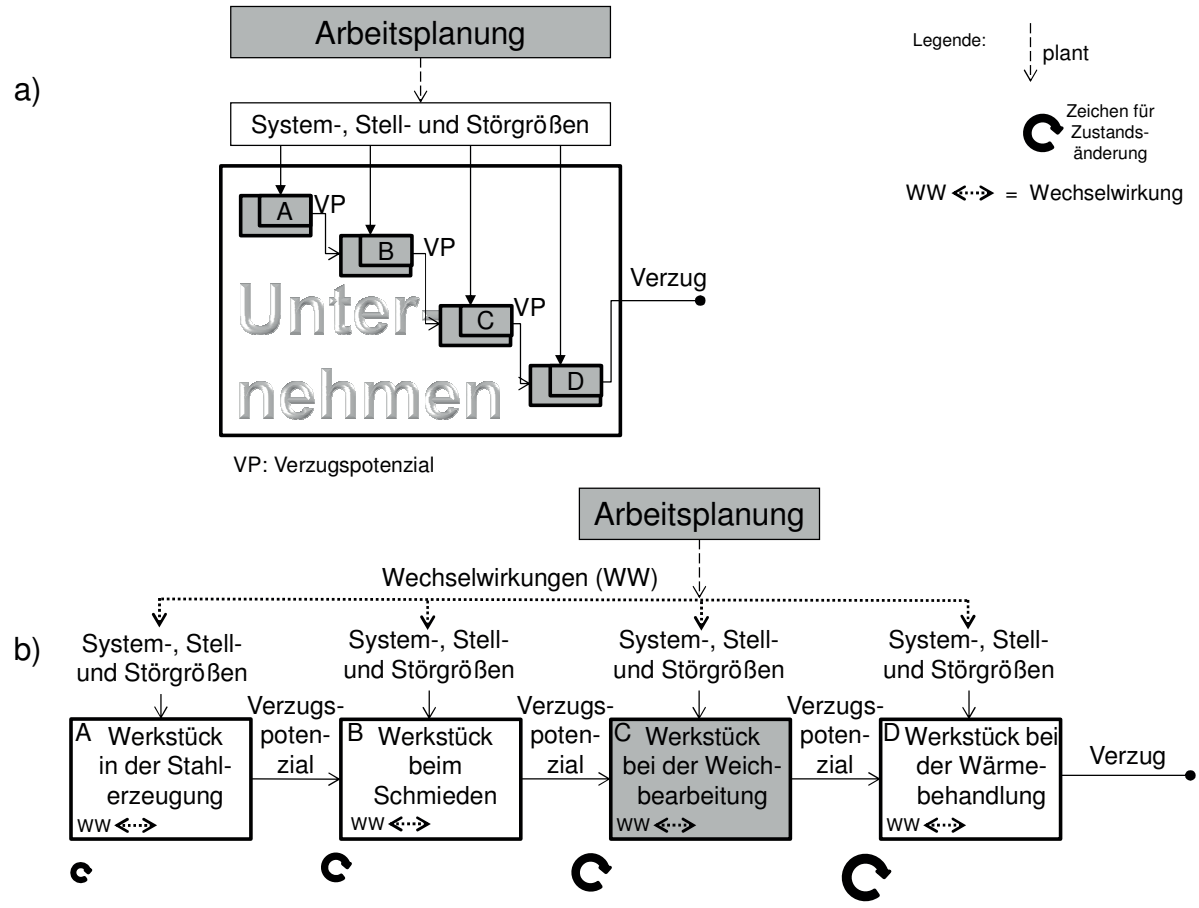


Abbildung 11: Arbeitsplanung aus Sicht der Weichbearbeitung

Die Arbeitsplanung umfasst einmalig durchzuführende Planungsmaßnahmen, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Herstellung eines Erzeugnisses sichern. Die Arbeitsplanung legt fest, was, wie und womit hergestellt werden soll [Eversheim und Schuh 1999; S. 7-73] (siehe Abbildung 12). Die Arbeitsplanung kann nach [Eversheim 2002, S. 7] weiterhin nach ihrer Fristigkeit unterteilt werden. Kurz- und mittelfristige Tätigkeiten werden in der Arbeitsablaufplanung (auch Prozessgestaltung genannt) zusammengefasst. Langfristige Tätigkeiten gehören zur Arbeitssystemplanung. Das Ergebnis der Arbeitsablaufplanung ist u.a. der Arbeitsplan für die anschließende Fertigung während das Ergebnis der Arbeitssystemplanung z.B. die Investitionsplanung oder auch die Arbeitsplatzgestaltung beinhalten.

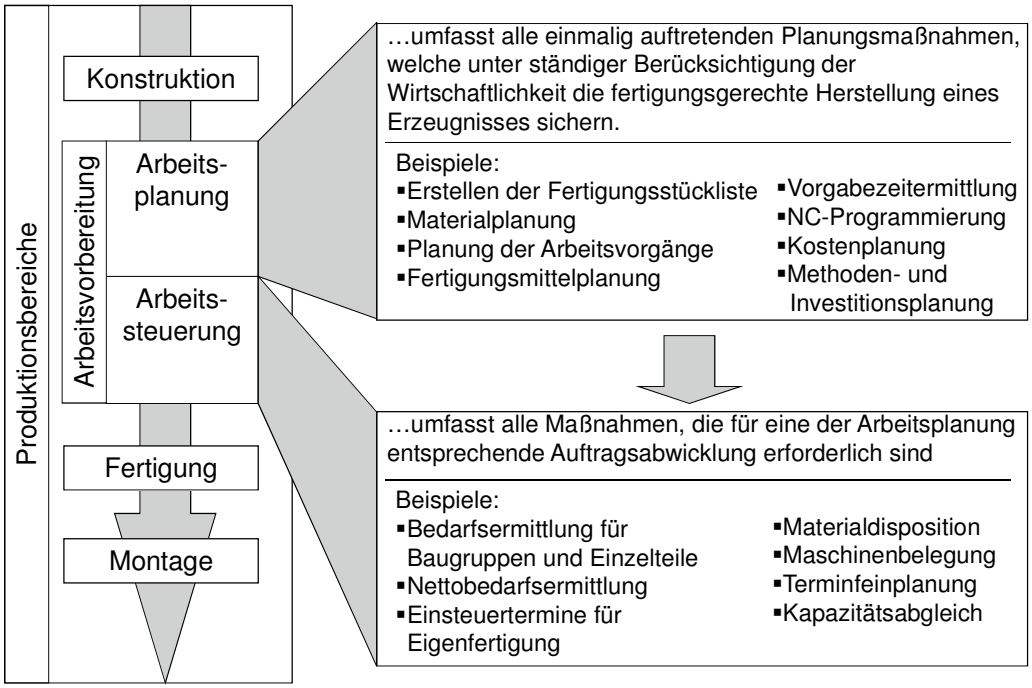


Abbildung 12: Einordnung der Arbeitsplanung innerhalb der Produktionsbereiche [Eversheim 2002, S. 2]

Für die Aufgabenstellung dieser Arbeit sind die Tätigkeiten der Arbeitsplanung relevant, die einen unmittelbaren Einfluss auf die spätere Fertigung des Werkstücks besitzen. Dies ist im Aufgabenbereich der Arbeitsablaufplanung der Fall. Innerhalb der Arbeitsablaufplanung gibt es nach [Eversheim 2002, S. 18] folgende Aufgabenbereiche (Tätigkeiten) (siehe Abbildung 13):

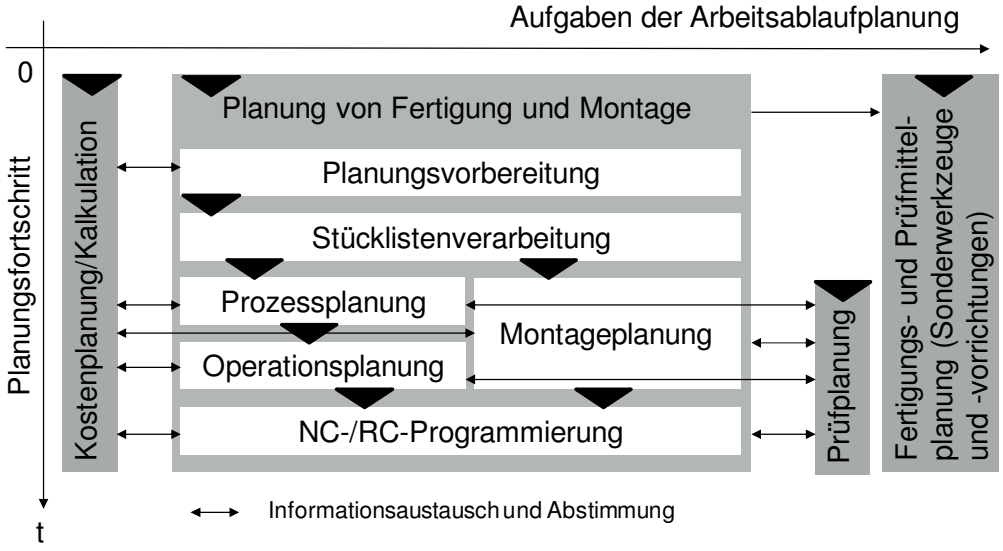


Abbildung 13: Zeitlicher Ablauf der Tätigkeiten in der Arbeitsablaufplanung nach [Eversheim, S. 18]

Die Aufgabenbereiche Prozessplanung und Operationsplanung stellen die unmittelbaren Bereiche dar, die die System- und Stellgrößen planen. Bei der NC-/RC-Programmierung werden im Wesentlichen die Planungen aus der Operationsplanung in Programmcode übersetzt und somit findet hier meist keine weitere Planung mehr statt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird auf die NC-/RC-Programmierung nicht weiter eingegangen.

Hauptsächliches Ziel der Prozessplanung ist die Erstellung eines zur Fertigung des Bauteils geeigneten Arbeitsplans auf Grundlage einer Konstruktionszeichnung. Im Rahmen der Operationsplanung werden die Arbeitsplaninformationen weiter detailliert. Die Arbeitsplanung ist somit das Bindeglied zwischen der funktionalen und geometrischen Festlegung des Bauteils durch die Konstruktion und seiner Realisierung durch die Fertigung. Bei der Prozessplanung werden für die Bearbeitungsaufgabe alle erforderlichen Bearbeitungsprozesse sowie deren Reihenfolge festgelegt. Die Ergebnisse der Prozessplanung werden in einem Arbeitsplan dokumentiert. Die Prozessplanung kann nach [REFA 1985, S. 183-187] und [Eversheim 2002, S. 23ff] in die im Folgenden aufgeführten grundlegenden Teilaufgaben unterschieden werden:

1) Ausgangsteil- / Rohteilbestimmung

2) Prozessfolgeermittlung

3) Fertigungsmittelauswahl

4) Vorgabezeitermittlung

Ausgangsteilbestimmung

Bei der Ausgangsteilbestimmung (auch Rohteilbestimmung genannt), wird die Rohteilart und –abmessung der Werkstücke festgelegt [Eversheim 2002, S. 25 ff]. Unter einem Rohteil wird das Werkstück verstanden, bevor es in die Fertigung kommt. Im Falle einer Lagerringfertigung ist das Ausgangsteil z. B. ein Schmiederohling. Dieser wird zuerst aus Stangenmaterial hergestellt; u.a. gesägt und anschließend geschmiedet und gewalzt (vgl. Abbildung 5). In der Regel wird der Werkstoff bei der Konstruktion festgelegt, da die Gebrauchs- und Fertigungseigenschaften wie Werkstückfestigkeit, Härte u.ä. entscheidend von den Werkstoffeigenschaften abhängen. Bei der Ausgangsteilbestimmung geht es darum, das Rohteil mit dem vorgegebenen Werkstoff zu fertigen. Die bei der Ausgangsteilbestimmung zu berücksichtigenden Kriterien zur Fertigung können in die Gruppen technologische, wirtschaftliche und zeitliche gegliedert werden (siehe Abbildung 14).

Abbildung 14: Kriterien zur Ausgangsteilbestimmung [Eversheim 2002, S. 26]

Für die Verzugsbetrachtung von besonderem Interesse sind die technologischen Kriterien. Technologische Kriterien sind Merkmale, die eine Aussage bzgl. der Fähigkeit einer Technologie ermöglichen, ob das Werkstück mit dieser Technologie bearbeitet und in die geometrische äußere Form überführt werden kann. Diese Merkmale betreffen z.B. den Werkstoff in Form der Zusammensetzung des Gefüges. Über diese Merkmale können Härte und Festigkeit usw. bestimmt werden. Durch diese Information kann entschieden werden, welche Technologie bzw. welches Verfahren (Maschine, Werkzeug) eingesetzt werden kann, um die äußere Form herzustellen. Merkmale der äußeren Form sind Gestalt und Oberfläche. Insgesamt kann über die Berücksichtigung der technologischen Kriterien entschieden werden, welches bzw. welche Verfahren geeignet sind, den Werkstoff zu bearbeiten, um die äußere Form und Oberflächenqualität herzustellen.

Prozessfolgeermittlung

Prozessfolge bedeutet nach [Eversheim 2002, S. 27] für die mechanische Fertigung z. B., dass Rohteile schrittweise mithilfe der zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel in die herzustellenden Einzelteile umgewandelt werden. Durch die Festlegung der Prozesse und ihrer Reihenfolge werden Fertigungskosten, -zeit und –qualität entscheidend beeinflusst. Auch bei der Prozessfolgeermittlung werden die Prozesse nach technologischen, ökonomischen und zeitlichen Kriterien ausgewählt. Ein Beispiel für die Auswahl nach technologischen Kriterien ist die erreichbare gemittelte Rauhtiefe in Abhängigkeit der Fertigungsverfahren.

Fertigungsmittelauswahl

Nach [Eversheim 2002, S. 70] sind Fertigungsmittel nach VDI „Mittel zur direkten oder indirekten Form-, Substanz- oder Fertigungszustandsänderung mechanischer oder chemisch-physikalischer Art“ definiert. Die Fertigungsmittel sind Bestandteil der Betriebsmittel, zu denen nach dem Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung (AWF) „alle beweglichen und unbeweglichen Mittel gehören, die zur Leistungserstellung dienen“ [Steinbuch 1999, S. 137]. Fertigungsmittel sind

- Maschinen (Werkzeugmaschinen)
- Werkzeuge und
- Vorrichtungen

Bei der Maschinenauswahl werden ebenfalls technologische Kriterien berücksichtigt. Unter den technologischen Kriterien werden die

- Arbeitsraummaße,
- Leistungsdaten,
- Maschinenfähigkeit und
- Einsatzschwerpunkte der Maschine

herangezogen [Eversheim 2002, S. 33], um zu beurteilen, ob das betreffende Werkstück mit dem geplanten Prozess auf der Maschine bearbeitet werden kann.

Vorgabezeitermittlung

Durch die Vorgabezeitermittlung kann ein Prozess ökonomisch bewertet werden. Es wird hierbei die Soll-Zeit bestimmt bzw. abgeschätzt. Nach [Eversheim 2002, S. 39] wird die Vorgabezeitermittlung auf Prozessplanungsebene unter Nutzung von Erfahrungswerten bzw. früher aufgenommenen Zeitreihen durchgeführt. Die Zeitermittlung wird dann im Rahmen der Operationsplanung weiter detailliert, da hier exakte Schnittparameter bekannt sind.

Operationsplanung

Die Operationsplanung stellt eine weitere Detaillierung der Prozessplanung dar und kann nach [Eversheim 2002, S. 51] in die folgenden sechs Teilaufgaben unterteilt werden:

- Spannlagenbestimmung und Spannmittelplanung

- Optimierung der Operationsreihenfolge
- Optimierung der Schnittwerte
- Schnittstrategiebestimmung
- Werkzeugbestimmung
- Auswahl der Bearbeitungsbereiche / Operationsbestimmung

Abbildung 15 fasst alle Teilaufgaben der Prozess- und Operationsplanung zusammen.

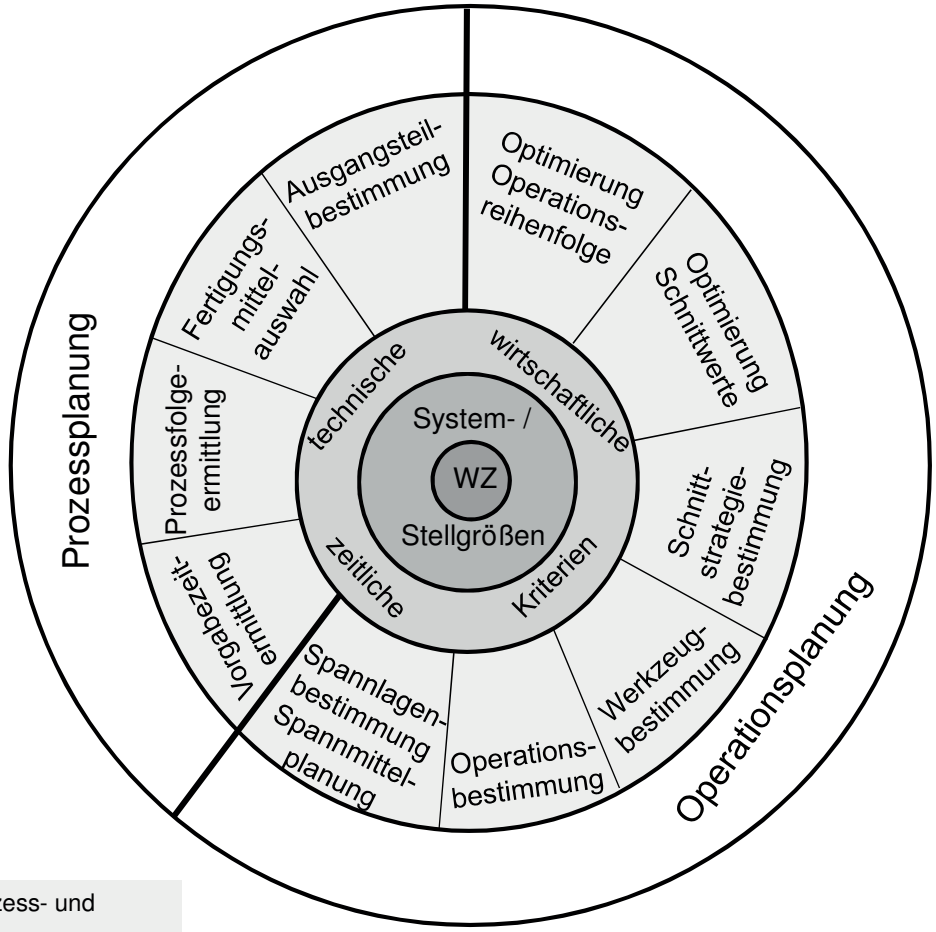


Abbildung 15: Teilaufgaben der Prozess- und Operationsplanung im Zusammenhang mit der Beeinflussung des Werkstückzustands

Für die weitere Ausarbeitung sollen Prozess- und Operationsplanung gemeinsam betrachtet werden. Es folgt eine Zuordnung der Teilaufgaben der Operationsplanung zu den Teilaufgaben der Prozessplanung. Spannlagenbestimmung, Spannmittelplanung und Werkzeugbestimmung werden der Fertigungsmittelauswahl zugeordnet. Optimierung der Operationsreihenfolge sowie die Auswahl der Bearbeitungsbereiche / Operationsbestimmung betreffen die Prozessfolgeermittlung. Die Teilaufgaben Optimierung der Schnittwerte und Schnittstrategiebestimmung sollen in der neuen Teilaufgabe „Einstellparameterermittlung“ zusammengefasst werden. Unter dem Gesichtspunkt einer gemeinsamen Aufgabenerfüllung von Prozess- und Operationsplanung ergeben sich, abweichend von REFA, fünf Teilaufgaben, die je nach Detaillierungsgrad zur Erstellung eines vollständigen Arbeitsplans benötigt werden:

1) Ausgangsteilbestimmung

2) Prozessfolgeermittlung

3) Fertigungsmittelauswahl

4) Einstellparameterermittlung

5) Vorgabezeitermittlung

Diese Aufgaben stellen im Weiteren die Teilaufgaben der Arbeitsplanerstellung dar.

Nach der Beschreibung der Teilaufgaben sollen nachfolgend die Tätigkeiten zusammengefasst werden, die unmittelbar den inneren Werkstückzustand beeinflussen (siehe Abbildung 16). Es geht um Tätigkeiten, die die System- und Stellgrößen festlegen. Diese werden festgelegt durch Rohteil, Fertigungsprozesse, Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge und Schnittwerte.

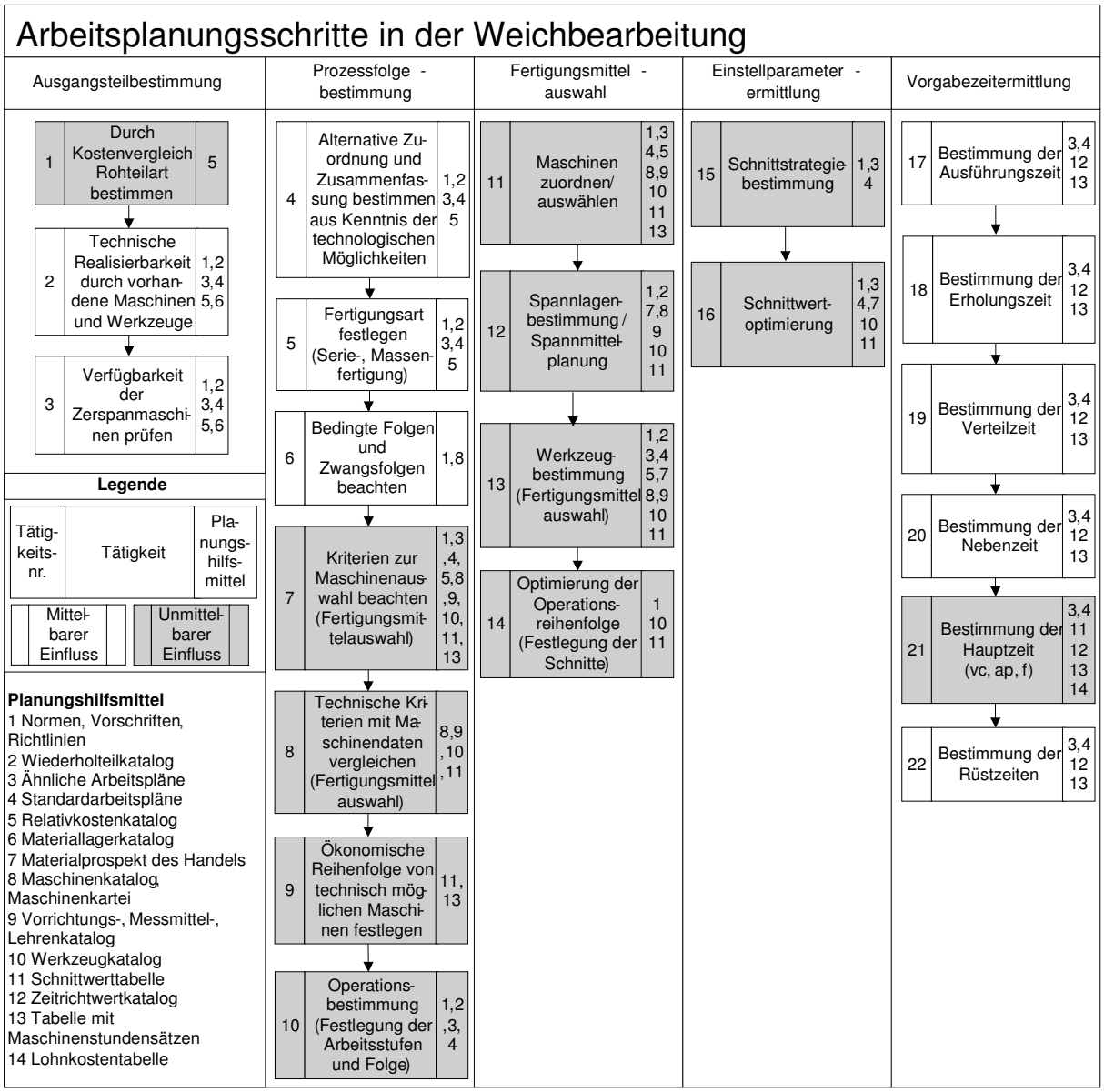


Abbildung 16: Tätigkeiten mit unmittelbarem Einfluss auf den Werkstückzustand

Abbildung 16 zeigt, dass die Tätigkeiten 1, 7-16 und 21 einen unmittelbaren Einfluss auf den inneren Werkstückzustand besitzen. Die anderen Tätigkeiten haben nur einen mittelbaren Einfluss. Insbesondere zeigt Abbildung 16 Tätigkeiten, die innerhalb einer Neuplanung für ein Bauteil durchgeführt werden. Insgesamt werden in der Literatur je nach Änderungsbedarf der Arbeitspläne und Planungsaufwand hauptsächlich vier unterschiedliche Planungsarten definiert [Eversheim 2002, S. 18] (siehe Tabelle 2). Für die aufgezählten Planungsarten nehmen der Erstellungsaufwand und der Neuheitsgrad von 1 nach 4 zu. Gleichzeitig verringert sich die fertigungstechnische Ähnlichkeit der Bauteile.

Nr.	Planungsarten	Explanation
1	Wiederholplanung	Der Arbeitsplan und somit die System- und Stellgrößen werden nicht geändert. Es verändern sich nur organisatorische bzw. auftragsbezogene Daten.
2	Variantenplanung	Wird für Bauteile von Teilefamilien durchgeführt. Die System- und Stellgrößen werden in definierten Grenzen geändert.
3	Anpassungsplanung	System- und Stellgrößen müssen für Teile des Arbeitsplans wegen Hinzufügen, Löschen oder Ändern einzelner Fertigungsprozesse neu geplant werden.
4	Neuplanung	Eine neue Prozesskette muss geplant werden. System- und Stellgrößen werden durch alte Arbeitspläne, Fertigungskataloge, Expertenwissen usw. bestimmt.

Tabelle 2: Planungsarten zur Erstellung von Arbeitsplänen

Abbildung 16 zeigt die meisten Tätigkeiten im Sinne der Vollständigkeit zur Erstellung eines Arbeitsplans gegenüber den anderen Planungsarten. Alle diese Tätigkeiten müssen den technologischen, ökonomischen und zeitlichen Kriterien genügen. Abbildung 17 zeigt Planungshilfsmittel zur Berücksichtigung dieser Kriterien in der Arbeitsplanung [Schuh 2011, S. 11] und [Geipel und Hentschel 2001, S. 16, 32, 36,40, 41, 60].

	Planungshilfsmittel													
Teilaufgaben	Normen, Vorschriften, Richtlinien	Wiederholteilkatalog	Ähnliche Arbeitspläne	Standardarbeitspläne	Relativkostenkatalog	Materiallagerkatalog	Materialprospekt des Handels	Maschinenkatalog, Maschinenkarte	Vorrichtungs-, Messmittel, Lehrenkat.	Werkzeugkatalog	Schnittwerttabelle	Zeitrichtwertkatalog	Tabelle mit Maschinenstundensätzen	Lohnkostentabelle
Ausgangsteilbestimmung	●	●	●	●	●	●								
Prozessfolgebestimmung	●	●	●	●	●			●					●	●
Fertigungsmittelauswahl	●		●	●	●			●	●	●	●		●	
Einstellparameterermittlung	●	●					●	●	●	●	●			
Vorgabezeitermittlung	●		●	●							●	●		

Abbildung 17: Anwendung von Planungshilfsmitteln in der Arbeitsplanung in Anlehnung an [Schuh 2011, S. 11] und [Geipel und Hentschel 2001, S. 16, 32, 36,40, 41, 60]

2.6 Zusammenfassung der Problembeschreibung

Auf Basis der zuvor beschriebenen Grundlagen wird in diesem Abschnitt das Problem zusammenfassend beschrieben. Ausgangspunkt der Problembeschreibung ist, dass der Verzug aus einer systemorientierten Sichtweise als eine Systemeigenschaft betrachtet werden muss. Dies bedeutet, dass der Verzug zu jedem Zeitpunkt bei der Planung zu berücksichtigen ist. Nach der in dieser Arbeit verwendeten Definition ist der Verzug vor der abschließenden Wärmebehandlung nicht sichtbar. Um den Verzug dennoch in den vorherigen Prozessen in der Planung zu berücksichtigen, muss der Werkstückzustand zu jedem Zeitpunkt in der Prozesskette antizipiert werden können (siehe Beispielprozessketten Abbildung 5 und Abbildung 8). Die Planung des äußeren wie inneren Werkstückzustands führt zu einer gewollten Änderung. Sobald bei einem Prozessschritt z.B. der innere Werkstückzustand nicht in der Planung berücksichtigt wird, entsteht eine Lücke in der Antizipierung des inneren Werkstückzustands. Da der innere Werkstückzustand durch die Verzugspotenzialträger in Form des Verzugspotenzials charakterisiert werden kann, würde dann auch bei der Antizipierung des Verzugspotenzials eine Lücke entstehen. Diese Lücke kann dazu führen, dass der innere Werkstückzustand in der Fertigung durch die System- und Stellgrößen nicht gezielt beeinflusst werden kann und somit zu ungewollten inneren Zuständen und am Ende zu ungewolltem, vermeidbarem Verzug führt. Zur Ursachenfindung, die zu vermeidbarem Verzug führt, soll folgende Kausalkette besprochen werden (Abbildung 18).

Ursache1: Verzug ist eine Systemeigenschaft. Um den vermeidbaren Verzug möglichst gering zu halten, müssen die System- und Stellgrößen den inneren Werkstückzustand durchgängig und geplant beeinflussen. Eine durchgängige Berücksichtigung findet nicht statt.

Ursache 2: Während der Fertigung zu einem Stahlbauteil verändern die Form ändernden Prozesse Umformen und Trennen gewollt den äußeren, geometrischen Zustand eines bearbeiteten Werkstücks. Mit der Änderung des äußeren Werkstückzustands in Form von geometrischen Formänderungen wird gleichzeitig der innere Werkstückzustand z.B. in Form von Veränderungen der Dichte, Seigerung, Gefüge- und Eigenspannungsverteilung verändert. Ausgehend von einem Anfangszustand zu Beginn eines Umform- oder Trennprozesses verändern sich somit der äußere und der innere Zustand während dieses Prozesses bis sich am Ende des Prozesses ein Endzustand einstellt. Die äußeren, geometrischen Veränderungen stellen beim Umformen und Trennen gewollte Änderungen des Werkstückzustands dar, die durch System- und Stellgrößen des Fertigungsprozesses wie Fertigungsmittel, Werkzeug, Einstellparameter der Fertigungsmittel usw. erzeugt werden.

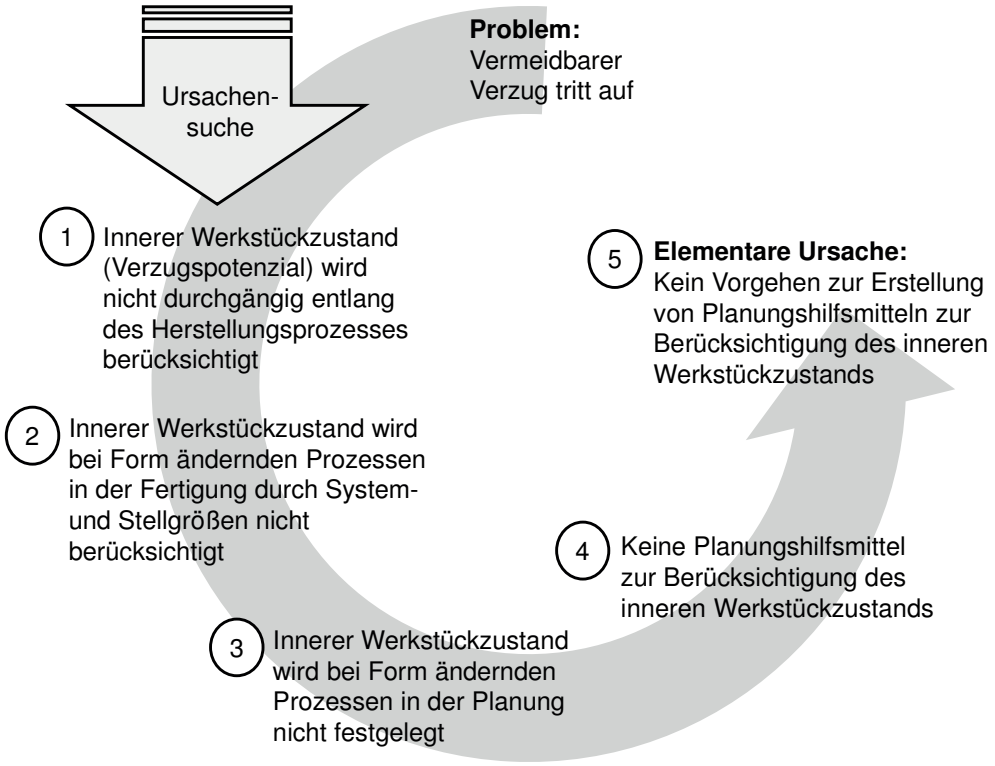


Abbildung 18: Kausalkette zur detaillierten Problembeschreibung und Suche nach der elementaren Ursache

Der sich durch die Stellgrößen des Fertigungsprozesses ändernde innere Werkstückzustand wird gleichzeitig ungewollt mit verändert. Folglich kann die Bearbeitung der Geometrie zu ungewollten inneren Zuständen führen, die nach einem Härteprozess als Maß- und Formänderungen sichtbar werden.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Arbeitsplanung in der Weichbearbeitung und hier speziell die Arbeitsplanerstellung, bestehend aus Prozess- und Operationsplanung. Dadurch wird der Werkstückzustand zu jedem Zeitpunkt eines Prozesses in der späteren Fertigung geplant (siehe Abbildung 11). Am Beispiel des Trennprozesses des Innen-Drehens eines Lagerrings soll die Problemstellung beispielhaft verdeutlicht werden (Abbildung 19). Der Hauptprozess „Drehen“ kann in die Teilprozesse „Innen-Drehen“ und „Außen-Drehen“ unterteilt werden. Der Prozess des Innen-Drehens verändert durch Abdrehen der Geometrie gewollt den äußeren Werkstückzustand der Innenfläche des Rings und gleichzeitig wird der innere Zustand ungewollt mit beeinflusst: Zum Innen-Drehen wird der Ring von außen eingespannt, z.B. mittels eines Dreibackenfutters. Durch die Einspannung und die Drehbearbeitung werden Eigenspannungsverläufe im Werkstück induziert, die nach dem Härteprozess zu ungewollten Maß- und Formänderungen führen [Sölter et al. 2006, S. 134] und [Sölter 2010].

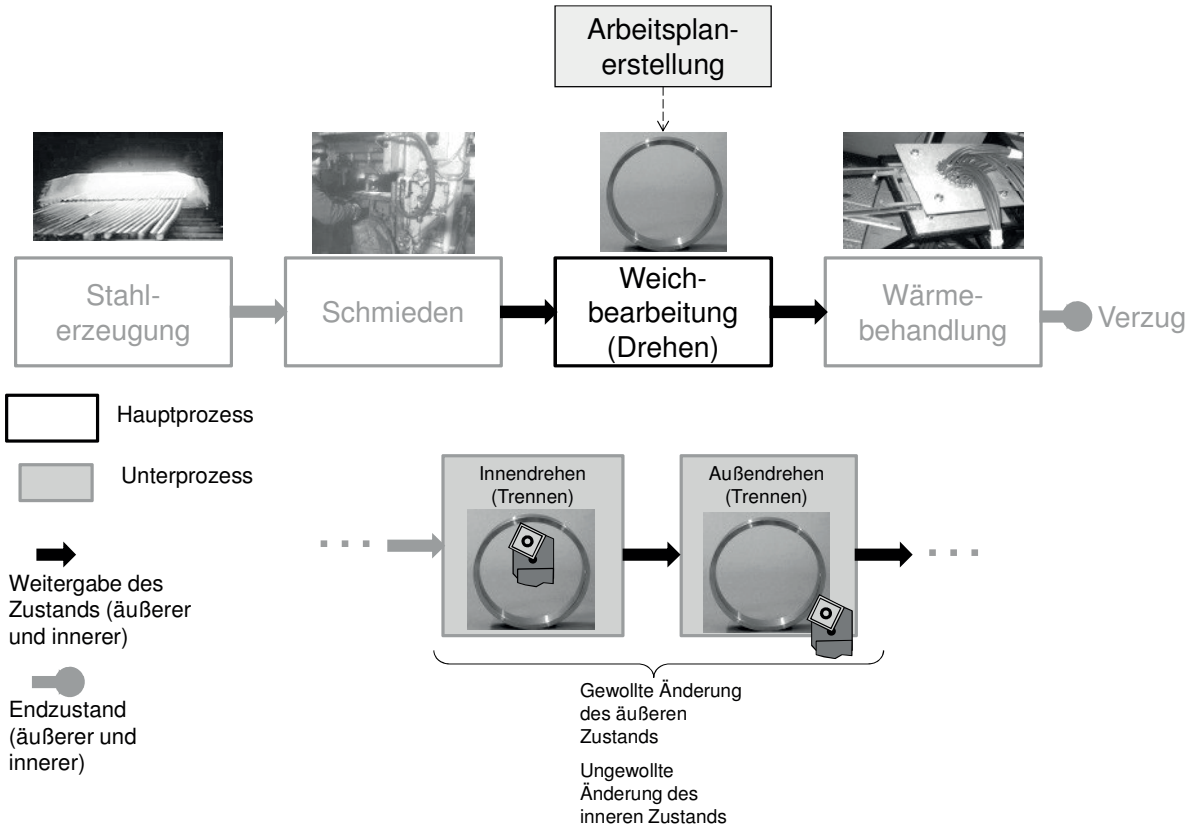


Abbildung 19: Prozesskette zur Fertigung eines Lagerrings

Ursache 3: Stellgrößen des Fertigungsprozesses, wie das Einspannwerkzeug des Dreibackenfutters oder die Einstellparameter wie Schnitttiefe, Vorschub und Schnittgeschwindigkeit werden durch den Arbeitsplan vorgegeben. Bei Trennprozessen werden nur die Stellgrößen und Einstellparameter zur Änderung der Form, also der äußeren Geometrie, durch den Arbeitsplan festgelegt. Der sich gleichzeitig beim Trennen verändernde innere Zustand wird im Arbeitsplan nicht berücksichtigt. Somit werden auch keine technologischen Kriterien hinsichtlich des Verzugs berücksichtigt.

Ursache 4: Dass der innere Werkstückzustand in der Arbeitsplanerstellung nicht berücksichtigt wird, liegt daran, dass es keine Planungshilfsmittel dafür gibt. Derzeitige Planungshilfsmittel berücksichtigen im Besonderen nur die Planung des äußeren Werkstückzustands bzw. wirtschaftliche und der Herstellbarkeit dienende Gesichtspunkte (siehe Abbildung 17). Planungshilfsmittel, die den inneren Werkstückzustand und hier im Besonderen die Verzugspotenzialträger berücksichtigen, gibt es nicht. Somit werden die Verzugspotenzialträger in der Arbeitsplanung auch nicht berücksichtigt. Dies führt dazu, dass ein unbekannter und nicht geplanter Zustand an die abschließende Wärmebehandlung weitergegeben wird.

Ursache 5: Da kein Vorgehen zur vollständigen Beschreibung einer Fertigungsprozesskette für den inneren Werkstückzustand existiert, kann daraus auch kein Planungshilfsmittel erzeugt werden. Die eigentliche Ursache ist demnach, dass es kein Vorgehen zur Erstellung von Planungshilfsmitteln im Kontext des inneren Werkstückzustands gibt.

Diese Aussagen der Ursachenfolge sollen im folgenden Kapitel 3 anhand des derzeitigen Stands der Technik bestätigt werden.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zum einen nach ***Planungshilfsmitteln*** bzw. nach Vorgehensweisen in Form von ***Methoden und Werkzeugen*** zu deren Erstellung gesucht, die die ***Arbeitsplanung in der Zerspanung*** unterstützen können, indem sie den ***inneren Werkstückzustand*** bzw. das ***Verzugspotenzial*** berücksichtigen. Notwendige Voraussetzung dazu ist, dass das Planungshilfsmittel aus der ***systemorientierten Betrachtung*** heraus entstanden ist. Die Zerspanung ist ein Oberbegriff für die Prozesse Drehen und Weichbearbeitung. Zum anderen sollen ***Systembeschreibungen zum Verzug*** *sowie* ***Methoden und Werkzeuge*** zur ***Verzugsbeschreibung*** entlang von ***Prozessketten*** ermittelt werden. Wenn es keine Systembeschreibung des Verzugs gibt, kann auch kein Planungshilfsmittel dazu existieren. Aus diesen Gründen wurde der Stand der Technik ***zu Planungshilfsmitteln in der Arbeitsplanung der Zerspanung*** sowie der ***Systembeschreibungen zum Verzug*** ermittelt.

Für den Stand der Technik wurden zunächst Vorarbeiten [Mayr et al. 2001] und die Arbeiten im Sonderforschungsbereich SFB 570 „Distortion Engineering“ ausgewertet. Im SFB 570 wurden die Ursachen für den bei der Wärmebehandlung von Stahlbauteilen auftretenden Verzug systematisch entlang von Prozessketten erforscht. Ebenfalls ausgewertet wurden in diesem Zusammenhang zum einen Dissertationen aus dem SFB 570, die im Besonderen auf den inneren Werkstückzustand entlang einer Prozesskette eingehen. Zum anderen wurden drei internationale Konferenzen analysiert (International Conference on Distortion Engineering IDE 2005, 2008 und 2011), die aufgrund ihrer Themenschwerpunkte erwarten ließen, dass hier Arbeiten zu dem Thema dieser Arbeit präsentiert werden könnten. Des Weiteren wurde in verschiedenen Datenbanken und im Internet recherchiert, u.a. DOMA (Maschinenbau und Anlagenbau), ScienceDirect (http://www.sciencedirect.com/) und google scholar (http://scholar.google.de/). Im Bereich Arbeitsplanung wurde die einschlägige Fachliteratur untersucht und durch die industrielle Praxis in Form von Firmenbesuchen abgesichert.

Hauptsächliches Kriterium zur Bewertung ist die Frage: „Gibt es eine ***Methode bzw. ein Werkzeug*** zur Beschreibung einer ***Prozesskette*** für den ***Verzug*** unter Berücksichtigung des ***inneren Werkstückzustands*** und ist daraus ein ***Planungshilfsmittel*** für die ***Arbeitsplanerstellung*** erzeugt worden“. Anhand dieser Kriterien wird der Stand der Technik bewertet.

Als Gliederung für den Stand der Technik wurden folgende Themenbereiche gewählt, die anschließend besprochen werden:

- Arbeiten im Sonderforschungsbereich “Distortion Engineering“
- Verzug als Systemeigenschaft
- Arbeitsplanung und Planungshilfsmittel in der mechanischen Fertigung

3.1 Arbeiten im Sonderforschungsbereich „Distortion Engineering“

Im Jahre 2001 wurde eine umfangreiche Literaturrecherche im Rahmen „Forschung für die Produktion von morgen“ zu dem Thema „Beherrschung von Wärmeprozessen im Fertigungsablauf“ abgeschlossen [Mayr et al. 2001]. Diese Studie berücksichtigte wärmebehandlungs-, werkstoff- und fertigungstechnische Gesichtspunkte und unterteilte sich in die folgenden Schwerpunkte:

- Werkstoffe höchster Gefügehomogenität, - stabilität,
- verzugsarme Fertigungsverfahren,
- intelligente Wärmebehandlungsprozesse,
- verzugsarme Schweißtechniken
- Ermittlung der Verzugspotenziale einzelner Fertigungsschritte
- Simulation und Modellbildung und
- Verkürzung von Wärmebehandlungsprozessen

Aus interdisziplinärer Sicht entlang des Fertigungsablaufs wurde die Thematik zur Ermittlung des Stands der Technik in folgende Teilgebiete aufgeteilt (siehe auch Abbildung 20): Stahlerzeugung, Umformung, Temperaturführung, Wärmebehandlung, Simulation, Zerspanung, Spanntechnik, Schweißtechnik

Abbildung 20 zeigt übersichtlich alle Themen, die in der Literaturrecherche berücksichtigt wurden.

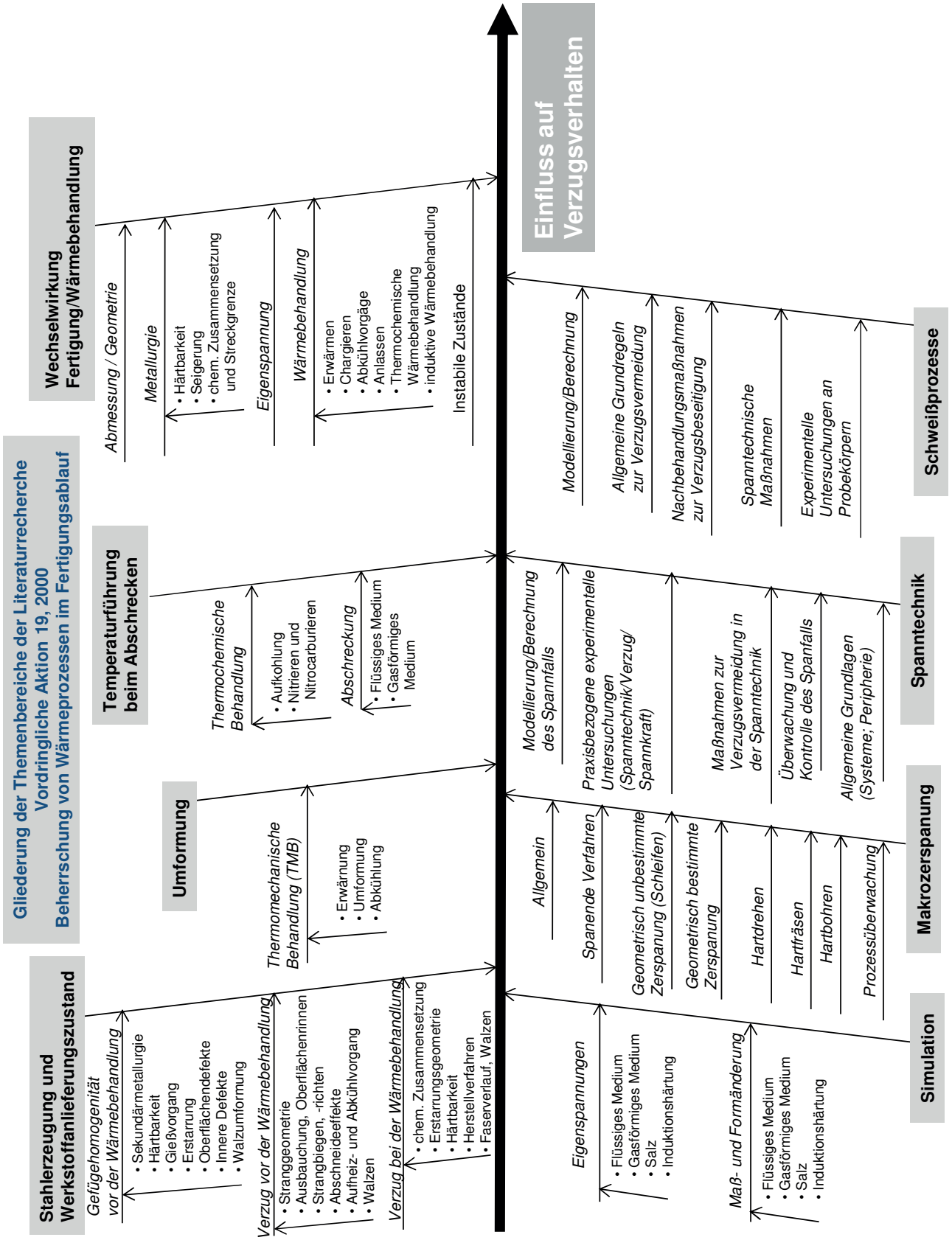


Abbildung 20: Themenbereiche der Literaturrecherche aus [Mayr et al. 2001]

Dazu wurden insgesamt über 1400 Literaturstellen gesichtet und bewertet. Als Gesamtergebnis dieser Studie wurde das Ziel formuliert, „ nicht mehr nur einzelne Prozesse zu optimieren, sondern vielmehr die Wechselwirkungen der Prozesse untereinander zu berücksichtigen“ [Mayr et al. 2001, S. 298]. Daraus folgt, dass bislang eine systemorientierte Betrachtung entweder fehlt oder nur in Einzelfällen berücksichtigt wurde.

Die Themenbereiche, die zur Aufnahme des Stands der Technik im Rahmen der Antragsstellung des SFB 570 recherchiert wurden, zeigt Abbildung 21 ([Hoffmann und Clausen 2003], [Brinksmeier und Rentsch 2003], [Brinksmeier 2003], [Keßler und Hoffmann 2003], [Lübben und Mayr 2003], [Goch und Jüpner 2003], [Fritsching und Hunkel 2003], [Clausen und Hoffmann 2007a], [Brinksmeier und Rentsch 2007], [Brinksmeier und Garbrecht 2007], [Hoffmann 2007], [Lübben und Zoch 2007], [Clausen und Hoffmann 2007b], [Goch und Kopylow 2007], [Fritsching und Hunkel 2007] und [Goch 2007]). Die Themenbereiche 1 und 2 gehören zum Bereich Stahlerzeugung, wobei Themenbereich 3 zum Bereich Umformen gehört. Zum Bereich Zerspanen gehören die Themenbereiche 4, 5, 9, 10, 12. Die Themenbereiche 6, 7, 8 und 11 gehören zum Bereich Wärmebehandlung.

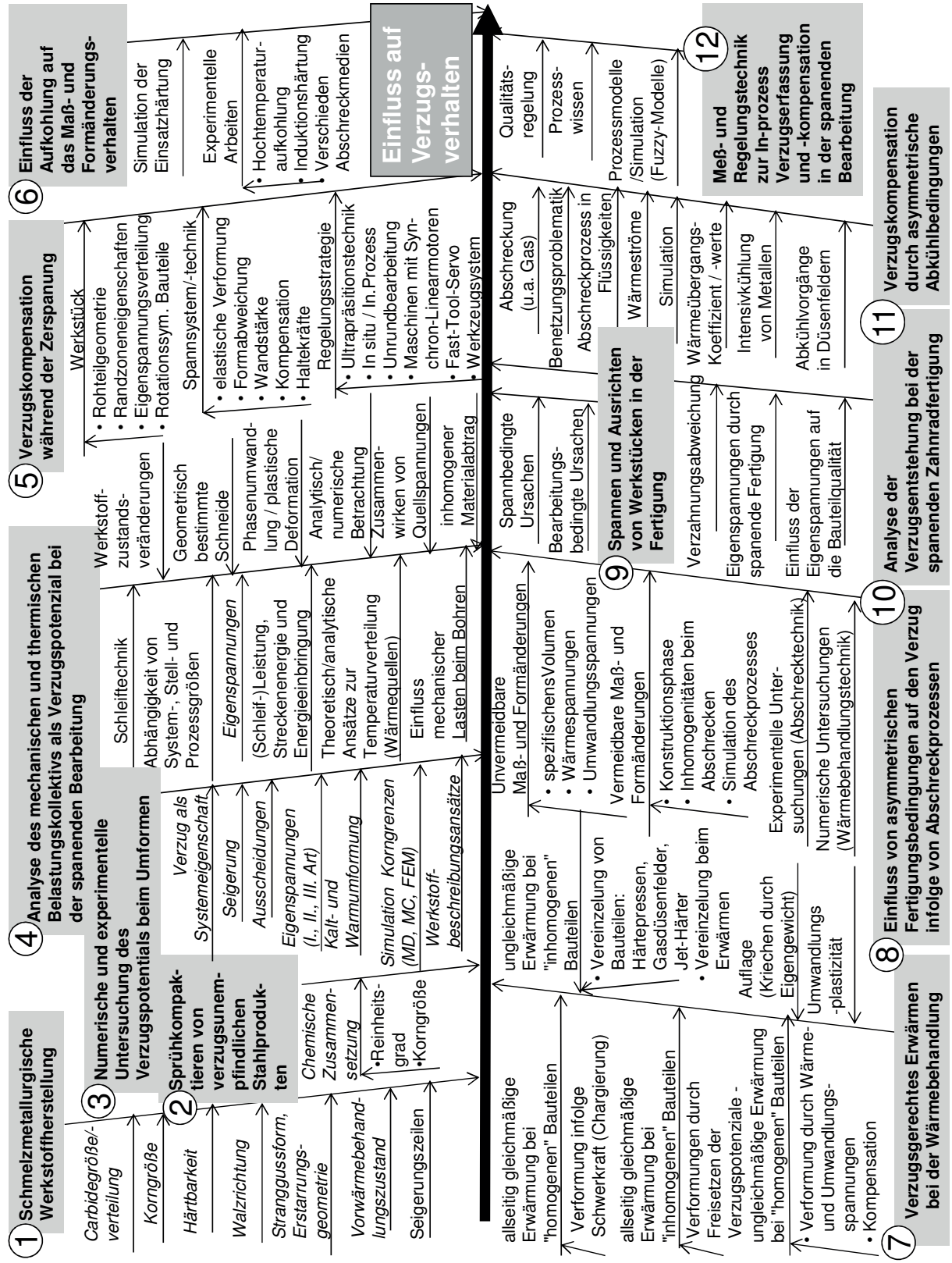


Abbildung 21: Themenbereiche der Literaturrecherche aus den Berichten und Anträgen zur Förderung des SFB 570.

Hauptsächliches Ziel des Stands der Technik im SFB 570 war die Analyse der bisherigen Erkenntnisse bzgl. der Verzugspotenzialträger von der Stahlerzeugung bis zur abschließenden Wärmebehandlung und deren Wechselwirkungen untereinander. Aus dem Bereich der Stahlerzeugung wird allgemein gefolgert, dass mit steigender Inhomogenität und Anisotropie davon auszugehen ist, dass sich das Verzugsverhalten verschlechtert. Die exakten Zusammenhänge von Einflussgrößen auf das Werkstück, den innerem Werkstückzustand und das Verzugsverhalten bzw. deren Wechselwirkungen sind nur an Einzelbeispielen untersucht und quantitativ unbekannt [Hoffmann und Clausen 2003, S. 30]. Es zeigt sich jedoch, dass durch die Einschränkung des Härtbarkeitsstreubands und durch feineres Korn eine Verbesserung des Verzugsverhaltens erreicht werden kann [Clausen und Hoffmann 2007a, S. 117]. Aus dem Bereich der Warmumformung (Bereich Schmieden) liegen derzeit sehr wenige Veröffentlichungen in diesem Themenbereich vor. Als mögliche Ursache wird die Komplexität der Einflussgrößen genannt [Brinksmeier und Rentsch 2003, S. 104]. Auch aus dem Bereich der Zerspanung wird z.B. berichtet, dass eine durchgängige Beschreibung der Entstehung von Eigenspannungen in Abhängigkeit von System-, Stell- und Prozessgrößen bisher nicht vorliegt. Modelle, die den Zusammenhang zwischen Verzug und Eigenspannungen beschreiben sind bisher nur in Ansätzen und innerhalb bestimmter Gültigkeitsgrenzen bekannt [Brinksmeier 2003, S. 159]. Im Bereich der Wärmebehandlung liegen insgesamt mehr Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen, dem inneren Werkstückzustand und dem Verzug vor. Dies allein deshalb, weil der Verzug unmittelbar nach der Wärmebehandlung sichtbar ist. Dennoch ist vieles noch unbekannt. Bei der Erwärmung wurde der notwendige Ansatz, Maß- und Formänderungen als Ausgangsgröße der gesamten Fertigungskette zu sehen, bisher nur in sehr wenigen Arbeiten verfolgt [Keßler und Hoffmann 2003, S.219]. Bei der Abschreckung wird berichtet, dass insbesondere Kenntnisse darüber fehlen, welche quantitativen Auswirkungen durch einzelne Einflussgrößen entstehen. Aber auch hier fehlen systematische Untersuchungen einer ganzheitlichen Betrachtungsweise zur Klärung der Zusammenhänge von Einflussgrößen und Verzug [Lübben und Zoch 2007, S. 429]. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass das Verzugspotenzial (innerer Werkstückzustand) quantitativ nicht erfasst werden kann, um den Verzug in seiner Intensität vorherzusagen. Dies kann auch erklären, warum zz. keine Arbeitsplanung im Hinblick auf die Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands existiert.

Die bisherigen Dissertationen aus dem Bereich des SFB 570 fokussieren auf die Fertigungsbereiche Zerspanung, Erwärmung, Aufkohlung und Fertigungskompensation. In [Sölter 2010] wurden die Ursachen und Wirkmechanismen der Entstehung von Verzug infolge spanender Bearbeitung untersucht. Es soll ein grundlegendes Verständnis der Entstehung von Verzügen erlangt werden, die unmittelbar durch die Zerspanung hervorgerufen werden [Sölter 2010,S. 3]. In dieser Arbeit wurden die Wirkungen der Einspannung und des Zerspanprozesses

gemeinsam betrachtet. Als wesentliches Ergebnis dieser Arbeit wurde herausgefunden, dass die Quellkräfte einer vollständigen elastischen Rückverformung nach dem Ausspannen entgegenwirken und ein Verzugspotenzial in Form von Eigenspannungen zurückbleibt [Sölter 2010, S. 126]. Dabei wurde auch ein quantitativer Wert für das Verzugspotenzial ermittelt. Allerdings konnte der wichtige Zusammenhang zwischen den für die Arbeitsplanung notwendigen Zerspanparametern, den Quellkräften und dem Verzug nicht hergeleitet werden [Sölter 2010, S. 113]. Die Arbeitsplanung braucht demnach ein anderes Instrument zur Planung.

In [Surm 2011b] wird die Identifikation der verzugsbestimmenden Einflussgrößen beim Austenitisieren am Beispiel von Ringen aus dem Wälzlagerstahl 100Cr6 diskutiert. Hierbei ging es vorrangig um die Betrachtung der Träger des Verzugspotenzials, die Rückschlüsse auf mögliche Verzugsmechanismen beim Erwärmen zulassen [Surm 2011b, S. 2]. Als wesentliche Ergebnisse werden als Einflussgrößen auf die Änderungen der Rundheitsabweichungen das Einspannmittel bei der Weichbearbeitung und die Chargierhilfe (Auflage) während der Wärmebehandlung genannt. Als Einflussgrößen auf Ebenheitsabweichungen wurden Auflage und Erwärmgeschwindigkeit identifiziert. Als günstige Auflage hat sich im Rahmen dieser Arbeit die Auflage in Sternform herausgestellt. Allerdings kann eine allgemeine Empfehlung in Bezug auf die Chargierung von Bauteilen in der Wärmebehandlung nicht gegeben werden [Surm 2011b, S. 151]. Die Arbeit gibt Handlungsempfehlungen für Weichbearbeitung und Erwärmen an. Eine Aufbereitung für die Arbeitsplanung findet allerdings nicht statt.

In [Acht 2007] wird der Einfluss von Geometrie und Prozessparametern auf den Verzug einsatzgehärteter Scheiben aus 20MnCr5 durch Experiment und Simulation untersucht. Als wesentliche Ergebnisse wurden ermittelt [Acht 2007, S. 128]:

- Die Aufkohlungstiefe hat großen Einfluss auf Maßänderungsverhalten
- Die Chargierung übt Einfluss auf Formänderungsverhalten aus
- Der Randkohlenstoffgehalt hat eher eine untergeordnete Bedeutung
- Die Geometrie der Scheiben hat großen Einfluss auf den Verzug
- Ölabgeschreckte Scheiben nehmen überwiegend Kissenform an
- Gasabgeschreckte Scheiben nehmen Fassform an

Insgesamt werden hauptsächlich nur Prozessgrößen aus dem Wärmebehandlungsbereich ausführlich besprochen. Eine Betrachtung der gesamten Prozesskette oder der Arbeitsplanung findet nicht statt.

In [Dijkman 2009] wird eine automatische Kompensation von Verzug im Produktionsprozess von Wälzlagerringen vorgestellt. Für die Kompensationsstrategie werden folgende Qualitätskriterien herangezogen [Dijkman 2009, S. 51]:

- Rundheitsabweichung
- Wandstärkevariation
- Neigung der Oberfläche (beim konischen Ring)
- mittlerer Durchmesser.

Die Kompensation wird in der Zerspanung mittels eines sogenannten Fast-Tool-Servo (automatisches Werkzeug zur Konstanthaltung der Wandstärke) und bei der Gasabschreckung mittels eines Künstlichen Neuronalen Netzes (KNN) auf Basis von Radial Basis Functions (RBF) durchgeführt. Für die Planung einer anderen Prozesskette muss das KNN neu erstellt werden. Dabei muss das Netz neu angelernt werden, welches eine Serienproduktion voraussetzt und nicht für Kleinserien und Einzelteile geeignet ist. Des Weiteren ist eine Übertragbarkeit auf andere Prozessketten mit anderen Geometrien und Werkstoffen aufgrund der unzureichenden Kenntnisse der Zusammenhänge um den Verzug nicht gegeben. Aus diesen Gründen existieren auch keine anderen Kompensationsstrategien für andere Prozessketten und Geometrien, welche wesentliche Voraussetzung für den Ansatz dieser Arbeit sind. In diesen Fällen ist eine Planung, die erst gar keinen Verzug zulässt, zielführender.

Als weitere Plattform zur Ermittlung des Stands der Technik sollen die drei Konferenzen, die im Rahmen des SFB 570 durchgeführt wurden, analysiert werden. Das primäre Interesse zur Einreichung von Beiträgen waren Themen zu Produktionsprozessen von metallischen Bauteilen, die mittels Urformen, Umformen, spanender Bearbeitung, Wärmebehandlung und Fügeverfahren bearbeitet wurden.

Tabelle 3 zeigt die Veröffentlichungen im Rahmen der IDE Konferenzen 2005, 2008 und 2011. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass sich alle Veröffentlichungen mit dem Verzug auseinandersetzen und auch fast alle Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen geben. Bis auf [Lamesle et al. 2005], [Andersch et al. 2005] [Franz et al. 2005] und [Husson et al. 2011], die im Wesentlichen nur die Geometrie betrachten, wird in den anderen Veröffentlichungen auch der innere Werkstückzustand z.B. in Form von Eigenspannungen oder Gefüge betrachtet. Überwiegend werden in den Veröffentlichungen Methoden oder Werkzeuge vorgestellt, die kaum die gesamte Prozesskette betrachten.

Themenbereich	Nr.	Titel	Methode, Werkzeug	Arbeitsplanung, Planungshilfsmittel	innerer Werkstückzustand	Erkenntnisse, Handlungsempfehlungen	Prozesskette	Verzug
IDE Konferenzen 05, 08, 11	1	Uneven residual stress in bearing rings prior to hardening and their effect on shape changes after hardening [Volkmuth et al. 2005b]			x	x	x	x
	2	Towards a knowledge base system (KBS) for a qualitative distortion prediction for heat treatments [Lamesle et al. 2005]	x			x	x	x
	3	Systematic analysis of the relation between part geometry and distortion due to heat treatment [Andersch et al. 2005]				x		x
	4	Metallurgical and production-related protocols to reduce heat-treatment distortion in the manufacture of gear components [Hippenstiel 2005]			x	x		x
	5	C.A.S.H. Computer Aided Simulation of Heat Treatment – An Overview [Schwarzer et al. 2005]	x		x	x		x
	6	Case Hardening Simulation of Complex Components by Use of Abstraction [Franz et al. 2005]	x			x		x
	7	Simulation of case hardening of complex components by use of a construction kit [Trapp et al. 2005]	x		x	x		x
	8	Computer Aided Simulation of Heat Treatment (C.A.S.H.) Teil 3: Simulation der Einsatzhärtung komplexer Bauteilgeometrien durch Abstraktion [Franz et al. 2006]	x		x	x		x
	9	Reasons and influencing factors on distortion within a process chain of an aluminium die casting component in the automotive industry [Karsten et al. 2011]			x	x	x	x
	10	Towards a new way of identification and modeling of gearbox shafts manufacturing process to prevent teeth distortion [Husson et al. 2011]	x					x
	11	Distortion of steel flat ring type products during the production cycle [Cesnik et al. 2011]			x	x		x
	12	Residual stress engineering in manufacture of aerospace structural parts [Sim 2011]	x		x	x		x

Tabelle 3: Veröffentlichungen im Rahmen der IDE Konferenzen 2005, 2008 und 2011

Dabei liegt der Fokus von [Andersch et al. 2005], [Schwarzer et al. 2005], [Franz et al. 2005], [Trapp et al. 2005] und [Franz et al. 2006] auf dem Prozess der Wärmebehandlung, während [Hippenstiel 2005] auf die Stahlerzeugung und [Sim 2011] auf die Zerspanung fokussieren. In [Cesnik et al. 2011] die Stahlerzeugung in der Betrachtung eher vernachlässigt wird. Allen Veröffentlichungen ist allerdings gemeinsam, dass sie nicht die Sicht der Arbeitsplanung repräsentieren und aus diesem Grund auch kein Planungshilfsmittel zur Verfügung stellen.

3.2 Verzug als Systemeigenschaft

Tabelle 4 zeigt Veröffentlichungen zum Themenkomplex Verzug als Systemeigenschaft.

Themenbereich	Nr.	Titel	Methode/Werkzeug	Arbeitsplanung/ Planungshilfsmittel	innerer Werkstückzustand	Erkenntnisse/ Handlungsempfehlungen	Prozesskette	Verzug
Verzug als Systemeigenschaft	1	Maß- und Formänderungen beim Einsatzhärten [Mallener 1990]			x	x	x	x
	2	Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Erstarrungsgeometrien von Strangguß aus dem Wälzlagerstahl 100Cr6 auf das Verzugsverhalten ringförmiger Bauteile beim Abschrecken in Härtepressen [Zoch 1995]			x	x	x	x
	3	Eigenspannungen und Verzug [Volkmuth 1996]			x	x	x	x
	4	A Review of Selected Steel-related Factors Controlling Distortion in Heat-treatable Steels [Cook 1999]			x	x	x	x
	5	Verzug bei Bauteilen aus dem Wälzlagerbereich [Volkmuth 2002]			x	x	x	x
	6	Umformtechnische Herstellung von Wälzlagerkomponenten - Optimierungspotenziale durch Prozessanalyse [Höinghaus 2002]			x	x		x
	7	Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen mittels elementarer Plastizitätstheorie [Puller 2003]	x			x		x
	8	Umgang mit der Verzugsproblematik in der industriellen Wärmebehandlungspraxis [Edenhofer 2004]			x	x	x	x
	9	Ansatz zur übergreifenden Qualitätsregelung von Prozessketten in der Fertigung [Bettin 2004]	x			x	x	x
	10	Immer Ärger mit Verzug? [Volkmuth 2005a]			x	x	x	x
	11	Methodology for Dimensioning Technological Interfaces of Manufacturing Process Chains [Denkena et al. 2006]	x	x			x	
	12	Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug von Stahlbauteilen durch örtliche Beeinflussung der Abkühlung [Brzoza 2007]	x		x	x		x
	13	Maß- und Formänderungen infolge Wärmebehandlung [Heeß et al. 2007]			x	x		x
	14	Fertigungsbedingte Produkteigenschaften – FePro [Klocke et al. 2008]			x			
	15	Einfluss der Prozesskette auf die Feinkornbeständigkeit von mikrolegierten Einsatzstählen [Trute 2009]			x	x	x	x

Tabelle 4: Veröffentlichungen zum Themenkomplex Verzug als Systemeigenschaft

Bis auf zwei Veröffentlichungen [Klocke et al. 2008] und [Denkena et al. 2006] berücksichtigen alle anderen den Verzug und liefern Erkenntnisse bzw. geben Handlungsempfehlungen. In [Klocke et al. 2008] wurden Handlungsfelder innerhalb des Rahmenkonzepts „Forschung für die Produktion von Morgen“ ermittelt. Eine der Thesen war, um das gesamte Potenzial der Fertigungsprozesse effektiv zu nutzen, dass die komplette Fertigungshistorie berücksichtigt werden muss und nicht nur einzelne Prozesse isoliert optimiert werden dürfen [Klocke et al. 2008, S. 47]. Dieses Vorhaben betrachtet ganz allgemein Produkteigenschaften, zu denen auch der Verzug gehört. Da sich dieses Vorhaben auf die Untersuchung von Oberflächen und Randzonen bezieht, scheint nur die Sichtweise der Zerspanung im Fokus zu stehen. In [Denkena et al. 2006] wird gezeigt, wie man eine Prozesskette über technologische Restriktionen planen kann, am Beispiel der Temperatur, die nötig zum Schmieden (1200°C) und zum Härten (800°C) ist. Es geht um die Vorstellung einer Methodik, um die optimal, technologisch planbare Prozesskette zu ermitteln. Auf den Verzug und die inneren Eigenschaften des Bauteils wird dabei nicht eingegangen. Fast alle Veröffentlichungen berücksichtigen auch den inneren Werkstückzustand, bis auf [Bettin 2004] und [Puller 2003], die nur die Geometrie betrachten, während in [Denkena et al. 2006] nur technologische Werte Berücksichtigung finden. Die meisten Veröffentlichungen stellen die Prozesskette und den Verzug als Systemeigenschaft in den Vordergrund. Abbildung 22 zeigt beispielhaft die Einflussmöglichkeiten auf das Verzugsverhalten nach [Mallener 1990].

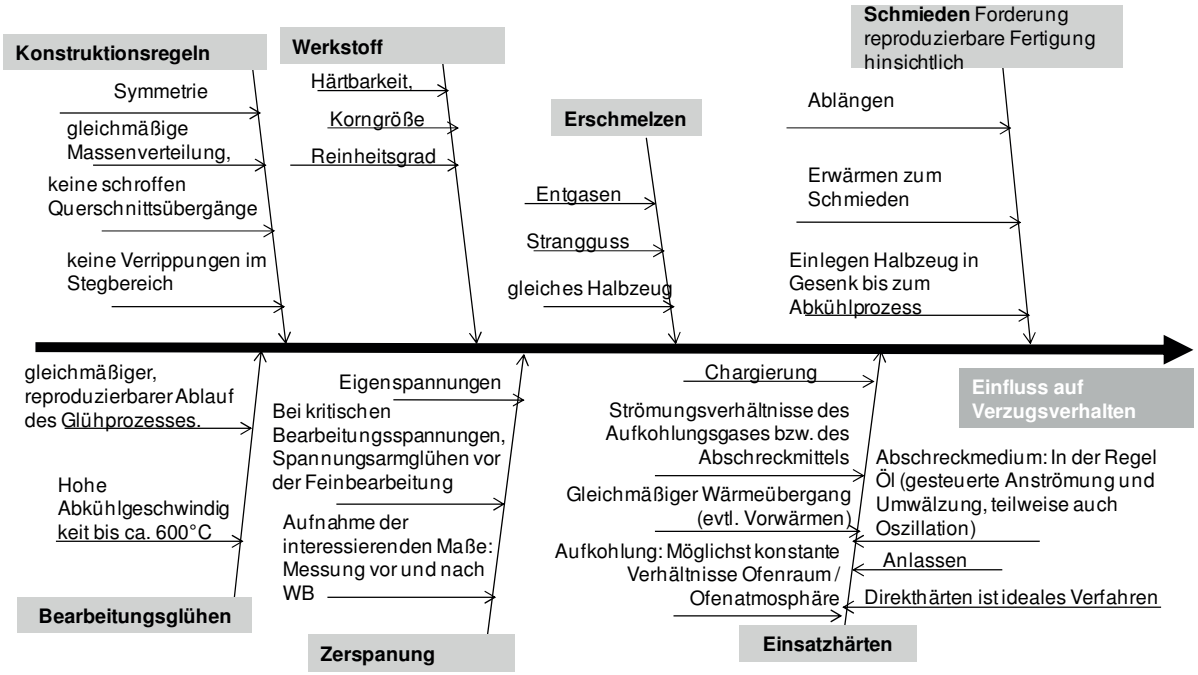


Abbildung 22: Einflussmöglichkeiten auf das Verzugsverhalten nach [Mallener 1990]

Allerdings wird bei allen diesen Veröffentlichungen die Sichtweise der Arbeitsplanung nicht berücksichtigt und auch kein Planungshilfsmittel aufgezeigt. Die Veröffentlichungen ohne den ganzheitlichen Prozesskettenbezug fokussieren zum einen auf die Wärmebehandlung [Brzoza 2007] und [Heeß et al. 2007] und zum anderen auf Walzprozesse [Puller 2003] bzw. berücksichtigen nicht die Stahlerzeugung [Höinghaus 2002]. Neben der Literatur, in denen über Methoden und Werkzeuge berichtet wird, wird nur in einer Veröffentlichung auch der Zusammenhang zur Arbeitsplanung hergestellt [Denkena et al. 2006, S. 498]. Insgesamt gibt es aber keine Veröffentlichung aus dem Themenkomplex Verzug als Systemeigenschaft, deren Fokus die Arbeitsplanung ist.

3.3 Arbeitsplanung und Planungshilfsmittel in der mechanischen Fertigung

Tabelle 5 zeigt abschließend die Veröffentlichungen, die im Rahmen der Planungshilfsmittel in der Arbeitsplanung ermittelt und ausgewertet wurden. Fast alle Veröffentlichungen aus Tabelle 5 behandeln die Arbeitsplanung sowie Planungshilfsmittel und unterstützen die Arbeitsplanung mittels Methoden bzw. Werkzeugen. Hauptsächlich wird der äußere Werkstückzustand in Form der äußeren Geometrie berücksichtigt ([Franke 1998], [Haufe 2000], [Engstler 2002], [Mehnert 2004]), z.B. in Form von Features (u.a. [Cremer 1992], [Hämmerle 1993], [Zahn 1999], [Moryson 2004], [Bossmann 2007]). In [Denkena et al. 2010] werden hauptsächlich aktuelle Arbeitsplanungssysteme und der zukünftige Bedarf der Industrie vorgestellt. Diese aktuelle Studie zeigt allgemein Anforderungen und zukünftige Wünsche auf, die die Software dieser Systeme unterstützen sollte. Grundsätzlich können mit diesen Systemen die Vorgabezeiten geplant werden. Die Wissensintegration in diese Systeme stellt immer noch einen Problembereich dar. Des Weiteren wird angemerkt, dass der industrielle Einsatz von Arbeitsplanungssoftware, beispielsweise im Gegensatz zu ERP- oder CAD-Systemen, bislang nicht weit verbreitet ist. Als wesentlicher Grund wird genannt, dass es weiterhin problematisch ist, die Arbeitsplanung, bekannt als sehr „wissensintensiver“ Produktionsbereich, softwaretechnisch zu unterstützten [Denkena et al. 2010, S. 11]. [Köhlscheid 1999] behandelt Methoden und Werkzeuge und berücksichtigt die Prozesskette, ohne den Fokus der Arbeitsplanung. [Varde et al. 2003], [Sisson 2006] und [Oral und Cemal Cakir 2004] sind einige der wenigen Veröffentlichungen, die auch den Verzug berücksichtigen.

Themenbereich	Nr.	Titel	Methode/Werkzeug	Arbeitsplanung / Planungshilfsmittel	Innerer Werkstückzustand	Erkenntnisse / Handlungsempfehlungen	Prozesskette	Verzug
Planungshilfsmittel	1	Informationsmodellierung für die integrierte Arbeitsplanerstellung im Bereich der zerspanenden Fertigung [Cremer 1992]	x	x				
	2	Werkstattorientierte Systeme zur Arbeitsplanung und kurzfristigen Fertigungssteuerung [Hämmerle 1993]	x	x				
	3	Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung [Franke 1998]	x	x				
	4	Wissensbasiertes Datenmodell zur Integration von Konstruktion, Arbeitsplanerstellung und Spannplanung [Zahn 1999]	x	x				
	5	Methodik zur lebenszyklusorientierten Produktgestaltung [Köhlscheid 1999]	x				x	
	6	Konfiguration von Arbeitsplanungssystemen [Haufe 2000]	x	x				
	7	NC-Prozeßkette in Kleinbetrieben Anforderungen, Verfahrensauswahl, Systemeinführung und Erweiterungen [Engstler 2002]	x	x				
	8	Quenching-Understanding, Controlling and Optimizing the Process [Varde et al. 2003]	x			x		x
	9	Gestaltung und Integration von Arbeitsplanungskompetenzen für hierarchielose Produktionsnetze [Mehnert 2004]	x	x				
	10	Automated cutting tool selection and cutting tool sequence optimisation for rotational parts [Oral und Cemal Cakir 2004]	x	x		x		x
	11	Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung [Moryson 2004]	x	x			x	
	12	Heat Treating Progress [Sisson 2006]	x	x		x		x
	13	Featurebasierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung [Bossmann 2007]	x	x				
	14	Quo vadis Arbeitsplanung? Marktstudie zu den Entwicklungstrends von Arbeitsplanungssoftware [Denkena et al. 2010]		x				

Tabelle 5: Veröffentlichungen zum Themenkomplex Planungshilfsmittel

Während [Varde et al. 2003] und [Sisson 2006] allerdings im Wesentlichen auf die Wärmebehandlung fokussieren und auch hier im Besonderen Handlungs-

empfehlungen angeben, fokussiert [Oral und Cemal Cakir 2004] hauptsächlich auf die Zerspanung.

3.4 Zusammenfassung

Als Kriterium zur Bewertung des Stands der Technik wurde die Frage gestellt, ob es eine ***Methode bzw. ein Werkzeug*** zur Beschreibung einer ***Prozesskette*** für den ***Verzug*** unter Berücksichtigung des ***inneren Werkstückzustands*** gibt und ob daraus ein ***Planungshilfsmittel*** für die ***Arbeitsplanerstellung*** erzeugt worden ist. Aus den Arbeiten im Sonderforschungsbereich „Distortion Engineering“ ist im Wesentlichen herausgekommen, dass es Methoden und Werkzeuge zur Beschreibung einer Prozesskette für den Verzug unter Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands gibt. Eine Aufbereitung für die Arbeitsplanung findet allerdings nicht statt. Die Auseinandersetzung mit dem Themenkomplex „Verzug als Systemeigenschaft“ ergab, dass die Sichtweise der Arbeitsplanung nicht berücksichtigt und auch kein Planungshilfsmittel aufgezeigt wurde. Beim Themenkomplex „Arbeitsplanung und Planungshilfsmittel in der mechanischen Fertigung“ kann festgehalten werden, dass entweder nur der äußere Werkstückzustand oder nicht die gesamte Prozesskette betrachtet wurde.

Nach [Eversheim 2002, S. 26] werden in der Arbeitsplanung technologische Kriterien betrachtet, um die Geometrie umzusetzen. Eine Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands findet nicht statt. Dies zeigt sich auch mittels der derzeitigen Planungshilfsmittel aus Abbildung 17. Eigens durchgeführte Prozessaufnahmen in der industriellen Arbeitsplanung zeigen ebenfalls, dass z.B. keine gezielte Berücksichtigung hinsichtlich Fertigungsmittel oder Schnittparametern auf die Beeinflussung des inneren Werkstückzustands existiert. Sehr wohl werden Maßnahmen wie das Spannungsarmglühen gezielt noch vor der abschließenden Wärmebehandlung durchgeführt, um Eigenspannungen abzubauen. Dies stellt aber einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt dar, der eingespart werden könnte, wenn das Verzugspotenzial durch die notwendigen Bearbeitungsschritte zur Formänderung beeinflussbar gering gehalten wird.

Aus der Problembeschreibung und dem Stand der Technik zusammenfassend folgt, dass bislang keine Verzugsbeurteilung, die die Verzugspotentialträger und damit den inneren Werkstückzustand berücksichtigt, für eine Arbeitsplanung entlang einer Prozesskette existiert. Es gibt keine Vorgehensweise bzw. methodische Unterstützung zur notwendigen Beschreibung des inneren Werkstückzustands entlang der Fertigungskette bzw. keinen Planungsprozess, der den inneren Werkstückzustand entlang der Fertigungskette für die Arbeitsplanung berücksichtigt. Aufgrund der fehlenden Beschreibung folgt, dass auch kein Planungshilfsmittel zur verzugsgerechten Arbeitsplanung existiert.

4 Konzept für die systematische Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands bei der Arbeitsplanerstellung

Als Ziel wurde formuliert, einen Beitrag dahingehend zu leisten, die Arbeitsplanung, hier im Besonderen die Arbeitsplanerstellung, durch Hilfsmittel wie Vorgehensweisen, Methoden und Erkenntnisse bei der Verzugsbeschreibung von hochfesten Stahlbauteilen der Antriebstechnik entlang von Prozessketten zu unterstützen. Dadurch sollen ungewollte Maß- und Formänderungen schon in der Planung antizipiert und berücksichtigt werden können.

Das Konzept sieht vor, aufbauend auf einer systemorientierten Verzugsbeschreibung (siehe Abschnitt 2.4 und Abbildung 11 b) mittels des Top-Down-Ansatzes, Planungshilfsmittel aus Sicht der Arbeitsplanerstellung zur Verfügung zu stellen (siehe Abbildung 23). Dies soll im Folgenden näher erläutert werden.

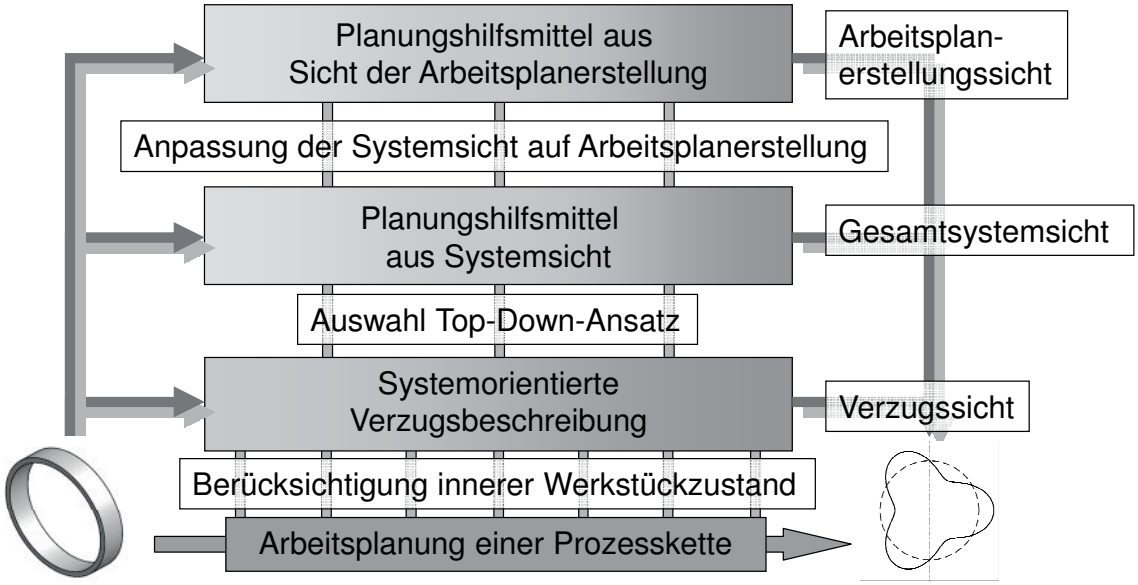


Abbildung 23: Konzept zur systematischen Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands bei der Arbeitsplanerstellung

Aus systemorientierter Sicht gibt es zwei Ansätze, die Planungshilfsmittel mithilfe der Verzugsbeschreibung zu erstellen [Daenzer und Huber 2002, S. 30 und 32]. Diese sind

- der Top-Down-Ansatz (vom Groben zum Detail) und
- der Bottom-Up-Ansatz (vom Detail auf das Ganze schließen).

Übertragen auf die Zielstellung dieser Arbeit bedeutet der Top-Down-Ansatz, dass das Planungshilfsmittel zuerst aus der Systemsicht und dann aus Sicht der Arbeitsplanerstellung erstellt wird. D.h., eine Aussage über die System- und Stellgrößen der Weichbearbeitung ergibt sich aus der durchgehenden Verzugsbeschreibung entlang der Fertigungskette von der Stahlerzeugung bis zur abschließenden Wärmebehandlung. Die System- und Stellgrößen der Weichbearbeitung im Planungshilfsmittel werden in Abhängigkeit mit den vor- und nachgelagerten System- und Stellgrößen betrachtet. Die durchgehende Betrachtung des Verzugspotenzials und der Wechselwirkungen wird bei den System- und Stellgrößen der Weichbearbeitung mitberücksichtigt. Für die Erstellung des Planungshilfsmittels müssen Größen eines Systems zur Verfügung stehen. Diese System- und Stellgrößen können aus einer Fertigungskette entlang der durchgehenden Auswertung eines industriell gefertigten Produktes, aus experimentellen Versuchsergebnissen von Fertigungsketten oder aus einer gemeinsamen Expertenbefragung mit Experten aus den einzelnen Fertigungsprozessen gewonnen werden. Um dieses zunächst aus Systemsicht erstellte Planungshilfsmittel in der Arbeitsplanerstellung nutzen zu können, muss es noch auf die Sichtweise der Arbeitsplanerstellung angepasst werden, um die Systeminformationen auf geeignete Art in den Entscheidungsprozess der Arbeitsplanerstellung einfließen lassen zu können.

Eine Übertragung des Ziels auf den Buttom-Up-Ansatz bedeutet, dass das Planungshilfsmittel zunächst aus Sicht der Arbeitsplanerstellung betrachtet und dann auf die Systemsicht erweitert wird. Dazu müssen die vorgelagerten System- und Stellgrößen der Stahlerzeugung und des Schmiedens sowie die nachgelagerten System- und Stellgrößen der Wärmebehandlung so geplant werden, dass sie zusammen mit den System- und Stellgrößen der Weichbearbeitung zu minimalem Verzug führen. Die System- und Stellgrößen der Weichbearbeitung stehen bei diesem Ansatz in Abhängigkeit mit Vorgaben an die System- und Stellgrößen der vor- und nachgelagerten Prozesse. Diese Vorgaben z.B. in Form eines definierten Anlieferzustands bzw. einer vorgegebenen Weiterverarbeitung müsste das Planungshilfsmittel berücksichtigen. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass eine unmittelbare Abhängigkeit der System- und Stellgrößen der Weichbearbeitung mit den System- und Stellgrößen einer durchgängigen Fertigungskette nicht gegeben ist. Eine ununterbrochene Systembetrachtung des Verzugspotenzials und der Wechselwirkungen findet nicht statt. Bei diesem Planungshilfsmittel kann nicht garantiert werden, dass immer eine optimale Verzugsberücksichtigung erreicht wird.

Für diese Arbeit wird der Top-Down-Ansatz gewählt, da durch die Systemsicht eine ununterbrochene Verzugsberücksichtigung ermöglicht wird. Daraus ergibt sich folgende Vorgehensweise. Zuerst soll ein Planungshilfsmittel aus System-

sicht erstellt und anschließend auf die Sicht der Arbeitsplanerstellung angepasst werden.

In Kapitel 5 wird jeweils die Struktur und Vorgehensweise zur Erstellung des Planungshilfsmittels aus Systemsicht vorgestellt. Durch die allgemeine Vorstellung der Vorgehensweisen zur Erstellung der Planungshilfsmittel können Planungshilfsmittel für beliebige Prozessketten erzeugt werden. In einem ersten Schritt geht es darum, sich einen Überblick über das System Verzug einer Prozesskette zu verschaffen, also Transparenz herzustellen. Dazu wird ermittelt, welche Informationen zur Erstellung von Planungshilfsmitteln benötigt werden. Es entstehen viele Informationen, die weiter reduziert werden müssen, um die Komplexität des Systems geeignet zu verringern. Dies soll durch eine systematische Betrachtung des Bauteilverzugs erfolgen (5.1). Die vorbereitende Reduzierung der Informationen stellt jeweils die Basis für die verschiedenen Planungshilfsmittel dar, deren Erstellung erst beginnt, wenn die Reduzierung stattgefunden hat. Nach der allgemeinen Vorstellung der Vorgehensweise der Systemanalyse wird die Anwendung jeweils anhand von zwei Beispielprozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ besprochen. In [Thoben et al. 2012a] wurden sieben Vorgehensweisen zur Erstellung von Planungshilfsmitteln hinsichtlich der Anwendbarkeit in der Arbeitsplanerstellung zur Unterstützung von Arbeitsplänen (siehe Tabelle 2) untersucht. Das Ergebnis war, dass das Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ (5.2) wegen der Interpretierbarkeit aufgrund der Übersichtlichkeit und das Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“ (5.3) wegen der einfachen Erweiterbarkeit die geeignetsten Vorgehensweisen darstellen. Diese beiden selbstentwickelten Vorgehensweisen werden jeweils für sich in den Kapiteln 5.2 und 5.3 vorgestellt. Anschließend wird jeweils die Anwendung dieser Vorgehensweisen anhand der zwei Beispielprozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ besprochen. Durch die Anwendung dieser zwei Vorgehensweisen entstehen Planungshilfsmittel zur Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands aus Systemsicht, die im Weiteren Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ und Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“ genannt werden.

Die beiden aus Systemsicht erstellten Planungshilfsmittel werden in Kapitel 6 auf die Sicht der Arbeitsplanerstellung angepasst. Die so entstandenen Planungshilfsmittel aus Sicht der Arbeitsplanerstellung werden bzgl. der Unterstützung der einzelnen Teilaufgaben in der Arbeitsplanerstellung angewendet (6.1 und 6.2). Dies führt abschließend zur Vorstellung von zwei verzugsgerechten Arbeitsplänen der zwei Beispielprozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ (6.2). Abbildung 24 stellt das besprochene Vorgehen graphisch dar.

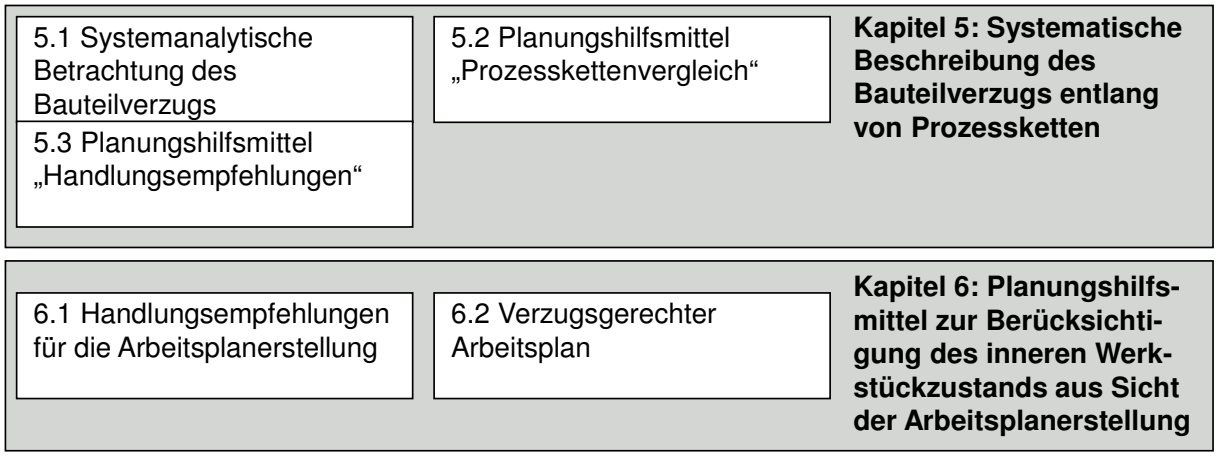


Abbildung 24: Graphische Darstellung des besprochenen Vorgehens

5 Systematische Beschreibung des Bauteilverzugs entlang von Prozessketten

In diesem Kapitel geht es darum, die Struktur und die Vorgehensweise zu erläutern, um als Ergebnis ein Planungshilfsmittel aus Systemsicht zu erhalten. Die Vorstellung beginnt mit dem methodischen Vorgehen zur Reduzierung von verzugsrelevanten Informationen mittels der Systemanalyse. Nach der Reduzierung sollen nur noch signifikante verzugsrelevante Informationen, die die System- und Stellgrößen darstellen, übrig bleiben. Dies wird anschließend an zwei Beispielprozessketten für einen zylindrischen Ring und ein Zahnrad gezeigt (5.1). Weitere Betrachtungen von Prozessketten würden den Umfang dieser Arbeit übersteigen, da der Aufbau der Planungshilfsmittel vielfältige Informationen der Prozesskette benötigt. Im Besonderen wird die Prozesskette „zylindrischer Ring“ beschrieben. Mit dieser Prozesskette soll eine durchgehende Beschreibung und Nachvollziehbarkeit gewährleistet werden. An ausgewählten Stellen wird auf die Prozesskette „Zahnrad“ eingegangen, um zu zeigen, dass die Beschreibung der Prozesskette „zylindrischer Ring“ auf andere Prozessketten übertragen werden kann. Deshalb wird die Prozesskette „Zahnrad“ nicht ausführlich besprochen, sondern es werden nur Ergebnisse präsentiert. Eine weitere Grundlage zur Erstellung der Planungshilfsmittel waren experimentelle Ergebnisse aus statistischen Versuchen (siehe dazu [Scheffler 1997]). Mithilfe der statistischen Versuche wurden quantitative Werte für den Verzug anhand der aus der Systemanalyse bestimmten signifikanten verzugsrelevanten Informationen ermittelt. Nach der Systemanalyse werden die Vorgehensweise zur Erstellung der Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ (5.2) und „Handlungsempfehlungen“ (5.3) besprochen und anhand der zwei Beispielprozessketten und deren Ergebnissen aus den statistischen Versuchen durchgeführt. Die Struktur und Anwendung der anderen in [Thoben et al. 2012a] bewerteten Planungshilfsmittel kann der eigenen Literatur entnommen werden:

- Erweitertes Prozessmodell [Thoben 2007, S. 721] und [Thoben et al. 2012a]
- Künstliche Neuronale Netze [Thoben 2007, S. 724] und [Thoben et al. 2012a]
- Fuzzy-Logik [Thoben 2007, S. 726] und [Thoben et al. 2012a]
- Regression [Klein und Thoben 2006, S. 321], [Thoben 2007, S. 732] und [Thoben et al. 2012a]
- Werkstück-Beschreibungs-Methode [Thoben 2007, S. 734], [Klein et al. 2009] und [Thoben et al. 2012a]

5.1 Systemanalytische Betrachtung des Bauteilverzugs

Die Systemsicht sollte so transparent wie möglich gestaltet werden. Daraus folgt, dass so viele Informationen wie möglich bzw. sinnvoll über das System „Verzug“ bereitgestellt werden. Selbst eine im Rahmen dieser Aufgabe als unwichtig empfundene Information kann u. U. eine wichtige Information darstellen. Trotzdem muss schon zu Beginn der Betrachtungsbereich an Informationen sinnvoll abgegrenzt werden. Im Folgenden soll gezeigt werden, welche Informationen für das System „Verzug“ und dessen Zustandsinformationen entlang der Prozesskette relevant sind.

Eine sinnvolle Einschränkung für eine transparente Systemsicht beinhaltet Informationen, die unmittelbar den Zustand bezogen auf die Zielgröße Verzug beeinflussen. Für die Zielgröße Verzug sind Informationen über die Verzugsneigung und Verzugscharakterisierung wichtig. Der unmittelbare Bauteilzustand im System „Verzug“ hängt von den Informationen der Konstruktion/Geometrie, den Materialeigenschaften, vorgegeben durch die chemische Zusammensetzung, dem Fertigungsprozess und den Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess ab. Folglich soll zu den Informationen der Prozesskette für eine transparente Systemsicht gehören (Tabelle 6):

Nr.	Informationen für transparente Systemsicht
1	Verzugsneigung / -charakterisierung
2	Konstruktionszeichnung
3	Chemische Zusammensetzung und Materialeigenschaften
4	Fertigungsprozess und Auswahlkriterien
5	Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess

Tabelle 6: Informationen der Prozesskette für eine transparente Systemsicht

Die Planungshilfsmittel müssen den Verzug entlang der gesamten Prozesskette berücksichtigen. Dazu werden vorrangig Informationen zur Planung des Fertigungsprozesses benötigt. Durch eine strukturierte Betrachtung des Fertigungsprozesses und der System- und Stellgrößen (Einflussgrößen) sowie durch verzugsrelevante Auswahlkriterien kann die Komplexität der Informationen zur Erstellung der Planungshilfsmittel reduziert werden. Die signifikanten verzugsrelevanten Informationen bilden die Grundlage zur Bestimmung von relevanten Einflussgrößen des Systems „Verzug“ (siehe Abbildung 25).

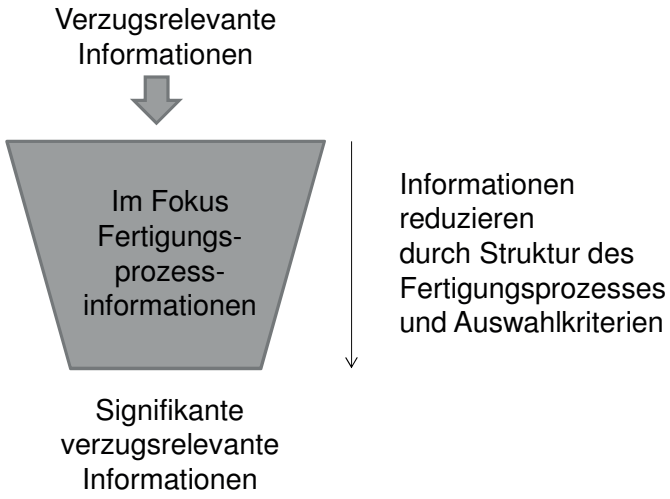


Abbildung 25: Vorgehen zur Bestimmung von signifikanten verzugsrelevanten Informationen

Für die Reduzierung der Informationen bzgl. der Fertigungsprozesse und deren Einflussgrößen (siehe Tabelle 6, Nr. 4 und Nr. 5) ist eine detailliertere Betrachtung nötig. Nachstehend wird das methodische Vorgehen zur Reduzierung der Fertigungsprozesse und der Ermittlung von relevanten Einflussgrößen auf die Fertigungsprozesse mittels Auswahlkriterien beschrieben.

Fertigungsprozess und Auswahlkriterien

Das Verzugspotenzial verändert sich von Prozessschritt zu Prozessschritt. Der Prozessbegriff besitzt hierbei, im Gegensatz zur Prozessbeschreibung in der Arbeitsplanerstellung, eine andere Bedeutung. Während ein Prozess in der Arbeitsplanerstellung an den Arbeitsplatz gebunden ist [Eversheim 2002, S. 27], soll hier unter Prozess die Veränderung des Bauteils verstanden werden. In diesem Falle kann immer von einem Prozessschritt gesprochen werden, sobald sich etwas am Werkstück ändert. Dies kann äußerliche wie innerliche Veränderungen oder auch die Lage, z.B. durch Transportprozesse, betreffen. Da aufgrund der Komplexität der Informationen des Systems „Verzug“ nicht alle Prozesse aufgenommen werden können, gilt es, eine Auswahl zu treffen. Dies soll durch eine geeignete Struktur des Fertigungsprozesses und von Auswahlkriterien gefördert werden.

Das Konzept der Auswahlkriterien sieht wie folgt aus. Von besonderem Interesse sind die Prozessschritte, die einen Einfluss auf den Verzug besitzen bzw. ihn vermuten lassen. Mögliche Einflussgrößen, die bei einem Prozess den Zustand ändern, zeigt Abbildung 26.

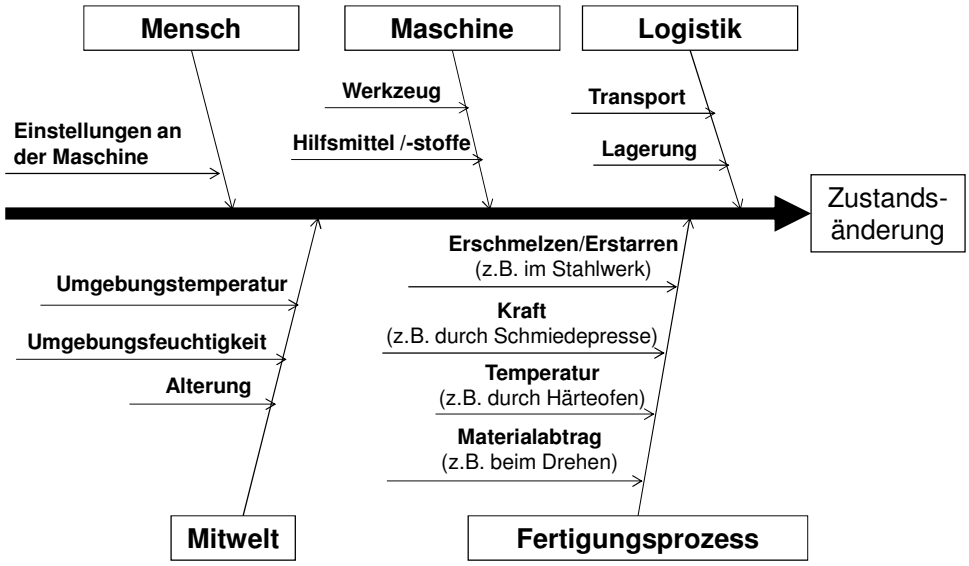


Abbildung 26: Mögliche Einflussgrößen, die bei einem Prozess den Zustand ändern

Im Besonderen sind die Prozesse zu betrachten, deren Einflussgrößen unmittelbar den Zustand ändern. Diese sind in Abbildung 26 unter der Einflussgröße Fertigungsprozess zusammengefasst worden. Es sollen die Prozesse betrachtet werden, bei denen das Gefüge erzeugt wird, also das Erschmelzen und Erstarren, bei denen Kraft und Temperatur auf das Werkstück einwirken, sowie Prozesse, bei denen Material abgetragen wird. Daraus ergeben sich die folgenden Auswahlkriterien (Abbildung 27):

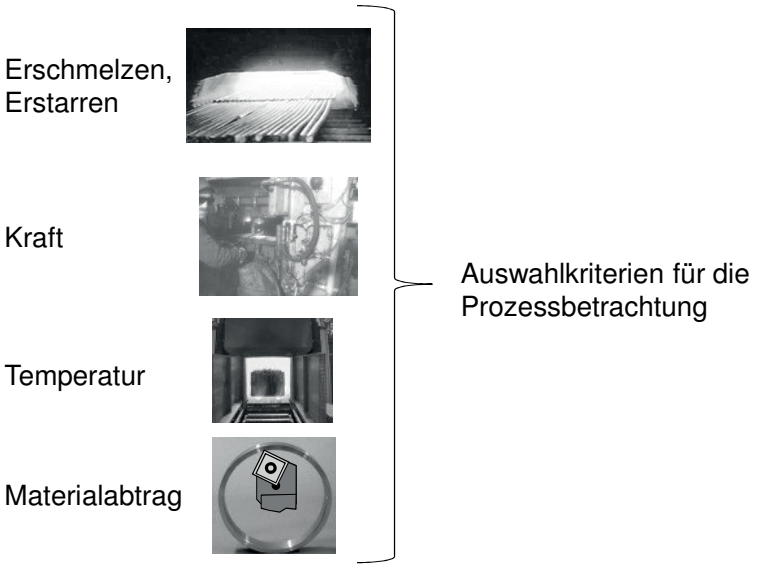


Abbildung 27: Grafische Darstellung der Auswahlkriterien für die Prozessbetrachtung

Anhand dieser Auswahlkriterien kann entschieden werden, welcher Prozess betrachtet werden soll.

Zur Abbildung des Gesamtprozesses kann wie folgt vorgegangen werden. Eine mögliche Gliederung auf höchster Ebene können Unternehmensgrenzen oder Werkstätten (z.B. Dreherei, Härterei usw.) darstellen. So könnten die Hauptprozesse z.B. in Stahlerzeugung, Schmieden, Zerspanen und Wärmebehandlung unterteilt werden. Die nächste Untergliederung erfragt die Teilprozesse. Als Gliederung können hier die Prozesse nach Sichtweise der Arbeitsplanerstellung verwendet werden. Ein Teilprozess bezieht sich dann jeweils auf den Prozess an einem Arbeitsplatz (oder einer Anlage/Maschine). Eine weitere Untergliederung erfragt dann die Unterprozesse, die an einem Arbeitsplatz durchgeführt werden.

Um nun ein solches Prozessmodell erstellen zu können, sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Welches sind die Hauptprozesse innerhalb der Prozesskette?

    - Welche Unternehmen sind an der Fertigung des Produkts beteiligt und welche Aufgabe haben Sie bzw. welche Veränderung führen sie am Produkt durch?

2. Welches sind die Teilprozesse innerhalb des Hauptprozesses?

    - An welchen Maschinen und in welcher Reihenfolge wird das Produkt gefertigt? Hilfsmittel wären alte Arbeitspläne.

3. Welche Unterprozesse laufen innerhalb der Teilprozesse ab?

    - Welche Prozesse verändern das Werkstück an diesem Arbeitsplatz?

Damit erhält man ein vollständiges Prozessmodell. Anhand der Auswahlkriterien werden nun die Prozesse bestimmt, die einen verzugsrelevanten Einfluss besitzen. Dazu werden folgende Fragen gestellt:

1. Wird bei diesem Prozess das Werkstück durch Erschmelzen/Erstarren verändert?

2. Wird bei diesem Prozess das Werkstück durch Kraft verändert?

3. Wird bei diesem Prozess das Werkstück durch Temperatur verändert?

4. Wird bei diesem Prozess vom Werkstück Material abgetragen?

Mit diesen Fragen kann nun ein Prozessmodell entstehen, welches als Grundlage für alle weiteren Vorstellungen dient.

Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess

Um alle relevanten Einflussgrößen oder anders formuliert die Ursachen auf den Verzug, sowie dessen Verzugs- und Kompensationspotentiale ermitteln zu können, wurde die Qualitätsmethode „Ursache-Wirkungs-Diagramm“ (UWD) ausgewählt [Pfeifer 2001a, S. 40]. Das methodische Vorgehen bei dieser Methode ist allgemein bekannt. Hier wird gezeigt, wie das Vorgehen unter dem Gesichtspunkt Verzug aussieht. Die Methode wurde so verändert, dass relevante Einflussgrößen bestimmt werden können.

Das von dem Japaner Kaoru Ishikawa entwickelte und nach seinem Namen benannte Ishikawa-Diagramm (Ursache-Wirkungs-Diagramm) ist ein einfaches Hilfsmittel zur systematischen Ermittlung und strukturierten, übersichtlichen Darstellung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen. Es zeichnet sich aus durch

- eine ganzheitliche Betrachtung aller Problemaspekte,
- eine Fokussierung auf das eigentliche Problem
- und Aussagen über Beziehungen und ihre relative Bedeutung.

Das Diagramm ist in einen Ursachen- und einen Wirkungsbereich aufgeteilt und ähnelt in seinem Aufbau den Gräten eines Fisches (daher auch die häufige Bezeichnung Fischgräten-Diagramm). Den Kopf des Diagramms bildet das zu untersuchende Problem (Wirkung). Nach Haupteinflussgrößen geordnet werden alle möglichen Ursachen ermittelt und in Haupt- und Nebenursachen gegliedert in das Diagramm eingetragen (siehe z.B. auch Abbildung 20 und Abbildung 21 in Kapitel 3). Die Erstellung des Diagramms kann u.a. in Gruppenarbeit erfolgen. Hier stellt das Ishikawa-Diagramm ein geeignetes Arbeitsschema dar und führt bei den Beteiligten zu einem besseren Verständnis des Problems und seiner vielfältigen Ursachen. Im Folgenden werden hier die Anpassungen der Methode besprochen. Dies bezieht sich auf:

1. Problemdefinition
2. Ursachengruppenbildung
3. Ursachensuche
4. Ursachenbestimmung und -bewertung

1. Problemdefinition

Der Problemdefinition kommt eine besondere Bedeutung zu. Das Problem (=Wirkung) sollte gut ausformuliert und verstanden sein. Dies senkt den Aufwand bei der Erstellung des Diagramms und hilft mögliche Ursachen zu finden. Zusätzlich vermeidet es Verwirrung bei unterschiedlichen Interpretationen des Problems/Fehlers und senkt somit den Aufwand bei der Überprüfung der Ursachen. Das eigentliche Problem ist der Verzug in Form von Maß- und Formänderungen. Es sollte vorab geklärt werden, ob der Verzug allgemein betrachtet werden soll oder ob eine spezielle Verzugsform wie die Rundheitsänderung im Fokus der Betrachtung steht. Zur Verzugscharakterisierung der Verzugsform können beispielsweise bei Ringgeometrien die „Rundheit", bei Wellengeometrien die „Krümmung" und bei Zahnradgeometrien eine Art „Schalen- bzw. Tellerform" oder auch die „Flankenlinienabweichung" usw. betrachtet werden [Hoffmann et al. 2002, S. 216], [Clausen et al. 2009a, S. 357], [Kohlhoff et al. 2011, S. 157]. Da aber jeder Prozessschritt das Verzugspotenzial ändert, welches sich abschließend erst als Verzug äußert, wird als Wirkung das Verzugspotenzial betrachtet. Der Zusammenhang zwischen Verzugspotenzial und Verzug ergibt sich über die inhomogene Verteilung der Verzugspotenzialträger, wie auf Seite 14 beschrieben.

2. Ursachengruppenbildung

Als nächstes werden die wesentlichen Ursachengruppen festgelegt. Die Erstellung von Ursachengruppen dient als Hilfsgerüst für die folgende Ursachensuche. Eine typische Einteilung in Produktionsprozessen wären die 7M [Pfeifer 2001a, S. 40]: Mensch, Maschine, Material, Methode, Management, Mitwelt und Messung. Im Rahmen der durchgeführten Experimente waren die Einflussgrößen im Fokus, die den inneren Zustand bzw. das Verzugspotenzial des Werkstücks verändern. Aus diesem Grund werden als Ursachengruppen die Hauptprozesse zur Fertigung eines Bauteils gewählt. Ein Beispiel für eine Unterteilung in Hauptprozesse wäre: Stahlerzeugung, Schmieden, Zerspanen und Wärmebehandlung.

3. Ursachensuche

In diesem Schritt werden mittels der zuvor gewählten Ursachengruppe zuerst mögliche Teil- und Unterprozesse ermittelt, die einen Einfluss auf das Verzugspotenzial und deren Verzugspotenzialträger besitzen. Dazu sollte folgende Frage beantwortet werden:

- Welche Teil- bzw. Unterprozesse beeinflussen bzw. verändern das Verzugspotenzial bzw. die Verzugspotenzialträger?

Als Hilfestellung zur Beantwortung dieser Frage sollen die vier Kriterien Kraft, Temperatur, Erschmelzen/Erstarren und Materialabtrag dienen.

Im nächsten Schritt werden mittels der zuvor bestimmten Prozesse mögliche Ursachen, also die einzelnen Einflussgrößen des Prozesses bestimmt. Bei der Bestimmung sollte folgende Frage beantwortet werden:

- Welche Einflussgrößen bei diesen Prozessen beeinflussen bzw. verändern das Verzugspotenzial bzw. die Verzugspotenzialträger?

Als Hilfestellung gilt dasselbe wie bei den Teil- und Unterprozessen. Bei der abschließenden Zusammenstellung der Ursachen im Ursache-Wirkungs-Diagramm können sich auch Ursachenfolgen ergeben, d.h., dass Ursachen auf der 1. Ebene auch noch Ursachen auf unteren Ebenen enthalten (siehe Abbildung 28). Für die Bewertung sollten immer die Ursachen genommen werden, die dann auf der untersten Ebene der Ursachenfolge liegen.

Den Aufbau des Ursache-Wirkungs-Diagramms zeigt Abbildung 28.

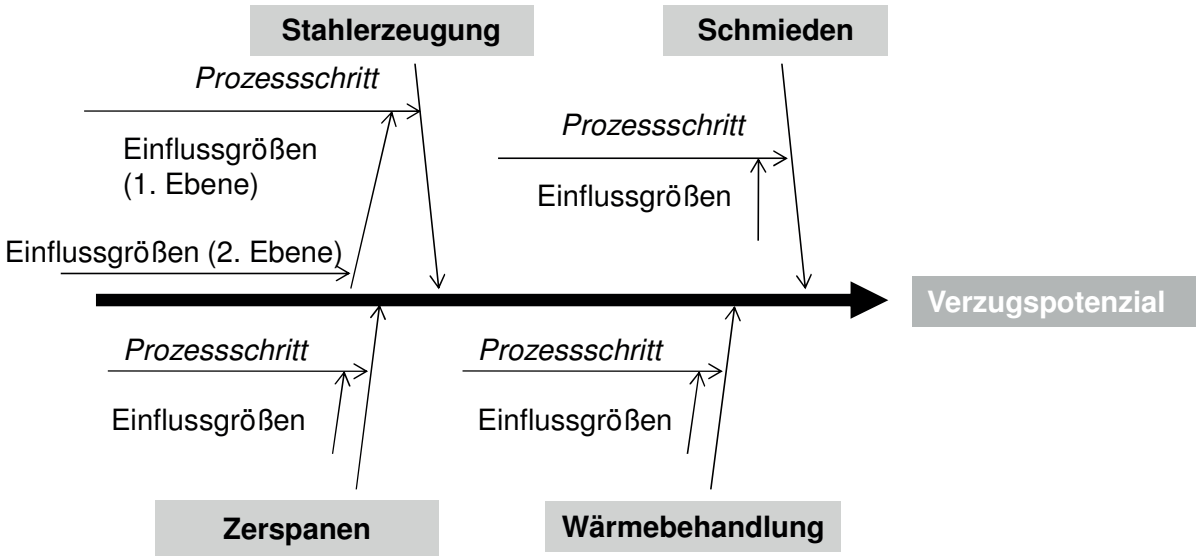


Abbildung 28: Aufbau des Ursache-Wirkungs-Diagramms mit einem Beispiel einer Ursachenfolge

Die Ursachen können beispielsweise mittels Brainstorming ermittelt werden [Pfeifer 2001b, S. 154]. Es geht in erster Linie darum, intuitiv die Einflussgrößen zu benennen, ohne sie gleich schon zu bewerten. Dadurch werden evtl. Ursachen genannt, die ansonsten von vorneherein ausgeschlossen würden. Aus diesem Grund entsteht eine Menge an Ursachen, die anschließend bezüglich ih-

rer Wichtigkeit bewertet werden müssen. Mit der Ursachensuche ist die transparente Darstellung der Einflussgrößen abgeschlossen. Diese Darstellung dient dann der Systemdarstellung. Das Ursache-Wirkungs-Diagramm als Methode ist damit noch nicht abgeschlossen. Im Folgenden folgt nun eine Bewertung der Einflussgrößen, um sie nach Wichtigkeit zu sortieren und z.B. für Experimente als Eingangsgrößen ins System zu verwerten.

4. Ursachenbestimmung und -bewertung

Das Ziel der Bewertung berücksichtigt das Paretoprinzip [Pfeifer 2001b, S. 4], das, bezogen auf die Verzugsursachen, besagt, dass nur ein kleiner Anteil an Ursachen einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis „Verzug“ besitzt. Zur Bewertung wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen. Jede Einflussgröße wird hinsichtlich ihrer Verzugspotenzialträger bewertet. In einer tabellarischen Übersicht würde dies wie folgt aussehen (siehe Tabelle 7):

Einflussgrößen	Verzugspotenzialträger 1	Verzugspotenzialträger 2	…	Verzugspotenzialträger n	Bewertung
Einflussgröße 1	X	X	…	X	5
Einflussgröße 2	X		…		3
…			…		
Einflussgröße n	X		…	X	1

Tabelle 7: Beispielhafte Bewertungstabelle

Bei Einflussgröße 1 wären beispielsweise alle Verzugspotenzialträger wichtig, während bei Einflussgröße 2 nur Verzugspotenzialträger 1 wichtig ist, gekennzeichnet durch ein „X“. Die Auseinandersetzung mit den Verzugspotenzialträgern (d.h., mit den inneren Werkstückeigenschaften) dient zur Sensibilisierung der anschließenden Bewertung der Einflussgrößen.
Bei der Bewertung kann unterschieden werden in 1 (geringerer Einfluss), 3 (höherer Einfluss) und 5 (signifikanter Einfluss). Dabei bedeutet die Nennung von mehreren Verzugspotenzialträgern nicht gleichzeitig auch eine höhere Bewertung. Durch diese Bewertung können nun signifikante Einflussgrößen separiert werden.

Im Folgenden werden die Informationen für eine transparente Systemsicht bezogen auf die Prozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ nach Tabelle 6 vorgestellt.

Zylindrischer Ring

In Anlehnung an das reale Bauteil eines Wälzlagerrings wird als vereinfachtes Bauteil die Prozesskette des zylindrischen Rings betrachtet. Für dieses Beispiel (siehe z.B. Abbildung 3) stellt er entweder den inneren oder den äußeren Ring eines Wälzlagers dar. Nach [Künne 2001, S. 147] dienen Wälzlager „der drehenden Abstützung von radialen und axialen Kräften bei Achsen und Wellen. Sie sollen dabei die durch Reibung entstehende Verlustleistung und den Verschleiß möglichst klein halten."

Verzugsneigung / -charakterisierung

Der zylindrische Ring neigt neben den Maßänderungen des Radius, der Höhe und der Wandstärke aufgrund seiner geringen Wandstärke vornehmlich zu Formänderungen in Form von Rundheitsänderungen [Hoffmann et al. 2002, S. 216]. Aufgrund der Verzugsneigung hin zu Rundheitsänderungen, wie Ovalitäts- und Dreieckigkeitsänderungen, wurde diese Geometrie ausgewählt [Hoffmann et al. 2002, S. 216]. Charakteristisch für den zylindrischen Ring sind also Formänderungen der Rundheit [Surm et al. 2008, S. 74] und Wandstärkeänderungen [Sölter 2010, S. 70]. Wie im Einzelnen die Ringe gemessen wurden, um die Verzugswerte darzustellen, kann z.B. [Clausen et al. 2004, S. 40] entnommen werden.

Konstruktionszeichnung

Die Konstruktionszeichnung, des in den Experimenten verwendeten Rings, zeigt Abbildung 29.

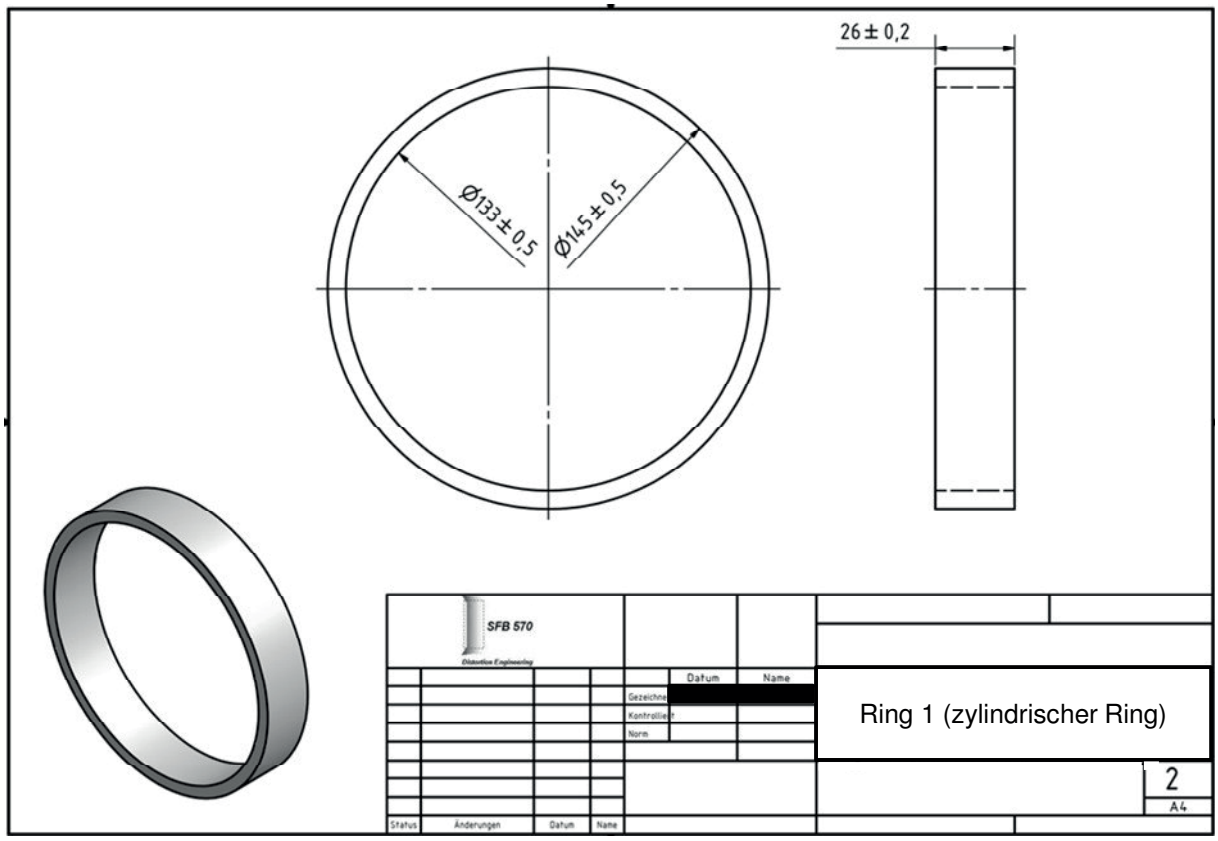


Abbildung 29: Konstruktionszeichnung des zylindrischen Rings

Dieser Ring zeichnet sich im Besonderen dadurch aus, dass die Wandstärke von 6 mm im Radius relativ gering ist. Dies war bzgl. der Ursachenforschung auf den Verzug so gewollt, um erstens eine möglichst große Abgrenzung zur Scheiben- bzw. Zahnradgeometrie zu bekommen und um im Speziellen die Auswirkungen der Eigenspannungen zu untersuchen.

Chemische Zusammensetzung und Materialeigenschaften

Der zylindrische Ring besteht aus dem Material 100Cr6 (Werkstoffnummer 1.3505). Die chemische Zusammensetzung der Schmelze zeigt Tabelle 8.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
Soll nach EN ISO 683-17	0,93-1,05	0,15-0,35	0,25-0,45	<0,025	<0,015	1,35-1,60	<0,10	-	<0,30	<0,050
Schmelze3 Nr.162636	0,97	0,22	0,43	0,008	0,003	1,48	0,09	0,23	0,10	0,006

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung des zylindrischen Rings in Masse-%

Damit liegen die Werte im Bereich der Sollwerte nach DIN EN ISO 683-17: 1999 [N.N. 1999].

Fertigungsprozess des Zylindrischen Rings

Abbildung 30 zeigt das Fertigungsprozessmodell für den Zylindrischen Ring. Als Grundlage für dieses Prozessmodell diente eine Prozessaufnahme innerhalb einer Expertenbefragung der an der Beispielprozesskette Beteiligten. Ziel war es, einen Gesamtüberblick über die Fertigung zu erlangen.

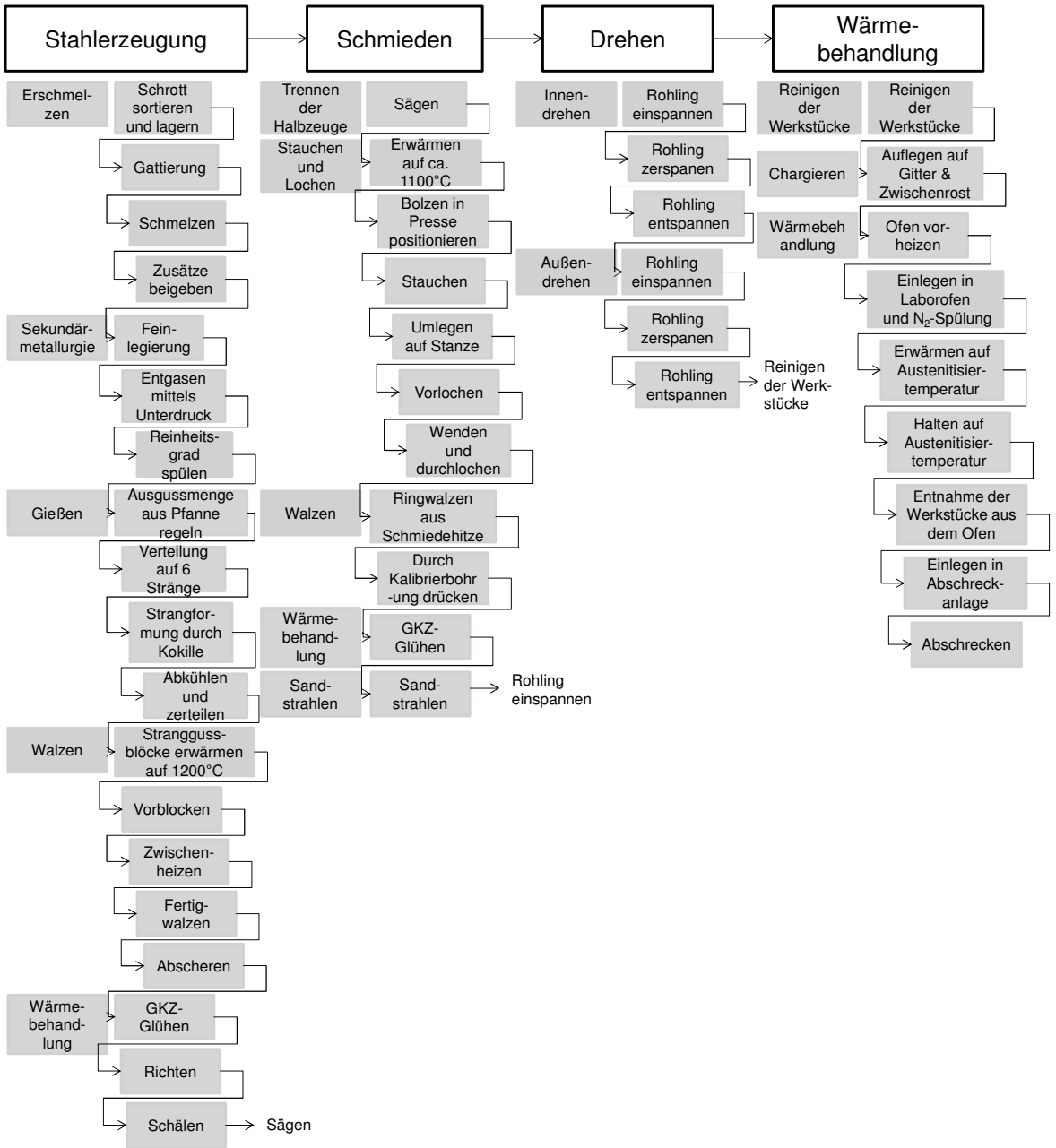


Abbildung 30: Prozessmodell zur Fertigung eines zylindrischen Rings

Nach dem vorgeschlagenen Vorgehen werden nun die einzelnen Fragen zur Ermittlung der Prozesse beantwortet und die Entstehung des Prozessmodells aus Abbildung 30 besprochen. Bei der Nennung der Prozesse sollen immer die vier Kriterien (Erschmelzung/Erstarrung, Kraft, Temperatur und Materialabtrag) mit betrachtet werden.

1. Welches sind die Hauptprozesse innerhalb der Prozesskette?

    - Welche Unternehmen sind an der Fertigung des Produkts beteiligt und welche Aufgabe haben Sie bzw. welche Veränderung führen sie am Produkt durch?

Für die Prozesskette „zylindrischer Ring“ waren insgesamt zwei Firmen und eine wissenschaftliche Einrichtung für die Fertigung verantwortlich. Hergestellt wurde der Stabstahl im Stahlwerk, deshalb soll der erste Hauptprozess „Stahlerzeugung“ heißen. Die Ringrohlinge wurden in einer weiteren Firma hergestellt und der zweite Hauptprozess soll „Schmieden“ heißen. In der wissenschaftlichen Einrichtung (vergleichbar mit einem dritten Unternehmen) wurden sowohl die Drehbearbeitung als auch die Wärmebehandlung durchgeführt. Hier sollen die Hauptprozesse durch die „Werkstätten“ (Dreherei und Härterei) in Drehen und Wärmebehandlung gegliedert werden. Insgesamt wurden also vier Hauptprozesse ausgewählt. Als nächstes werden die Teilprozesse und Unterprozesse bestimmt. Die Beantwortung der nächsten Fragen führt zu den im Folgenden aufgezeigten weiteren Prozessen.

2. Welches sind die Teilprozesse innerhalb des Hauptprozesses?

    - An welchen Maschinen und in welcher Reihenfolge wird das Produkt gefertigt? Hilfsmittel wären alte Arbeitspläne.

3. Welche Unterprozesse laufen innerhalb der Teilprozesse ab?

    - Welche Prozesse verändern das Werkstück an diesem Arbeitsplatz?

Teil- und Unterprozesse

Stahlerzeugung

Für die hier betrachtete Prozesskette wird die Schrotteinschmelzung betrachtet, d.h. als Ausgangsmaterial wird Schrott verwendet im Gegensatz zur Erzaufbereitung bei Anlieferung von Eisenerz (z.B. [Berger und Kloos 2011, S. E32]). Die Stahlerzeugung wird als Oberbegriff für die Prozesse von der Schrottanlieferung bis zur Stabstahlerzeugung verstanden. Das Endprodukt des Hauptpro-

zesses Stahlerzeugung ist das Produkt (Halbzeug) des Stabstahls. In der Literatur finden sich, teilweise unter anderem Namen, aber mit derselben Bedeutung, die folgenden Teilprozesse, die den Hauptprozess untergliedern, wobei die Teilprozesse den verwendeten Anlagen bzw. Maschinen zugeordnet werden sollen. Diese sind: Erschmelzen (Elektrolichtbogenofen), Sekundärmetallurgie (Vakuumanlage nach RH-Verfahren), Gießen (Kokille), Umformen (Walzen, Walzanlage) und GKZ-glühen (Ofen). Die Teilprozesse lassen sich nun wieder in weitere Unterprozesse zerteilen.

Erschmelzen

Das Erschmelzen beschreibt die Prozesse von der Schrottverarbeitung bis zum Erschmelzen. Im Einzelnen sind dies die Prozesse: Schrottaufbereitung (anliefern, sortieren und lagern), Gattieren (Erzanteil aufbereiten), Schmelzen (Elektrolichtbogenanlage) und Zusätze beigeben (legieren).

Sekundärmetallurgie

Die Sekundärmetallurgie beschreibt die Prozesse, die die Schmelzen durch metallurgische Maßnahmen verbessert. Als Unterprozesse sollen hier Feinlegierung, Entgasen mittels Unterdruck und Reinheitsgradspülen genannt werden.

Gießen (Urformen)

Mit dem Prozess Gießen ist das Stranggießen gemeint. Unterprozesse sind Ausgussmenge aus Pfanne regeln (mit Schieber), Verteilung auf sechs Stränge, Strangformung durch Kokille (einschließlich elektromagnetisches Rühren) sowie Abkühlen und zerteilen. Das Ergebnis dieses Prozesses sind Stranggussblöcke.

Walzen (Umformen)

In diesem Teilprozess entsteht als Endprodukt Stabstahl. Folgende Unterprozesse sollen genannt sein: Stranggussblöcke erwärmen auf 1200°C, Vorblocken, Zwischenheizen, Fertigwalzen, Abscheren.

GKZ-glühen

Durch die Wärmebehandlung „GKZ-glühen“ wurde bei den Untersuchungen des SFB 570 im Stahlwerk ein definiertes Ausgangsgefüge für die weitere Bearbeitung eingestellt. Als Unterprozesse sind das GKZ-glühen, das anschließende Richten und Schälen zu nennen.

Schmieden (Warmumformung)

Bei der Verfahrensgruppe Schmieden wird aus dem Halbzeug Stabstahl als Endprodukt der Schmiederohling hergestellt. Dabei können folgende Teilprozesse betrachtet werden: Trennen der Halbzeuge (Säge), Stauchen und Lochen (Schmiedepresse), Walzen (Ring-Walzwerk), Wärmebehandlung (Ofen) und Sandstrahlen (Sandstrahlanlage).

Trennen der Halbzeuge

Zuerst muss das Halbzeug getrennt werden, um der Schmiedepresse zugeführt zu werden. Dazu wird die Halbzeugstange in definierter Länge in Bolzen vereinzelt gesägt.

Stauchen und Lochen

Der nächste Teilprozess findet auf der Schmiedepresse statt in Form von Stauchen und Lochen. Hierbei können folgende Unterprozesse untergliedert werden: Erwärmen auf ca. 1100°C im Ofen. Bolzen in der Presse positionieren, Stauchen, Umlegen auf Stanze, Vorlochen, Wenden und durchlochen.

Walzen

Als nächstes folgt das Walzen auf dem Ringwalzwerk mit den Unterprozessen: Walzen aus Schmiedehitze und Kalibrieren. Die durchgelochte Scheibe wird mit bestehender Hitze aus dem Schmiedeprozess auf der Ringwalzanlage aufgewalzt. Zum Schluss wird der Ringrohling noch durch eine Kalibrieröffnung gedrückt.

GKZ-glühen

GKZ-glühen erzeugt kugelige Karbide in einer ferritischen Matrix, da das nach der Umformung vorliegende perlitische Gefüge für eine Zerspanung eine zu hohe Härte aufweist und auch für die spätere Wärmebehandlung wenig geeignet ist. Dadurch wird eine gute Zerspanbarkeit eingestellt.

Sandstrahlen

Das Sandstrahlen wird/kann industriell an dieser Stelle aus folgenden Gründen durchgeführt. Entfernen von Verzunderungen nach dem Walzen und GKZ-glühen oder Entfernen von „Flugrost“ nach der Lagerung. Die Ringe wurden in einer Strahlanlage mit relativ „grobem Strahlgut“ gesandstrahlt.

Drehen

Beim Verfahren Drehen (Drehmaschine) sollen die Teilprozesse Innendrehen und Außendrehen unterschieden werden.

Innendrehen

Das Innendrehen beschreibt die Prozesse vom Einspannen bis zum Entspannen des Ringrohlings zur Innendrehbearbeitung. Zu unterscheiden sind hier die Unterprozesse Rohling einspannen, Rohling zerspanen und Rohling entspannen.

Außendrehen

Das Außendrehen beschreibt ebenfalls die Prozesse vom Einspannen bis zum Entspannen des Ringrohlings; hier allerdings zur Außendrehbearbeitung. Ebenfalls werden hier die Unterprozesse Rohling einspannen, Rohling zerspanen und Rohling entspannen unterschieden.

Wärmebehandlung

Bei der Wärmebehandlung (Ofen) werden die folgenden drei Teilprozesse unterschieden: Reinigen der Werkstücke, Chargieren und die eigentliche Wärmebehandlung.

Reinigen der Werkstücke

Das Reinigen der Werkstücke ist ein sehr wichtiger Bestandteil vor der Wärmebehandlung. Durch das Reinigen werden unerwünschte Rückstände auf der Bauteiloberfläche entfernt wie Späne oder Kühlschmierstoffe. Bei thermochemischen Verfahren können Kühlschmierrückstände die Eindiffusion von Kohlenstoff (Aufkohlen) oder Stickstoff (Nitrieren) und somit den Aufbau der Verbindungsschicht beeinträchtigen bzw. nahezu völlig verhindern [Haase 2008, S. 104].

Chargieren

Auch dem Chargieren kommt eine besondere Bedeutung zu. Hier ist im Besonderen der Unterprozess Auflegen auf Gitter und Zwischenrost zu nennen.

Wärmebehandlung

Die eigentliche Wärmebehandlung soll in die folgenden Unterprozesse unterschieden werden: Ofen vorheizen, Einlegen in den Laborofen und N_2-Spülung,

Erwärmen auf Austenitisiertemperatur, Halten auf Austenitisiertemperatur, Entnahme der Werkstücke aus dem Ofen, Einlegen in Abschreckanlage und Abschrecken. Üblicherweise würde noch ein Anlassen folgen.

Aus den vorliegenden Betrachtungen ist abschließend das Prozessmodell der Prozesskette „zylindrischer Ring“ entstanden.

Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen auf das Beispiel des zylindrischen Rings angewendet. Es wird gezeigt, wie durch das beschriebene Vorgehen die relevanten Einflussgrößen auf den Verzug, bei dem ausgewählten zylindrischen Ring, bestimmt werden können. Die Ergebnisse entstammen ebenfalls einer Expertenbefragung. Es werden in dem Ursache-Wirkungs-Diagramm nicht mehr alle Prozessschritte nach Abbildung 30 aufgeführt, da nach der Bewertung der Teil- und Unterprozesse sowie der Einflussgrößen einige Prozesse als nicht relevant angesehen wurden. Die Sichtweise ist hier speziell auf Ursachen (Einflussgrößen) und nicht mehr auf die Prozesse gerichtet, sodass diese beiden Darstellungen nicht ohne weiteres ineinander überführbar sind. U.a. können Prozesse auch Einflussgrößen darstellen, wenn diese z.B. nicht durch ihre Einflussgrößen weiter konkretisiert werden können bzw. sollen. Es wurden allerdings einheitliche Begriffe gewählt, wodurch die hier angegebenen Prozesse sich auch im Gesamtprozessmodell nach Abbildung 30 wiederfinden.

Die einzelnen Punkte der Bestimmung sind:

1. Problemdefinition
2. Ursachengruppenbildung
3. Ursachensuche
4. Ursachenbestimmung und -bewertung

1. Problemdefinition

Das Problem ist erst einmal ganz allgemein der Verzug in Form von Maß- und Formänderungen nach der abschließenden Wärmebehandlung. Ob eine weitere Konkretisierung von Maßänderungen (z.B. Radius- oder Durchmesseränderungen) oder von Formänderungen (z.B. Rundheitsänderungen, Ovalitätsänderungen usw.) vorgenommen werden soll, kann das Team entscheiden. Da diese Me-

thode auf einem „eher gröberen Level“ Anwendung findet, soll im Folgenden diese Methode auf das allgemeine Problem Verzug angewendet werden. Um durch diese Methode Einflussgrößen auf die gesamte Prozesskette zu betrachten, muss bei den der Wärmebehandlung vorgelagerten Prozessen das Verzugspotenzial betrachtet werden. Aus diesem Grund wird ein Verzugspotenzial abgefragt, welches in einem letzten Schritt in den Verzug übertragen werden muss. Bei der Suche nach Ursachen geht es darum, welche Ursachen letztendlich das Verzugspotenzial beeinflussen und nach der Wärmebehandlung zu Verzug führen.

2. *Ursachengruppenbildung*

Als Ursachengruppen für den zylindrischen Ring sollen die bekannten Hauptprozesse benutzt werden.

Ursachengruppen: Stahlerzeugung, Schmieden, Zerspanen, Wärmebehandlung

3. *Ursachensuche*

Bei der Erstellung der Ursachenzusammenhänge sei darauf hingewiesen, dass Einflussgrößen wie Verschleiß an Werkzeugen, Wartung von Maschinen, Arbeitsanweisungen zur Bedienung, Motivation der Mitarbeiter usw. nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. Im Fokus stehen die unmittelbaren Ursachen für den Verzug bei ansonsten idealen Bedingungen. Unmittelbare Ursachen wirken mittels der vier Kriterien Kraft, Temperatur, Erschmelzen/Erstarren und Materialabtrag direkt auf das Verzugspotenzial ein. Verschleiß stellt z.B. keine ideale Fertigungsbedingung dar. In dieser Arbeit werden ausschließlich die Einflussgrößen betrachtet, die unter äußeren Idealbedingungen den Werkstückzustand mittels der vier Kriterien verändern.

Auf Grundlage der Beantwortung der Fragen zur Ursachensuche ergibt sich folgender Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Haupt-, Teil- und Unterprozessen und deren Einflussgrößen (siehe Abbildung 31, Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34). Da eine Abbildung nicht ausreicht, wurde jeder Hauptprozess einzeln dargestellt. Die Fragen lauten:

- Welche Teil- bzw. Unterprozesse beeinflussen bzw. verändern das Verzugspotenzial bzw. die Verzugspotenzialträger, die später Verzug auslösen?

- Welche Einflussgrößen bei diesen Prozessen beeinflussen bzw. verändern das Verzugspotenzial bzw. die Verzugspotenzialträger, die später Verzug auslösen?

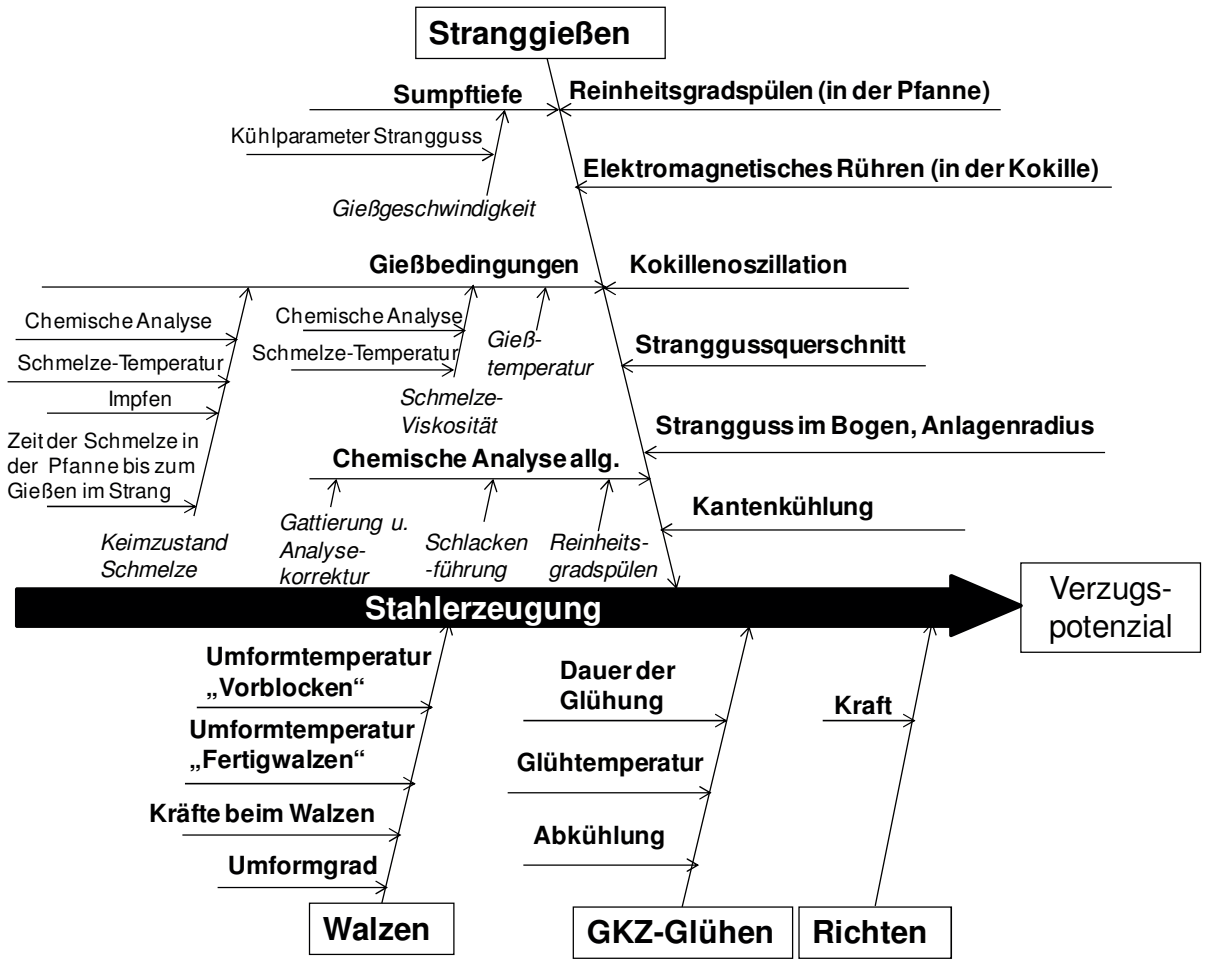


Abbildung 31: Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Haupt-, Teil- und Unterprozessen und deren Einflussgrößen bei der Stahlerzeugung

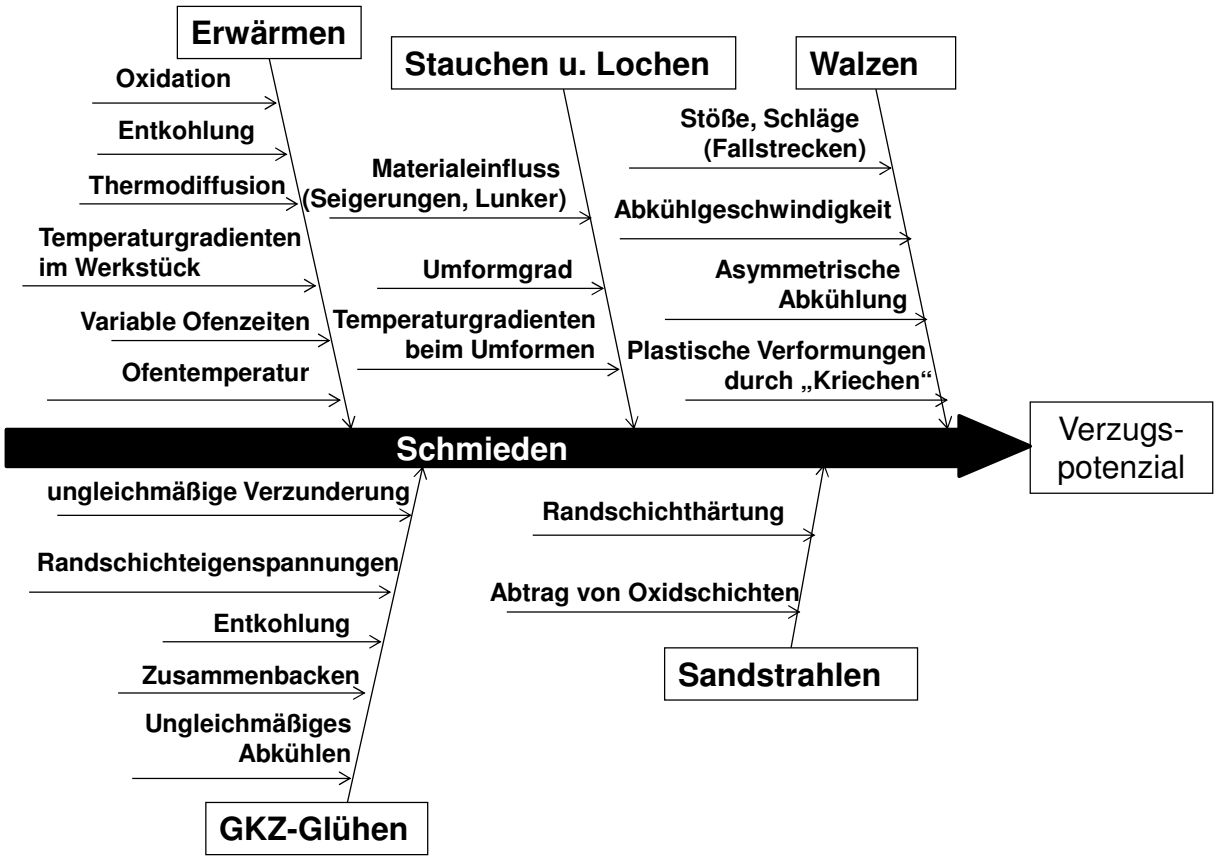


Abbildung 32: Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Haupt-, Teil- und Unterprozessen und deren Einflussgrößen beim Schmieden

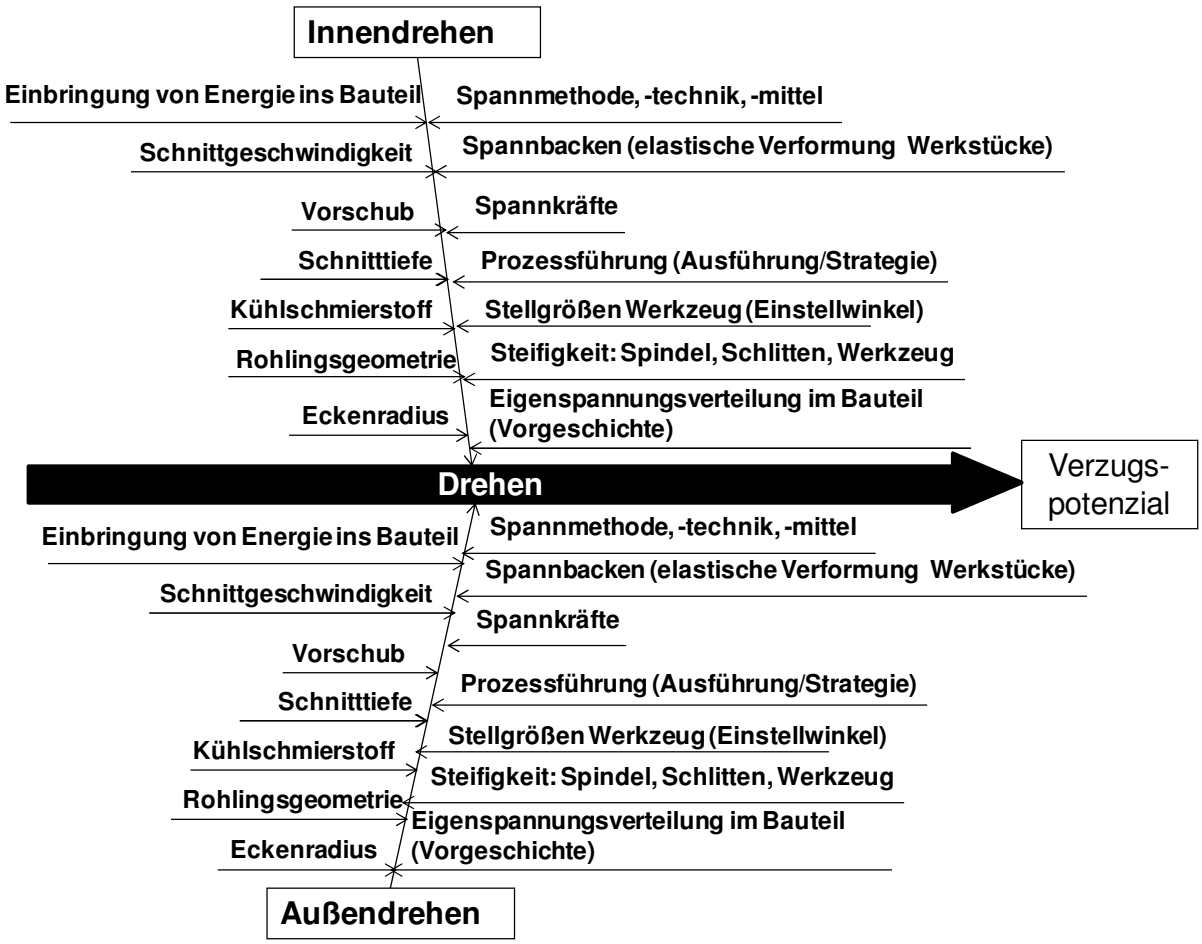


Abbildung 33: Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Haupt-, Teil- und Unterprozessen und deren Einflussgrößen beim Zerspanen

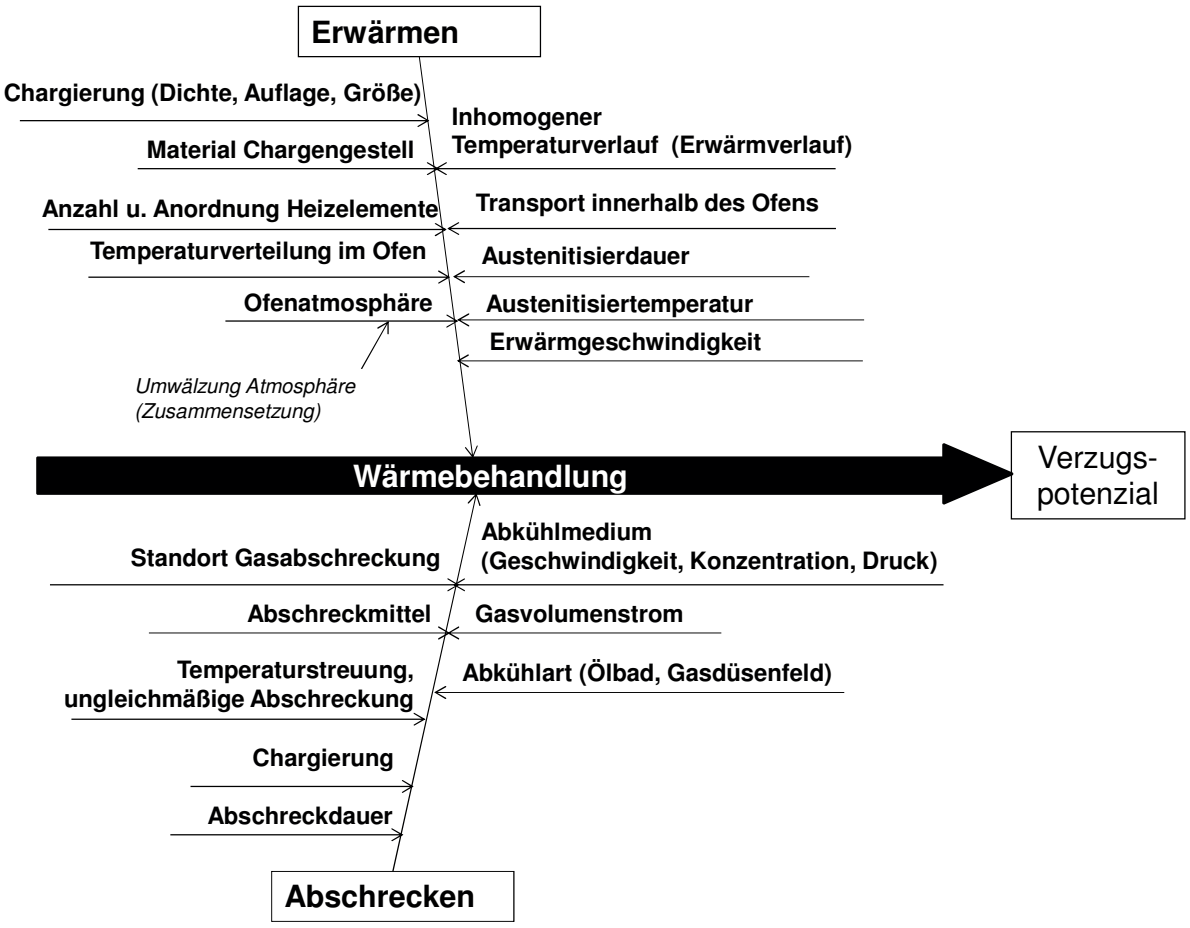


Abbildung 34: Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Haupt-, Teil- und Unterprozessen und deren Einflussgrößen bei der Wärmebehandlung

4. Ursachenbestimmung und -bewertung

Hier geht es darum, eine Korrelation zwischen Einflussgrößen und dem inneren Werkstückzustand herzustellen und anschließend diese bezüglich ihrer Wichtigkeit auf den Verzug zu bewerten. Das Ursache-Wirkungs-Diagramm stellt ein erstes Hilfsmittel zur Ursachensuche dar. Unterstützt wurde die Ursachensuche durch weitere Sensibilitätsuntersuchungen [Kusmierz et al. 2003], [Brinksmeier et al. 2003] und [Keßler et al. 2003]. Tabelle 9 zeigt zusammenfassend die Einflussgrößen mit der höchsten Bewertung „5“ (signifikanter Einfluss) [Clausen et al. 2004, S. 37].

Hauptprozess	Nummer	Einflussgröße	Geometrie	Seigerungen	Gefügeverteilung	Eigenspannungsverteilung	Temperatur	Mech. Historie	Bewertung
Stahlerzeugung	1	Elektromagnetisches Rühren		x	?				5
Schmieden	2	Umformgrad		x	x			x	5
	3	Abkühlanordnung			?	?	x		5
Drehen	4	Spannmittel	x			x			5
	5	Schnitttiefe				x			5
Wärmebehandlung	6	Erwärmgeschwindigkeit		x	x	x		x	5
	7	Abschreckmedium		x	x	x	x	x	5

Tabelle 9: Wichtigste Einflussgrößen der Prozesskette Zylinderring [Clausen et al. 2004, S. 37]

Die Auswahl der Einflussgrößen bzgl. der Verzugspotenzialträger (innerer Werkstückzustand) stellt sich in Anlehnung an [Clausen et al. 2004, S. 37] wie folgt dar. Das elektromagnetische Rühren besitzt einen Einfluss auf Seigerungen (gekennzeichnet durch „x“) und evtl. auch auf die Gefügeverteilung (gekennzeichnet durch „?“). Der Umformgrad beeinflusst die Seigerungen, die Gefügeverteilung und die mechanische Historie. Die Abkühlanordnung beeinflusst die Temperatur und evtl. auch die Gefüge- und Eigenspannungsverteilung. Das Spannmittel beeinflusst die geometrische Verteilung und die Eigenspannungsverteilung, während die Schnitttiefe nur die Eigenspannungsverteilung beeinflusst. Die Erwärmgeschwindigkeit und das Abschreckmedium beeinflussen, bis auf die geometrische Verteilung und bei der Erwärmgeschwindigkeit auch die Temperatur, alle anderen Verzugspotenzialträger. Mit der Wirkung von Erwärmgeschwindigkeit und Abschreckmedium auf die Seigerungen ist hier das aus den Seigerungen resultierende ortsabhängige Umwandlungsverhalten gemeint. Damit ist die Ursachenbestimmung und –bewertung für die Prozesskette „zylindrischer Ring“ abgeschlossen und es folgt die Systemanalyse für die Prozesskette „Zahnrad“.

Zahnrad

Zahnräder werden vor allem in Getrieben eingesetzt. Dazu können sie z.B. auf Wellen oder Achsen gelagert werden, sodass ihre Zähne ineinander greifen und so die Drehbewegung des einen Zahnrads auf das andere übertragen werden kann. Durch unterschiedlich große Räder können Drehzahl und Drehmomente variiert werden. Zahnräder dienen zur Übersetzung von Momenten und Geschwindigkeiten (siehe dazu auch [Schlecht 2010, S. 359]).

Verzugsneigung / -charakterisierung

Beim Zahnrad gibt es zwei grundsätzliche Verzugsarten zu unterscheiden [Kohlhoff et al. 2011, S. 155]. Einmal den Verzug des Grundkörpers und zum anderen den Verzug der Zähne. Auch hier sind von besonderer Bedeutung die Formänderungsverzüge. Im Einzelnen sind dies das „Dishing“ des Grundkörpers (tellerförmiges Verziehen) und die Formänderung der Zähne (Flankenlinienabweichung, Profillinienabweichung und Teilungseinzelfehler). Für eine genauere Betrachtung und Messung dieser Verzüge sei auf [Stöbener et al. 2012] verwiesen.

Konstruktionszeichnung

Die Konstruktionszeichnung des in den Experimenten verwendeten Zahnrads zeigt Abbildung 35.

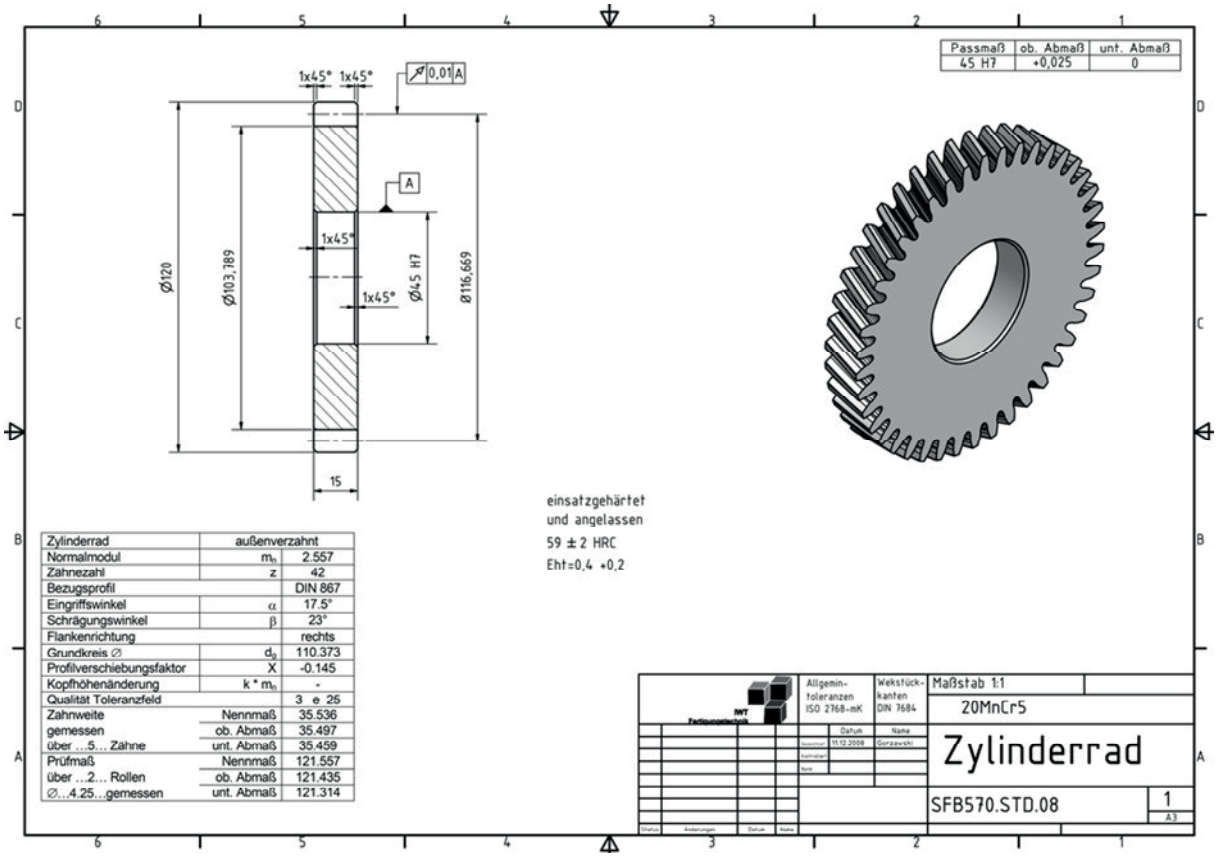


Abbildung 35: Konstruktionszeichnung des Zahnrads

Chemische Zusammensetzung und Materialeigenschaften

Die chemische Zusammensetzung der zwei Schmelzen des verwendeten Werkstoffs 20MnCr5 (Werkstoffnummer 1.7147) für die Beispielprozesskette „Zahnrad“ zeigt Tabelle 10.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	N
Soll nach DIN EN 10084:2008	0,17-0,20	0,15-0,40	1,1-1,4	<0,035	<0,035	1,0-1,3	-	-	-	-	-
Schmelze 2 Nr. 183324	0,20	0,23	1,35	0,011	0,020	1,02	0,03	0,10	0,12	0.04	0,015
Schmelze 3 Nr. 182156	0,21	0,09	1,35	0,013	0,026	1,24	0,09	0,12	0,10	0,03	0,012

Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung des Zahnrads in Masse-%

Fertigungsprozess des Zahnrads

Nach dem gleichen Vorgehen wie bei der Beschreibung des Fertigungsprozesses beim zylindrischen Ring kann das Prozessmodell für die Prozesskette Zahnrad erstellt werden. Abbildung 36 zeigt zusammenfassend den Fertigungsprozess für das Zahnrad.

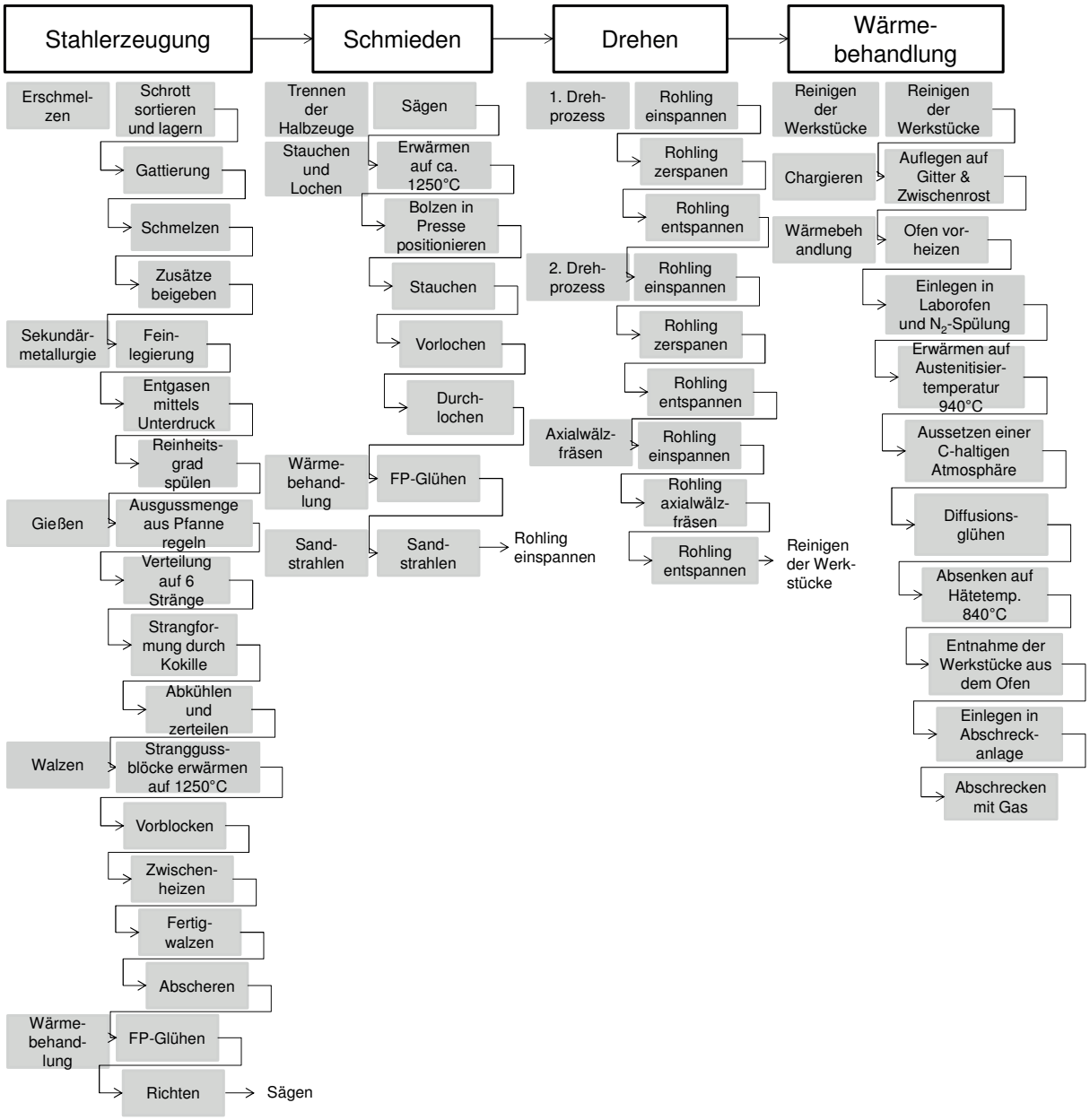


Abbildung 36: Fertigungsprozess Zahnrad

Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess

Nach der ausführlichen Beschreibung und Ermittlung der Einflussgrößen am Beispiel der Prozesskette „zylindrischer Ring“ wird im Folgenden das Ergebnis dieses Prozesses für die Prozesskette Zahnrad vorgestellt. Tabelle 11 zeigt die wichtigsten Einflussgrößen auf die Zahnradfertigung.

Hauptprozess	Nr.	Einflussgröße	Bewertung
Stahlerzeugung	1	Härtbarkeit (chemische Zusammensetzung)	5
Schmieden	2	Variation der Scheibenhöhe	5
	3	Schmiedegesenk	5
	4	Vorwärmebehandlung	5
Drehen	5	Zerspanstrategie	5
	6	Schrägungswinkel	5
Wärmebehandlung	7	Chargierung	5
	8	Erwärmtemperatur	5
	9	Erwärm-Atmosphäre	5
	10	Aufkohlungstiefe	5
	11	Randkohlenstoffgehalt	5
	12	Aufkohlungstemperatur	5
	13	Diffusionsatmosphäre	5
	14	Härtetemperatur	5

Tabelle 11: Wichtigste Einflussgrößen der Prozesskette Zahnrad [Kohlhoff et al. 2011, S. 157] und [Steinbacher et al. 2011, S. 169]

Für eine ausführlichere Betrachtung zur Bestimmung der Einflussgrößen sei auf die entsprechende Literatur verwiesen [Kohlhoff et al. 2011] und [Steinbacher et al. 2011].

5.2 Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“

Das Konzept dieses Planungshilfsmittels sieht vor, unterschiedliche Fertigungsergebnisse einer Prozesskette übersichtlich darzustellen. Ziel ist es, durch die Gegenüberstellung gleichartiger System- und Stellgrößen innerhalb einer Prozesskette weitere Aussagen in Form von übergeordneten Erkenntnissen zu erlangen. Die System- und Stellgrößen, die zu einer Darstellung gehören, sollten große Gemeinsamkeiten besitzen und sich insgesamt nur in wenigen Stellen unterscheiden. Folgende Voraussetzungen bzw. Ähnlichkeitskriterien für die Prozessketten innerhalb dieser Darstellung sollen gelten (Tabelle 12):

Ähnlichkeitskriterien
Annähernd gleiche Geometrie bzw. Geometrieverhalten
Ähnlicher Werkstoff bzw. ähnliches Werkstoffverhalten
Annähernd gleiche Fertigung bzw. gleiches Verhalten, obwohl unterschiedlich hergestellt

Tabelle 12: Ähnlichkeitskriterien für Prozessketten

Die Darstellung ist so gewählt, dass sie einen Überblick der einzelnen System- und Stellgrößen entlang der Prozesskette mit den jeweiligen Verzugsergebnissen dargestellt. Im Besonderen sollen gerade die Einflussgrößen in die Darstellung

aufgenommen werden, die sich innerhalb des Prozesskettenvergleichs unterscheiden, da nur diese Größen auch den Ausgang (Verzugswert) verändern und somit eine Verzugsaussage ermöglichen. Größen, die sich nicht ändern, aber zur Charakterisierung und Vollständigkeit der Prozesskette wichtig sind, werden ebenfalls in die Darstellung aufgenommen. In so einer Darstellung können nicht beliebig viele Informationen zur Charakterisierung integriert werden. Deshalb werden neben den variierten Einflussgrößen die Informationen aufgenommen, die einen bekannten Einfluss besitzen. Würden diese Einflussgrößen nicht angegeben, ist die Interpretation des Gesamtergebnisses schwierig (siehe Abbildung 37).

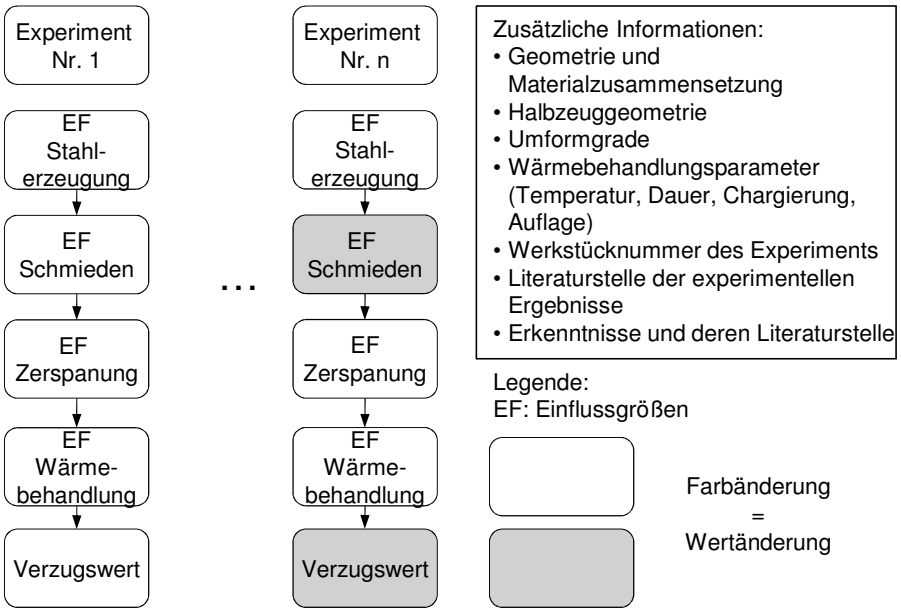


Abbildung 37: Notwendige Daten zur Interpretation der experimentellen Ergebnisse entlang einer Prozesskette

Neben den Auswahlkriterien, welche Einflussgrößen (Eingangsgrößen ins System) ausgewählt werden sollten, um für einen Systemüberblick geeignet interpretierbar zu sein, müssen nun noch die Ausgangsgrößen bestimmt werden. Hier werden zweckmäßigerweise wieder die Verzugskennwerte gewählt, die das Bauteil hinsichtlich seiner Verzugsneigung am besten charakterisieren. Insgesamt ergibt sich daraus der Aufbau in Abbildung 37.

Prozesskettenvergleich anhand von Beispielprozessketten

Die Anwendung dieser Vorgehensweise wird für die zwei Beispielprozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ gezeigt. Die Werte dieser Prozessketten entstammen aus statistischen Versuchen. Die statistischen Versuche zur Prozesskette „zylindrischer Ring“ werden in [Clausen et al. 2004] und [Clausen et al. 2006] und die statistischen Versuche zur Prozesskette „Zahnrad“ in

[Kohlhoff et al. 2011] und [Steinbacher et al. 2011] beschrieben. Zuerst folgt die Ausarbeitung für die Prozesskette „zylindrischer Ring“ und anschließend für die Zahnradfertigung. Das Ergebnis der Methode Prozesskettenvergleich der Prozesskette „zylindrischer Ring“ zeigt Abbildung 46 im Anhang. In dieser Darstellung werden zwei statistische Versuche vorgestellt: Versuch 1 - Nr. 1-16 [Clausen et al. 2004] und Versuch 2 – Nr. 17-32 [Clausen et al. 2006]. Dargestellt sind zum einen die Eingangsgrößen (Herstelldaten genannt), die für alle Bauteile identisch waren. Zum anderen sind die variierten Eingangsgrößen angegeben (Versuche 1-32) entlang der Hauptprozesse „Stahlerzeugung-Wärmebehandlung“. Tabelle 13 zeigt ausgewählte Erläuterungen zu den Eingangsgrößen.

Eingangsgröße	Erläuterung
Gussformat (Schmelze): vierkant	Bezieht sich auf den Stranggussblock
Durchmesser	Durchmesser des Halbzeugs Stabstahl
Gerührt / ungerührt	Meint das elektromagnetische Rühren
Abkühlart (Abkühlanordnung): Vereinzelt/radial asymmetrisch	Vereinzelt: Einzeln, ohne Einwirkung anderer Werkstücke abgekühlt. Radial asymmetrisch: Über den Radius verteilt wurde durch eine definierte Anordnung der Werkstücke eine definierte asymmetrische Abkühlung des Radius erreicht.
v_c	Schnittgeschwindigkeit beim Innen- und Außendrehen im letzten Schnitt
f	Vorschub beim Innen- und Außendrehen im letzten Schnitt
KSS 1	Kühlschmierstoff eingeschaltet
Ofen Solo	„Solo“ ist der Name des Ofenherstellers
Chargierung liegend	Die Ringe liegen auf dem Chargiergestell
Auflage Stern	Das Werkstück lag auf drei Punkten auf einer sternförmigen Auflage.
$v_{Erwärm}$: warmer Ofen Erwärmgeschwindigkeit	Der Begriff warmer Ofen deutet an, dass sich das Werkstück schneller auf Austenitisiertemperatur erwärmt als beim kalten Ofen.
Gasvolumenstrom	Angabe in Normliter.

Tabelle 13: Ausgewählte Erläuterungen zu den Eingangsgrößen beim zylindrischen Ring

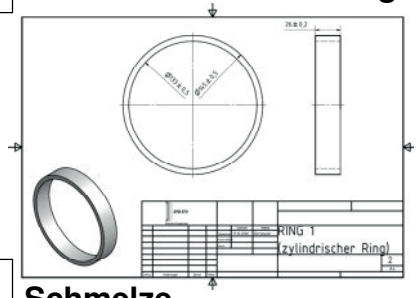
In den zuvor genannten Veröffentlichungen und in [Hoffmann und Clausen 2003, S. 35ff], [Brinksmeier und Rentsch 2003, S. 108ff], [Brinksmeier 2003, S. 162ff], [Keßler und Hoffmann 2003, S. 216ff] und [Lübben und Mayr 2003, S. 253ff] werden noch detailliertere Informationen zu den Eingangsgrößen gegeben.

Als Ausgangsgrößen wurden folgende mittlere Größen und deren Standardabweichungen „s“ bestimmt:

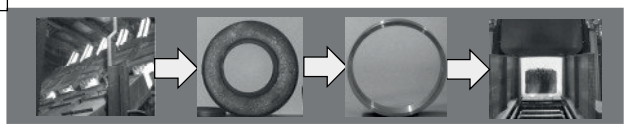
- Δr_a: relative Maßänderung Radius außen [%]: ($\Delta r_a=(r_1-r_0)/r_0$, r_0 nach Fertigung, r_1 nach WB)
- Δh: relative Höhenänderung [%]
- ΔR: Rundheitsänderung außen [µm]
- ΔO: Ovalitätsänderung außen (FFT 2. Ordnung) [µm]
- ΔD: Dreieckigkeitsänderung außen (FFT 3.Ordnung)

Für die Berechnung der Ausgangsgrößen sei auf die Literatur verwiesen ([N.N. 2008] und [Hoffmann 2007, S. 320]). Beispielsweise kann bzgl. der Rundheitsänderung sehr übersichtlich folgendes interpretiert werden. Bei der Benutzung von Pendelbacken/Spanndorn und beim Abschrecken im Gasdüsenfeld werden die geringsten Rundheitsänderungen erzielt (siehe ovale Kennzeichnung in Abbildung 46). Wie unter 5.2 beschrieben, gehören zu dieser Vorgehensweise auch zusätzliche Informationen. Diese sind in Abbildung 38 dargestellt.

1 Konstruktionszeichnung



2 Fertigungsprozesskette



Unternehmen 1:	Unternehmen 2:	IWT. Bremen	IWT.
Stranggussanlage	Halbauto-	Drehzentrum Index	Bremen
Gefertigt nach	matische	V250:	Ofen „Solo“
Richtlinien des	Schmiedepresse	-Pickup-Bauweise	
Stahlwerks		-Werkzeugrevolver	

3 Schmelze

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	AL
Sollwerte nach EN ISO 683-17	0.93 - 1.05	0.15 - 0.35	0.25 - 0.45	<0.025	<0.015	1.35 - 1.60	<0.10	-	<0.30	<0.050
Schmelze 3 Nr. 162636	0.97	0.22	0.43	0.008	0.003	1.48	0.09	0.23	0.10	0.006

4 Wesentliche Erkenntnisse

1. Parameter aus der Stahlerzeugung und vom Schmieden zeigen keinen Einfluss [Clausen et al. 2006], [Zoch 2009].
2. Art der Einspannung bestimmt Rundheitsabweichung und Fertigungseigenspannungen [Sölter 2010].
3. Ungleichmäßige Fertigungseigenspannungen führen zu Änderungen der Rundheitsabweichungen beim Erwärmen [Surm und Hoffmann 2009]
4. Effekte aufgrund Eigengewicht / Reibung beeinflussen die Rundheitsabweichungen [Surm 2011].
5. Formabweichungen aufgrund rein thermischer Inhomogenitäten werden nur bei der Ölabschreckung erwartet [Surm et al. 2012].
6. Effekte der Umwandlungsplastizität bestimmen das Verzugsverhalten [Surm et al. 2012], [Frerichs et al. 2009].
7. Ovalitätsänderungen können im Moment nicht vollständig auf ein konkretes Verzugspotenzial zurückgeführt werden [Clausen et al. 2006].

Abbildung 38: Zusätzliche Informationen zur Prozesskette „Zylinderring“

In der Form wie in Abbildung 39 wurden Abbildung 46 und Abbildung 38 zu dem Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ in einer Darstellung zusammengefasst.

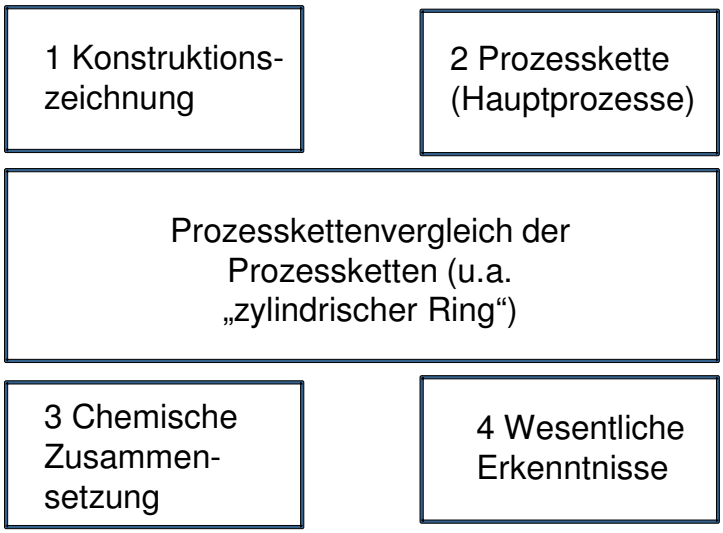


Abbildung 39: Skizzenhafte Darstellung einer zusammenfassenden Darstellung

Den Prozesskettenvergleich für das Zahnrad im Überblick zeigt Abbildung 47 im Anhang. Dargestellt sind wieder zwei statistische Versuche. Versuch 1, Nr. 1-18 [Kohlhoff et al. 2011] und Versuch 2, Nr. 19-42 [Steinbacher et al. 2011].

Bei der Zahnradfertigung sind die Eingangsgrößen ebenfalls in Herstelldaten und die variierten Eingangsgrößen getrennt dargestellt. Ausgewählte Erläuterungen zu den Eingangsgrößen zeigt Tabelle 14.

Eingangsgröße	Erläuterung
Scheibenhöhe	Die Höhe wurde variiert von 22,4 mm bis 22 mm (Veränderung des Umformgrades von -0,98 bis -1,00) [Kohlhoff et al. 2011, S. 156].
Gesenk symmetrisch	Symmetrisch in Bezug auf das Schmiedegesenk bedeutet, dass der Butzen auf der Hälfte des Scheibenloches positioniert wurde. Asymmetrisch bedeutet demnach, dass der Butzen nicht auf der Hälfte positioniert wurde [Kohlhoff et al. 2011, S. 156].
Zerspanstrategie	Die Zerspanstrategie unterscheidet sich durch das Materialabnahmeverhältnis von oberer Stirnseite und unterer Stirnseite des Zahnrads [Kohlhoff et al. 2011, S. 156]. Zerspanstrategie 1: Materialabtrag von 1 mm auf der oberen Stirnseite und 6 mm auf der unteren Stirnseite. Zerspanstrategie 2: Materialabtrag von 4 mm auf der oberen Stirnseite und 3 mm auf der unteren Stirnseite.
Schrägungswinkel	Schrägungswinkel $\beta = 23°$ (Schrägverzahnung). Zusätzlich eingestellt wurden: Dünne Zähne, geringer Eingriffswinkel und negative Profilverschiebung. Dies sollte zu einer verzugsanfälligeren, komplexeren Geometrie führen. Schrägungswinkel $\beta = 0°$ (Geradverzahnung). Zusätzlich eingestellt wurden: Positive Profilverschiebung. Dies sollte zu einer verzugsunanfälligeren, einfacheren Geometrie („dicke Zähne“) führen. [Kohlhoff et al. 2011S. 156/157]
Aufkohlungsdauer	1.20..1.20..1.22 Die erste Zahl vor dem Punkt gibt die Aufkohlungsdauer in Minuten an. Die zweite Zahl nach dem Punkt gibt die Diffusionsdauer in Minuten an. Die zwei Punkte „..“ deuten an, dass ein neues Segment folgt [Steinbacher et al. 2011, S. 168].
Ofen „Ipsen“	„Ipsen“ ist der Name des Ofenherstellers

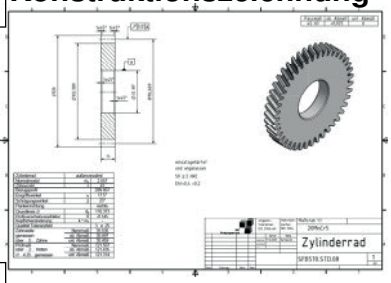
Tabelle 14: Ausgewählte Erläuterungen zu den Eingangsgrößen beim Zahnrad

Als Ausgangsgrößen wurden folgende mittlere Größen und deren Standardabweichungen bestimmt:

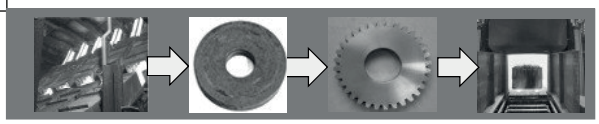
- ΔS: Steigungsänderung (Dishing) [µm/mm]
- ΔB: Änderung Bohrungs-Durchmesser [‰]
- Δf_{pl}: Teilungsabweichung links [µm] (1.Ordnung)
- Δf_{pr}: Teilungsabweichung rechts [µm] (1.Ordnung
- $\Delta f_{h\alpha l}$: Profil-Winkelabweichung links µm
- $\Delta f_{h\alpha r}$: Profil-Winkelabweichung rechts µm
- $\Delta f_{h\beta l}$: Flankenlinienabweichung links µm
- $\Delta f_{h\beta r}$: Flankenlinienabweichung rechts µm

Für detailliertere Erläuterungen zu den Ausgangsgrößen sei z.B. auf [Kohlhoff et al. 2011, z.B. S. 157] verwiesen. Die Zusatzinformationen sind in Abbildung 40 angegeben. Aus Abbildung 47 und Abbildung 40 entsteht wieder das Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ für die Prozesskette „Zahnrad“.

1 Konstruktionszeichnung



2 Fertigungsprozesskette



Unternehmen 1:	Unternehmen 2:	IWT, Bremen	IWT, Bremen
Stranggussanlage Gefertigt nach Richtlinien des Stahlwerks	Halbauto- matische Schmiedepresse	Wälzfräsmaschine Gleason-Pfauter GP130: -Vertikale Werkstückachse -Werkstückeinspannung durch Spreizbuchse und Gegenhalter	Ofen „IPSEN“

3 Schmelze

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	AL	N
Sollwerte nach DIN 10084:2008	0.17-0.22	max 0.4	1.1-1.4	max 0.025	max 0.035	1.0-1.3	-	-	-	-	-
Schmelze 2 Nr.183324	0.20	0.23	1.35	0.011	0.020	1.02	0.03	0.10	0.12	0.04	0.015
Schmelze 3 Nr. 182156	0.21	0.09	1.35	0.013	0.026	1.24	0.09	0.12	0.10	0.03	0.012

4 Wesentliche Erkenntnisse

1. Eigenspannungen aus dem Wälzfräsprozess haben keinen Einfluss auf die untersuchten Zahnräder [Kohlhoff et al. 2011].
2. Die Abrichtbedingungen beim Profilschleifen der ungehärteten Verzahnung beeinflussen den Eigenspannungszustand.
3. Einflankiges Profilschleifen zeigt Potenzial zur Verzugskompensation durch Vorspannen.
4. Der Grundkörperverzug beeinflusst den Verzahnungsverzug [Kohlhoff et al. 2011].
5. Die Verzahnung verzieht auch unabhängig vom Grundkörper [Kohlhoff et al. 2011].
6. Die Härtbarkeit und die Vorwärmebehandlung sind die Haupteinflussfaktoren auf den Verzahnungsverzug [Kohlhoff et al. 2011].
7. Der Grundkörperverzug des Zahnrades ähnelt dem der vergleichbar wärmebehandelten Scheibe [Steinbacher et al. 2011].
8. Durch das Einbringen der Verzahnung entsteht ein signifikanter Einfluss auf die Ausprägung der Maßänderungen in der Bohrung und dem Kopfkreis/Außendurchmesser, während die Höhenänderung gleich bleibt [Steinbacher et al. 2011].
9. Die Verzahnung ist nicht unabhängig vom Grundkörper zu diskutieren. Teilungsfehler sind zum Teil auf den Grundkörperverzug zurückzuführen [Steinbacher et al. 2011].
10. Verzahnungsverzug bzw. der Verzug der Zähne ist symmetrisch [Steinbacher et al. 2011].
11. Aufgrund der gerichteten Strömung des Abschreckgases haben sich durch eine Variation der Zahnradpositionierung (liegend/hängend) erhebliche Unterschiede innerhalb nahezu aller betrachteten Maß- und Formänderungsgebiet ergeben [Steinbacher et al. 2011].

Abbildung 40: Zusätzliche Informationen zur Prozesskette „Zahnrad“

5.3 Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, wie Handlungsempfehlungen für die Planung des gesamten Systems (Prozesskette) aus fertigungstechnischen Ergebnissen bzw. den Erkenntnissen erstellt werden können. Das Konzept sieht vor, eine Vorgehensweise zu erstellen, um die textliche Interpretation der fertigungstechnischen Ergebnisse von Prozessketten in Handlungsempfehlungen zu überführen. Textliche Interpretationen können mündlich geäußert sein und dann aufgeschrieben werden oder sie stammen aus der Literatur. Wie bei dem Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ werden die textlich interpretierten Ergebnisse innerhalb von Prozessketten abgelegt, die die Ähnlichkeitskriterien (Tabelle 12) erfüllen müssen (siehe Abbildung 41).

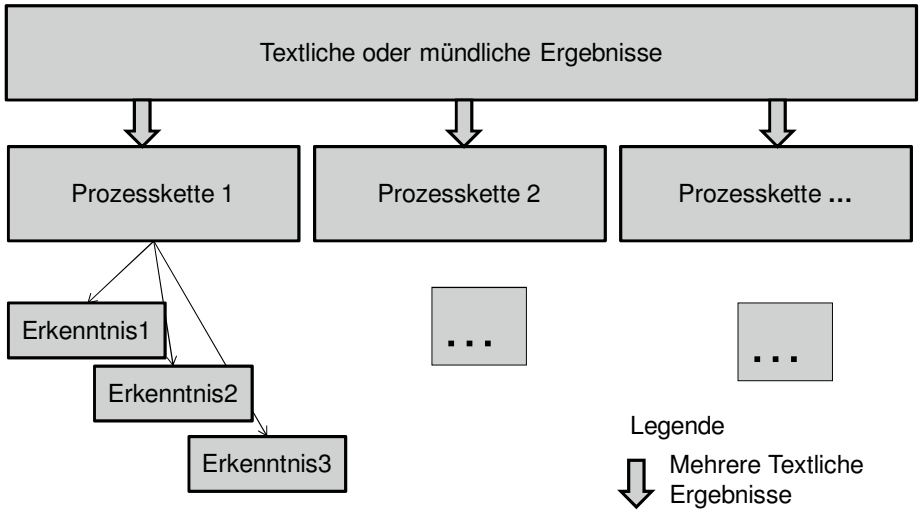


Abbildung 41: Übergeordnete Struktur zur Einordnung der Erkenntnisse

Ziel dieser Vorgehensweise ist es, alle möglichen Erkenntnisse bzgl. Prozessketten aufzuschreiben und für die Planung einer Prozesskette in Form einer Handlungsempfehlung zur Verfügung zu stellen. Zur Einordnung der Handlungsempfehlungen werden folgende Kategorien vorgeschlagen:

1. Prozesskette (PK)
2. Material (M)
3. Geometrie (G)
4. Hauptprozess (HP)
5. Rohteil (Geometrieinformationen) (R)
6. Unterprozess (UP)
7. Fertigungsmittel (F)
8. Einstellparameter (E)
9. Werkstückzustand (WZ)
10. Verzug (V)
11. Wechselwirkung (W)

Diese elf Kategorien werden im Folgenden Planungsgrößen genannt. Innerhalb der Prozesskette werden die Erkenntnisse wie folgt den Planungsgrößen zugeordnet (siehe Tabelle 15).

Prozesskette: Prozesskette 1 Material: Material 1 Geometrie: Geometrie 1		
Erkenntnis mit Quellenangabe		Handlungsempfehlung
1	Eine Verringerung des **Einstellparameters 1** führt zu einer Verringerung der **Ausgangsgröße 1** ([Quelle 1]). Zusätzliche Schlagworte: **Hauptprozess 1, Rohteil 1, Unterprozess 1, Fertigungsmittel 1, Werkstückzustand 1**	Um die Ausgangsgröße 1 zu verringern, sollte der Einstellparameter 1 möglichst gering gewählt werden.

Nr.	Hauptprozess (HP)	Rohteil (Geometrieinformationen) (R)	Unterprozess (UP)	Fertigungsmittel (F)	Einstellparameter (E)	Werkstückzustand (WZ)	Verzug (V)	Wechselwirkung (W)
1	Hauptprozess 1	Rohteil 1	Unterprozess1	Fertigungsmittel 1	Einstellparameter 1	Werkstückzustand 1	Ausgangsgröße 1	-

Tabelle 15: Einordnungskriterien einer Erkenntnis innerhalb einer Prozesskette

Dabei müssen nicht alle Planungsgrößen in gleicher Weise angegeben werden. Zwingend erforderlich für die Identifizierung einer Prozesskette sind die Angabe von Prozesskette, Material und Bauteilgeometrie (Kopfteil in Tabelle 15). Ebenso notwendig ist eine Aussage über den Verzug. Mindestens eine Größe entweder Hauptprozess, Unterprozess, Fertigungsmittel oder Einstellparameter muss als Eingangsgröße ins System genannt werden. Ist beispielsweise nur das Fertigungsmittel in der Erkenntnis genannt, kann evtl. auch auf die Prozesse geschlossen und diese ebenfalls notiert werden. Für das Fertigungsmittel Dreibackenfutter kann der Unterprozess „Einspannen“ und der Hauptprozess „Zerspanung“ ergänzt werden. Dies wird dann unter dem Begriff „Zusätzliche Schlagworte“ notiert. Eine Erkenntnis wird auch notiert, wenn über den Werkstückzustand keine Informationen vorliegen. Die Angabe des Werkstückzustands ist optional. Die Angabe einer Wechselwirkung ist besonders wichtig. Sie gibt Aufschluss, ob auch andere Prozesse von diesem Schritt abhängen. Deshalb wird, wenn keine Wechselwirkung vorliegt, die Spalte mit einem Strich „-“ versehen. Zum Schluss soll die Erkenntnis so umgeschrieben werden, dass daraus eine Handlungsempfehlung wird, die allerdings den Inhalt der Erkenntnis nicht verändern darf (siehe Tabelle 15). Ein Beispiel für eine vollständig erfasste Erkenntnis wäre: Für Prozesskette 1 bei Material 1 und der Geometrie 1 führt bei Hauptprozess 1, dem Unterprozess 1 und dem Fertigungsmittel 1 und einer Verringerung des Einstellparameters 1 zu einer Verringerung der Ausgangsgröße 1, weil der innere Werkstückzustand 1 homogener wird. In erster Konsequenz ent-

steht so eine tabellarische Sammlung von Handlungsempfehlungen. Durch die Gliederung der Erkenntnis in Schlagworte („fett markiert“) und der Zuordnung in die Planungsgrößen, kann z.B. in dieser Tabelle eine für die Planung wichtige Stellgröße (z.B. Einstellparameter 1 = Schnitttiefe) gefunden werden. Durch die Handlungsempfehlung kann dann entschieden werden, welchen qualitativen oder quantitativen Wert die Stellgröße annehmen soll.

Handlungsempfehlung anhand von Beispielprozessketten

Um dieses Planungshilfsmittel beispielhaft zu verdeutlichen, sollen die wesentlichen Erkenntnisse der Prozesskette „zylindrischer Ring“ (siehe Abbildung 38) und „Zahnrad“ (siehe Abbildung 40) genutzt werden. Die Erkenntnisse der Prozesskette „zylindrischer Ring“ sind in Tabelle 16 und Tabelle 17 nach dem zuvor beschriebenen Vorgehen eingetragen worden. Nach dem gleichen Prinzip werden Handlungsempfehlungen für die Prozesskette Zahnrad implementiert. Wenn im Folgenden von „Abweichungen“, wie z.B. Rundheitsabweichung gesprochen wird, ist immer die Abweichung nach der Zerspanung gemeint.

Prozesskette: 1 Material: 100Cr6 Geometrie: Zylindrischer Ring		
Erkenntnis mit Quellenangabe		Handlungsempfehlung
1	**Parameter** aus der **Stahlerzeugung** und vom **Schmieden** zeigen **keinen Einfluss** [Clausen et al. 2006, S. 318], [Zoch 2009, S. 346].	Für diese Geometrie und die gewählten Vorprozesse vor der Zerspanung zeigen die inneren Werkstückzustände keinen Einfluss auf den späteren Verzug. Die Einflussgrößen aus den Vorprozessen müssen nicht weiter beachtet werden.
2	Art der **Einspannung** bestimmt **Rundheitsabweichung** und Fertigungs**eigenspannungen** [Sölter 2010, S. 126]. Zusätzliche Schlagwörter: **Zerspanung, Drehen**	Wenn die Abschreckung nicht dominant ist, kann der Verzug über Einspanntechnik und Einspannorientierung reduziert werden. Spanndorn und Pendelbacken wirken sich günstig auf das Rundheitsverhalten aus.
3	Ungleichmäßige Fertigungs**eigenspannungen** führen zu **Änderungen der Rundheitsabweichung**en beim **Erwärmen** [Surm und Hoffmann 2009, S. 396]. Zusätzliche Schlagwörter: **Zerspanung, Wärmebehandlung**	Durch geeignete Wahl der Einspannorientierung beim Dreibackenfutter zwischen erster und zweiter Aufspannung können ungleichmäßige Fertigungseigenspannungen reduziert werden [Sölter 2010, S. 70].
4	Effekte aufgrund **Eigengewicht / Reibung** beeinflussen die **Änderung der Rundheitsabweichungen** [Surm 2011b, S. 107, 152] Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung, Erwärmen**	Die sternpunktförmige Chargierung zeigt das geringste Verzugsverhalten. Lege sternpunktförmig auf.

5	**Änderung der Formabweichungen** aufgrund rein **thermischer Inhomogenitäten** werden nur bei der **Ölabschreckung** erwartet [Surm 2011b, S. 30]. Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung, Temperatur**	Geometrien, die zu thermischen Inhomogenitäten neigen (wie z.B. ein konischer Ring) sollten u.U. nicht in Öl sondern in Gas oder einem Salzbad abgeschreckt werden.
6	Effekte der **Umwandlungsplastizität** bestimmen das **Verzugsverhalten** [Frerichs et al. 2009, S. 407], [Surm 2011a, S. 23]. Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung, Abschrecken, mechanische Historie**	Vermeide thermische Inhomogenitäten, weil dadurch Umwandlungsplastizität erzeugt wird.
7	**Ovalitätsänderungen** können im Moment nicht vollständig auf ein konkretes **Verzugspotenzial** zurückgeführt werden [Clausen et al. 2006, S. 315]. Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung, Erwärmen, Abschrecken**	Da keine Korrelation zwischen der Ovalitätsänderung nach der Wärmebehandlung und der Ovalität nach der Fertigung existiert, kann die Ovalitätsänderung durch System- und Stellgrößen nicht direkt beeinflusst werden.

Tabelle 16: Wesentliche Erkenntnisse der Prozesskette „zylindrischer Ring“ (siehe Abbildung 38)

Aus den Erkenntnissen werden die in Tabelle 16 genannten Handlungsempfehlungen erzeugt. Wichtige Schlagwörter für die Planung sind „fett markiert“ worden. Über diese Schlagwörter soll die Handlungsempfehlung z.B. in einem Planungssystem wiedergefunden bzw. identifiziert werden. Weitere Schlagwörter für diese Erkenntnis können zur besseren Auffindbarkeit zusätzlich notiert werden. Zur Planung werden die Schlagwörter wie folgt den Planungsgrößen zugeordnet (Tabelle 17):

Nr.	Hauptprozess (HP)	Rohteil (Geometrieinformationen) (R)	Unterprozess (UP)	Fertigungsmittel (F)	Einstellparameter (E)	Werkstückzustand (WZ)	Verzug (V)	Wechselwirkung (W)
1	Stahlerzeugung Schmieden	-	-	-	Parameter, kein Einfluss	-	kein Einfluss	-
2	Zerspanung	-	Drehen	-	Einspannung	Eigenspannung	Rundheitsabweichung	-
3	Zerspanung, Wärmebehandlung	-	Erwärmen	-	-	Eigenspannung	Rundheitsänderung	-
4	Wärmebehandlung	-	Erwärmen	-	Eigengewicht, Reibung	-	Rundheitsänderung	-

5	Wärmebehandlung	-	Abschrecken	-	Öl	Temperatur, thermische Inhomogenität	Formänderung	-
6	Wärmebehandlung	-	Abschrecken	-	-	Mechanische Historie, Umwandlungsplastizität	Verzugsverhalten	-
7	Wärmebehandlung	-	Ewärmen Abschrecken	-	-	Verzugspotential	Ovalitätsänderung	-

Tabelle 17: Zuordnung der Schlagwörter zu den Planungsgrößen der Prozesskette „zylindrischer Ring“

Ein Beispiel soll zeigen, wie aus Tabelle 17 ein System zur Planung aufgebaut werden könnte. Bei der Planung eines zylindrischen Rings mit den Abmessungen aus Abbildung 29 wird nach Handlungsempfehlungen zum Abschrecken gesucht. Aus Tabelle 17 ist ersichtlich, dass es drei Handlungsempfehlungen zu diesem Thema gibt (Unterprozess: Abschrecken, Nr. 5, 6 und 7). Aus Tabelle 16 kann anschließend für die Handlungsempfehlungen Nr. 5-7 für den betrachteten dünnwandigen Zylinderring zum Beispiel geschlossen werden, den Ring besser in Gas als in Öl abzuschrecken.

Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen die abgeleiteten Handlungsempfehlungen und Zuordnung der Schlagworte zu den Planungsgrößen der Prozesskette „Zahnrad“ aus den wesentlichen Erkenntnissen aus Abbildung 40.

Prozesskette: 2 Material: 20MnCr5 Geometrie: Zahnrad		
Erkenntnis mit Quellenangabe		Handlungsempfehlung
1	**Eigenspannungen** aus dem **Wälzfräsprozess** haben **keinen Einfluss** auf die untersuchten **Zahnräder** [Kohlhoff et al. 2011, S. 157]. Zusätzliche Schlagwörter: **Zerspanung**	Die Einstellparameter aus dem Wälzfräsprozess müssen bzgl. der Verzugsberücksichtigung nicht beachtet werden.
2	Die **Abrichtbedingungen** beim **Profilschleifen** der **ungehärteten Verzahnung** beeinflussen den **Eigenspannungszustand** [N.N. 2011]. Zusätzliche Schlagwörter: **Zerspanung, Wärmebehandlung**	Durch geeignete Wahl der Abrichtbedingungen vor dem Härten könnte der Verzug nach dem Härten kompensiert werden.

3	Einflankiges **Profilschleifen** zeigt Potenzial zur **Verzugskompensation** durch **Vorspannen** [N.N. 2011] Zusätzliche Schlagwörter: **Zerspanung, Wärmebehandlung**	Durch einflankiges Profilschleifen vor dem Härten könnte der Verzug kompensiert werden.
4	Der **Grundkörperverzug** beeinflusst den **Verzahnungsverzug** [Kohlhoff et al. 2011, S. 164]. Zusätzliche Schlagwörter: **Stahlerzeugung, Härtbarkeit, Schmieden, FP-Glühen**	Minimiere den Grundkörperverzug, da er den Verzahnungsverzug beeinflusst. Positiv auf einen geringeren Grundkörperverzug sind eine niedrigere Härtbarkeit sowie FP-Glühen nach dem Schmieden (siehe auch Nr. 6).
5	Die **Verzahnung verzieht** auch unabhängig vom **Grundkörper** [Kohlhoff et al. 2011, S. 164]. Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung**	Beachte, dass sich der Verzahnungsverzug auch unabhängig vom Grundkörper verzieht.
6	Die **Härtbarkeit** und die **Vorwärmebehandlung** sind die Haupteinflussfaktoren auf den **Verzahnungsverzug** [Kohlhoff et al. 2011, S. 159]. Zusätzliche Schlagwörter: **Stahlerzeugung, Schmieden, FP-Glühen**	Eine niedrigere Härtbarkeit sowie FP-Glühen anstatt Vergüten und Anlassen nach dem Schmieden bewirken überwiegend einen niedrigeren Grundkörperverzug (Maßänderung) und somit einen geringeren Verzahnungsverzug (Details siehe [Clausen et al. 2009a, S. 358], [Kohlhoff et al. 2011, S. 159]).
7	Der **Grundkörperverzug** des **Zahnrads** ähnelt dem der vergleichbar **wärmebehandelt**en **Scheibe** [Steinbacher et al. 2011, S. 172].	Um das Dishing zu reduzieren, sollten die Zahnräder gehängt werden. Werden die Zahnräder gelegt, ist eine Dreipunktauflage günstiger als eine Zweipunktauflage (siehe Auswertung zur Scheibe in [Clausen et al. 2009b, S. 45])
8	Durch das **Einbringen** der **Verzahnung** (gegenüber der Scheibe) entsteht ein signifikanter Einfluss auf die Ausprägung der **Maßänderungen** in der **Bohrung** und dem **Kopfkreis/Außendurchmesser**, während die **Höhenänderung** gleich bleibt [Steinbacher et al. 2011, S. 172]. Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung**	Im Vergleich zu einer Scheibe wird durch das Einbringen der Verzahnung das Volumen reduziert und die Oberfläche erhöht. Desto geringer das Volumen und desto größer die Oberfläche, desto schneller wird das Zahnrad gekühlt. Desto höher ist der Temperaturunterschied zwischen äußerem und innerem (Bohrungs-) Durchmesser und desto mehr Verzug wird erwartet.
9	Die **Verzahnung** ist nicht unabhängig vom **Grundkörper** zu diskutieren. **Teilungsfehler** sind zum Teil auf den **Grundkörperverzug** zurückzuführen [Steinbacher et al. 2011, S. 174]. Zusätzliche Schlagwörter: **Stahlerzeugung, Schmieden, Wärmebehandlung**	Desto größer der Grundkörperverzug (diametrische Änderung, [Steinbacher et al. 2011, S. 174]), desto größer ist der Teilungsfehler. Eine niedrigere Härtbarkeit sowie FP-Glühen nach dem Schmieden bewirken überwiegend einen niedrigeren Grundkörperverzug (Maßänderung).
10	**Verzahnungsverzug** bzw. der **Verzug der Zähne** ist symmetrisch [Steinbacher et al. 2011, S. 171]. Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung**	Einflussgrößen der Wärmebehandlung beeinflussen den Verzahnungsverzug symmetrisch. Für eine evtl. Nachbearbeitung reicht die Berücksichtigung einer Seite aus.

11	Aufgrund der gerichteten Strömung **des Abschreckgases** haben sich durch eine Variation der **Zahnradpositionierung** (liegend/hängend) erhebliche Unterschiede innerhalb nahezu aller betrachteten **Maß- und Formänderung**sgebiete ergeben [Steinbacher et al. 2011, S. 175]. Zusätzliche Schlagwörter: **Wärmebehandlung**	Verzugsanfällige Grundkörper sollten gehängt werden, um Dishing-Effekte zu reduzieren. Im Falle einer verzugsanfälligen Verzahnung sollten die Zahnräder besser gelegt werden.

Tabelle 18: Wesentliche Erkenntnisse der Prozesskette „Zahnrad“

Nr.	Hauptprozess (HP)	Rohteil (Geometrieinformationen) (R)	Unterprozess (UP)	Fertigungsmittel (F)	Einstellparameter (E)	Werkstückzustand (WZ)	Verzug (V)	Wechselwirkung (W)
1	Zerspanung	-	Wälzfräsen	-	-	Eigenspannung	kein Einfluss	-
2	Zerspanung, Wärmebehandlung	-	Profilschleifen	-	Abrichtbedingung	Eigenspannung, ungehärtet	-	-
3	Zerspanung, Wärmebehandlung	-	Profilschleifen	-	Vorspan spannung	-	Kompensation	-
4	Stahlerzeugung, Schmieden	-	FP-Glühen	-	Härtbarkeit	-	Grundkörperverzug, Verzahnungsverzug	-
5	Wärmebehandlung	-	-	-	-	-	Grundkörper-, Verzahnungsverzug	-
6	Stahlerzeugung, Schmieden	-	Vorwärmebehandlung, FP-Glühen	-	Härtbarkeit	-	Verzahnungsverzug	-
7	Wärmebehandlung	Scheibe	-	-	-	-	Grundkörperverzug	-
8	Wärmebehandlung	-	Einbringen der Verzahnung	-	-	-	Maßänderung, Bohrung, Kopfkreis, Außendurchmesser, Höhenänderung	-
9	Stahlerzeugung, Schmieden, Wärmebehandlung	Verzahnung, Grundkörper	-	-	-	-	Grundkörperverzug, Teilungsfehler	-
10	Wärmebehandlung	-	-	-	-	-	Verzahnungsverzug	-

11	Wärmebe-handlung	-	Abschrecken	Ab-schreck gas	Zahn-radposi-tionie-rung	-	Maßänderung, Formänderung	-

Tabelle 19: Zuordnung der Schlagwörter zu den Planungsgrößen der Prozesskette „Zahnrad“

Insgesamt können aus den hier genannten Veröffentlichungen, aus denen die wesentlichen Erkenntnisse stammen, noch detailliertere Erkenntnisse gewonnen werden, die dann zu detaillierteren Handlungsempfehlungen führen. Dies wird in Kapitel 6.1 gezeigt.

6 Planungshilfsmittel zur Berücksichtigung des inneren Werkstückzustands aus Sicht der Arbeitsplanerstellung

In diesem Kapitel folgt die Anwendung der zwei zuvor besprochenen Planungshilfsmittel. Die Planungshilfsmittel sind aus der Betrachtung der gesamten Prozesskette entstanden. Es wird gezeigt, wie die Vorgehensweisen angepasst bzw. angewendet werden können, um als Planungshilfsmittel für die Arbeitsplanerstellung zu dienen. Für das Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“ wird gezeigt, wie die Erkenntnisse und deren Handlungsempfehlungen zum Zeitpunkt der Teilaufgaben der Arbeitsplanerstellung unterstützend hinzugezogen werden können (6.1). Dazu wird das Vorgehen modifiziert, um speziell die Arbeitsplanerstellung zu unterstützen. Eine rechnergestützte Umsetzung wird ebenfalls beispielhaft angedeutet. Dies wird wieder für beide Beispielprozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ gezeigt. Zusätzlich wird für die Prozesskette „zylindrischer Ring“ besprochen, wie detailliertere Erkenntnisse hinzugefügt werden können, um die Aussagekraft der Handlungsempfehlungen zu erhöhen. Das Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ wird nicht modifiziert. Die Planungsinformationen werden direkt benutzt, um einen verzugsgerechten Arbeitsplan zu erstellen. Die Ergebnisse des Arbeitsplans werden jeweils für beide Prozessketten (zylindrischer Ring und Zahnrad) gezeigt. Diese Arbeitspläne berücksichtigen und minimieren den Verzug im Besonderen (6.2). Ob ein verzugsgerechter Arbeitsplan auch wirtschaftlich zu geringeren Kosten führt, kann ein Wirtschaftlichkeitsvergleich bieten. Einen Ansatz für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich wird in [Klein und Thoben 2006] diskutiert.

6.1 Handlungsempfehlungen für die Arbeitsplanerstellung

Die bisherige Sichtweise dieses Planungshilfsmittels lag auf der Planung der gesamten Prozesskette (siehe Tabelle 17 bzw. Tabelle 19). Dazu wurden die Erkenntnisse den Planungsgrößen zugeordnet (siehe Tabelle 15). Die Arbeitsplanung wird aber aus Sicht der Zerspanung innerhalb der Teilaufgaben durchgeführt. Deshalb müssen die Planungsgrößen der gesamten Prozesskette den Teilaufgaben zugeordnet werden. Das Ergebnis dieser Zuordnung zeigt Tabelle 20.

Teilaufgaben	Planungsgrößen
Rohteilbestimmung	Rohteil Werkstückzustand vor der Zerspanung Haupt- und Unterprozesse vor der Zerspanung Fertigungsmittel vor der Zerspanung Einstellparameter vor der Zerspanung Wechselwirkungen bzgl. Rohteil Verzug bzgl. Rohteil

Prozessfolgeermittlung	Zerspanprozess Wechselwirkungen bzgl. Prozess Verzug bzgl. Prozess
Fertigungsmittelauswahl	Fertigungsmittel in der Zerspanung Wechselwirkungen bzgl. Fertigungsmittel Verzug bzgl. Fertigungsmittel
Einstellparameterermittlung	Zerspanparameter Einstellparameter nach der Zerspanung Fertigungsmittel nach der Zerspanung Wechselwirkungen bzgl. Parameter Verzug bzgl. Parameter Werkstückzustand während und nach der Zerspanung Haupt- und Unterprozesse nach der Zerspanung
Vorgabezeitermittlung	Fertigungsmittel Einstellparameter

Tabelle 20: Zuordnung Kategorie der Handlungsempfehlungen und zu den Teilaufgaben

Bei der Rohteilbestimmung werden alle Planungsgrößen eingeordnet, die vor der Zerspanung liegen. Prozessfolgeermittlung, Fertigungsmittelauswahl und Vorgabezeitermittlung enthalten nur Größen, die sich auf die Zerspanung beziehen. Der Einstellparameterermittlung werden Zerspangrößen, aber auch Größen nach der Zerspanung zugeordnet. Durch diese Zuordnung kann der Arbeitsplaner die Planung innerhalb der Teilaufgaben durchführen und berücksichtigt gleichzeitig die gesamte Prozesskette. Tabelle 21 zeigt die Modifikation von Tabelle 17.

Nr.	Rohteil-bestimmung	Prozessfol-geermittlung	Fertigungs-mittelauswahl	Einstellparameter-ermittlung	Vorgabezeit-ermittlung
1	Stahlerzeugung, Schmieden, Parameter, kein Einfluss				
2		Drehen		Einspannung, Eigenspannung, Rundheitsabweichung	Einspannung
3				Wärmebehandlung, Erwärmen, Eigenspannung, Rundheitsänderung	
4				Wärmebehandlung, Erwärmen, Eigengewicht, Reibung, Rundheitsänderung	
5				Wärmebehandlung, Abschrecken, Öl, Temperatur, thermische Inhomogenität, Formänderung	
6				Wärmebehandlung, Abschrecken, mechanische Historie, Umwandlungsplastizität, Verzugsverhalten	

7				Wärmebehandlung, Erwärmen, Abschrecken, Verzugspotenzial, Ovalitätsänderung	

Tabelle 21: Zuordnung der Schlagworte aus den Planungsgrößen zu den Teilaufgaben bei der Prozesskette „zylindrischer Ring“.

Die Planungsgröße Hauptprozess zeigt unmittelbar an, in welche Teilaufgabe die Schlagworte einsortiert werden müssen. Alle Planungsgrößen vor der Zerspanung (Schlagworte: Stahlerzeugung und Schmieden) werden in Rohteilbestimmung eingeordnet und alle Planungsgrößen nach der Zerspanung (Schlagwort: Wärmebehandlung) in Einstellparameter. Die anderen Schlagwörter werden den Teilaufgaben Prozessfolgeermittlung, Fertigungsmittelauswahl, Einstellparameter- und Vorgabezeitermittlung, angezeigt durch das Schlagwort „Zerspanung“, zugeordnet. Dadurch ist eine einfache Sortierung in Tabellenform gegeben. Um dieses Vorgehen in einem rechnergestützten Planungssystem zu implementieren, könnten die Schlagwörter zu den einzelnen Teilaufgaben der Arbeitsplanung in einer sogenannten Planungssicht zusammengefasst werden (siehe Tabelle 22).

Rohteil-bestimmung	Prozess-folgeermittlung	Fertigungs-mittelauswahl	Einstellparameter-ermittlung	Vorgabe-zeitermittlung
Stahlerzeugung (1), Schmieden (1), Parameter (1), kein Einfluss (1)	Drehen (1)		Einspannung (1), Eigenspannung (2), Wärmebehandlung (5), Erwärmen (3), Abschrecken (3), Öl (1), Eigengewicht (1), Reibung (1), Temperatur (1) Thermische Inhomogenität (1), mechanische Historie (1), Umwandlungsplastizität (1), Verzugsverhalten (1), Verzugspotenzial (1), Rundheitsabweichung (1), Rundheitsänderung (2), Formänderung (1), Ovalitätsänderung (1)	Einspannung (1)

Tabelle 22: Mögliche Planungssicht eines Planungssystems für die Prozesskette „zylindrischer Ring“

Dazu werden alle Schlagwörter, die mehrfach zu einer Teilaufgabe gehören, zusammengefasst. Beispielsweise wird das Schlagwort Erwärmen (3) bei der Einstellparameterermittlung dreimal genannt. Durch das „Anklicken“ des Schlagworts in einem rechnergestützten System könnten direkt die hinterlegten Handlungsempfehlungen geöffnet werden. Tabelle 23 zeigt die Zuordnung der

Schlagworte aus den Planungsgrößen von Tabelle 19 zu den Teilaufgaben bei der Prozesskette „Zahnrad“.

Nr.	Rohteil-bestimmung	Prozess-folgeermittlung	Fertigungs-mittelauswahl	Einstellparameter-ermittlung	Vorgabe-zeitermittlung
1		Wälzfräsen		Eigenspannung, kein Einfluss	
2		Profilschleifen		Abrichtbedingung, Eigenspannung, ungehärtet	Abrichtbedingung
3		Profilschleifen		Vorspannung, Kompensation	
4	Stahlerzeugung, Schmieden, Grundkörperverzug, Verzahnungsverzug				
5				Grundkörper, Verzahnung	
6	Stahlerzeugung, Schmieden, Vorwärmebehandlung, FP-Glühen, Härtbarkeit, Verzahnungsverzug				
7				Scheibe, Grundkörperverzug	
8				Einbringen der Verzahnung, Maßänderung, Bohrung, Kopfkreis, Außendurchmesser, Höhenänderung	
9	Stahlerzeugung, Schmieden, Verzahnung, Grundkörper, Grundkörperverzug, Teilungsfehler				
10				Verzahnungsverzug	
11				Abschrecken, Abschreckgas, Zahnradpositionierung, Maßänderung, Formänderung	

Tabelle 23: Zuordnung der Schlagworte aus den Planungsgrößen zu den Teilaufgaben bei der Prozesskette „Zahnrad“.

Für eine rechnergestützte Umsetzung in einem Planungssystem würde sich folgende Planungssicht für das Zahnrad aus Tabelle 23 ergeben (siehe Tabelle 24).

Rohteil-bestimmung	Prozess-folgeermittlung	Fertigungs-mittelauswahl	Einstellparameter-ermittlung	Vorgabe-zeitermitt-lung
Stahlerzeugung (3), Schmieden (3), Grundkörper (1), Grundkörperverzug (2), Verzahnung (1), Verzahnungsverzug (2), Vorwärmebehandlung (1), FP-Glühen (1), Härtbarkeit (1), Teilungsfehler (1)	Wälzfräsen (1), Profilschleifen (2)		Eigenspannung (2), kein Einfluss (1), Abrichtbedingung (1), ungehärtet (1), Vorspannung (1), Kompensation (1), Grundkörper (1), Verzahnung (1), Scheibe (1), Grundkörperverzug (1), Einbringen der Verzahnung (1), Maßänderung (2), Formänderung (1), Bohrung (1), Kopfkreis (1), Außendurchmesser (1), Höhenänderung (1), Verzahnungsverzug (1), Abschrecken (1), Abschreckgas (1), Zahnradpositionierung (1)	Abricht-bedin-gung (1)

Tabelle 24: Mögliche Planungssicht eines Planungssystems für die Prozesskette „Zahnrad“

Im Folgenden wird eine weitere Detaillierung der Prozesskette „zylindrischer Ring“ besprochen. Die für die Prozesskette „zylindrischer Ring“ verwendeten Erkenntnisse können durch weitere Detaillierung den Informationsgehalt der Handlungsempfehlungen steigern. Dies soll im Folgenden an den Erkenntnissen Nr. „1“ und Nr. „2“ aus Tabelle 16 gezeigt werden. Dazu werden detailliertere Informationen zu den wesentlichen Erkenntnissen aus den entsprechenden Veröffentlichungen angegeben (Tabelle 25).

Prozesskette: 1 Material: 100Cr6 Geometrie: Zylindrischer Ring		
Erkenntnis mit Quellenangabe		Handlungsempfehlung
1	**Parameter** aus der **Stahlerzeugung** und vom **Schmieden** zeigen **keinen Einfluss** [Clausen et al. 2006, S. 318], [Zoch 2009, S. 346].	Für diese Geometrie und die gewählten Vorprozesse vor der Zerspanung zeigen die inneren Werkstückzustände keinen Einfluss auf den späteren Verzug. Die Einflussgrößen aus den Vorprozessen müssen nicht weiter beachtet werden.
	Weder der **Verfestigungsquerschnitt**, noch die P**osition** in der gewalzten **Stange** (**Halbzeug**), hatten einen **Einfluss** auf den entstehenden **Verzug** bei **wärmebehandelt**en **Ring**en. Es wurde **kein negativer Einfluss** bei Fehlen der exakten **Position**sinformation entdeckt [Zoch 2009, S. 346].	Bzgl. des Verzugs müssen vor der Zerspanung keine Einflussgrößen berücksichtigt werden (u.a. auch nicht die Verfestigungsgeometrie)
	Der **Material**einfluss (**Seigerungen**, **Härtbarkeit**) auf den **Verzug** ist vernachlässigbar, insofern kann die **Kompensation**sstrategie bei der **Weichbearbeitung** beginnen [Zoch 2009, S. 348].	Eine Kompensationsstrategie muss erst für die Weichbearbeitung geplant werden, da die vorangegangenen Prozesse Stahlerzeugung und Schmieden keinen signifikanten Einfluss haben.
2	**Art der Einspannung** bestimmt **Rundheitsabweichung** und **Fertigungseigenspannungen** [Sölter 2010, S. 126].	Wenn die Abschreckung nicht dominant ist, kann der Verzug über Einspanntechnik und Einspannorientierung reduziert werden. Spanndorn und Pendelbacken wirken sich günstig auf das Rundheitsverhalten aus.
	Die **Rundheitsänderung**en der **gasabgeschreckt**en **Zylinderring**e werden maßgeblich durch die **Fertigungseigenspannungen** beeinflusst. Eine Änderung der **Zerspanparameter** sowie der **Einspannbedingungen** wirken sehr sensitiv auf diesen resultierenden **Eigenspannungszustand**. Bei der nachfolgenden **Wärmebehandlung** werden diese **Spannungen** in komplexer Art und Weise ausgelöst, was wiederum die resultierenden **Rundheitsänderung**en nachhaltig beeinflussen kann [Clausen et al. 2006, S. 318].	Beachte den Einfluss der Zerspanparameter und des Spannmittels auf die Eigenspannungsverteilung bzw. die Rundheitsänderung der Ringe.
	Bei der **Zerspanung dünnwandig**er **Ring**e ist die **Wechselwirkung** beider **Mechanismen** (**inhomogener Materialabtrag** durch **Einspannung**, Einbringen von **Eigenspannungsquellen** durch **Spanbildung**) für die resultierende **Formabweichung** bzw. **Formänderung** verantwortlich [Sölter 2010, S. 126].	Durch eine geeignete Wahl der Einspannstrategie zwischen erster und zweiter Aufspannung kann der Verzug in Form von Rundheitsänderungen reduziert werden.

Tabelle 25: Detailliertere Erkenntnisse der Prozesskette „zylindrischer Ring“

Aus dieser Detaillierung ergibt sich im Gegensatz zu Tabelle 17 die nachfolgende Tabelle 26.

Nr.	Hauptprozess (HP)	Rohteil (Geometrieinformationen) (R)	Unterprozess (UP)	Fertigungsmittel (F)	Einstellparameter (E)	Werkstückzustand (WZ)	Verzug (V)	Wechselwirkung (W)
1	Stahlerzeugung, Schmieden, *Zerspanung, Wärmebehandlung*	*Verfestigungsquerschnitt, Position, Stange, Halbzeug, Material, Seigerung, Härtbarkeit*	*Weichbearbeitung*	-	kein Einfluss, *Kompensation*	-	kein Einfluss	-
2	Zerspanung *Wärmebehandlung*	*dünnwandig*	Drehen, *Abschrecken*	-	Einspannung, *Einspannbedingung, Zerspanparameter*	Eigenspannung	Rundheitsabweichung, *Rundheitsänderung, Formabweichung, Formänderung*	*Mechanismus, Materialabtrag, Einspannung, Eigenspannungsquellen, Spanbildung*

Tabelle 26: Detailliertere Zuordnung der Schlagwörter zu den Planungsgrößen der Prozesskette „zylindrischer Ring“

Die zusätzlichen Schlagworte sind „*kursiv*“ dargestellt. Ein Vergleich zwischen Tabelle 17 und Tabelle 26 zeigt, dass deutlich mehr Schlagwörter für die ersten beiden Erkenntnisse durch die Detaillierung generiert wurden. Aus der Detaillierung für die Arbeitsplanerstellung ergeben sich folgende Schlagwörter für die Teilaufgaben (Tabelle 27):

Nr.	Rohteilbestimmung	Prozessfolgeermittlung	Fertigungsmittelauswahl	Einstellparameterermittlung	Vorgabezeitermittlung
1	Stahlerzeugung, Schmieden, *Verfestigungsquerschnitt, Position, Stange, Halbzeug, Material, Seigerung, Härtbarkeit,* kein Einfluss,	*Weichbearbeitung*	*Kompensation*		

2		Drehen		Einspannung, *dünnwandig, Einspannbedingung, Zerspanparameter,* Eigenspannung, Abschrecken, *Mechanismus, Materialabtrag, Eigenspannungsquellen, Spanbildung,* Rundheitsabweichung, *Rundheitsänderung, Formabweichung, Formänderung*	Einspannung

Tabelle 27: Zuordnung der Schlagworte aus den Planungsgrößen der detaillierten Erkenntnisse zu den Teilaufgaben

Ein Vergleich zwischen Tabelle 21 und Tabelle 27 zeigt deutlich, dass der Informationsgehalt durch die größere Anzahl an Schlagwörtern gestiegen ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Teilaufgabe „Einstellparameter“ bei beiden Beispielprozessketten die meisten Zuordnungen bekommen hat. Dies könnte z.B. daran liegen, dass zum Ende des Gesamtprozesses (Wärmebehandlung) die meisten konkreten Erkenntnisse vorliegen. Für die Prozessfolgeermittlung und die Vorgabezeitermittlung liegen dagegen relativ wenige Schlagwörter vor. Dies liegt allerdings nur an der Auswahl der hier vorgestellten Erkenntnisse, die mehr auf die Größen vor und nach der Zerspanung sowie die Zerspanparameter fokussieren. Da die Erkenntnisse besonders vom Fertigungsprozess, dem Material und der Geometrie abhängen, ist der Erkenntnisraum und somit die Anzahl der Erkenntnisse pro Prozesskette eingeschränkt. Dies sollte immer zu einer überschaubaren Anzahl an Schlagwörtern innerhalb einer Prozesskette führen.

Die hier beispielhaft gezeigten Erkenntnisse stammen aus Veröffentlichungen, können aber auch direkt aus Versuchen oder aus der Produktion entstehen und in die Tabellen nach der vorgestellten Vorgehensweise eingetragen werden. Eine Möglichkeit der prototypischen Umsetzung in Form eines Planungssystems wurde ebenfalls aufgezeigt (siehe Tabelle 22 und Tabelle 24). Den Teilaufgaben werden die Schlagwörter (Tags) vorsortiert zugeordnet. Bei der Planung kann der Arbeitsplaner auf die angebotenen Schlagwörter klicken und erhält so die entsprechende Handlungsempfehlung. Eine detaillierte Beschreibung der prototypischen Umsetzung wird in [Thoben et al. 2012b, S. 192-198] beschrieben. Die einzelnen Handlungsempfehlungen können genutzt werden, um innerhalb der Teilaufgaben einen verzugsgerechten Arbeitsplan zu erstellen. Dazu müssen die meist qualitativen Informationen vom Arbeitsplaner in quantitative Werte übertragen werden. Im Gegensatz dazu enthält das Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ bereits quantitative Werte. Im Folgenden wird gezeigt, wie dieses Planungshilfsmittel zur Umsetzung eines verzugsgerechten Arbeitsplans genutzt werden kann.

6.2 Verzugsgerechter Arbeitsplan

Einen verzugsgerechten Arbeitsplan, erstellt aus dem Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ mit allen Informationen nach Abbildung 39, zeigt Tabelle 28. Als Zielgröße der Verzugsbetrachtung wurde eine möglichst geringe Rundheitsänderung außen betrachtet. Der Arbeitsplan wurde nach den Vorgaben aus Versuch Nr. 20 in Abbildung 46 mit dem Ziel „geringer Verzug“ generiert. Die einzelnen Mittelwerte dazu lauten: Rundheitsänderung außen $\Delta R_{außen}$ = 0µm, Ovalitätsänderung außen $\Delta O_{außen}$ = 7µm und Dreieckigkeitsänderung außen $\Delta D_{außen}$ = 8µm. Die entsprechenden Werte für die Änderungen innen befinden sich in demselben Wertebereich. Der Streubereich ist ebenfalls mit ±3 bis ±7 relativ gering. Ebenfalls sollen in diesen Arbeitsplan die Erkenntnisse aus Abbildung 38 integriert werden. Für den Arbeitsplan ist die Angabe von Handlungsempfehlungen besser, da Handlungsempfehlungen schon für die Arbeitsplanung aufbereitet sind und nicht mehr interpretiert werden müssen. Deshalb werden die Erkenntnisse in Handlungsempfehlungen übertragen. Das Ergebnis dieser Übertragung zeigte bereits Tabelle 16, die nun für den Arbeitsplan genutzt werden kann. Um zu entscheiden, an welcher Position im Arbeitsplan welche Handlungsempfehlung notiert werden sollte, kann Tabelle 17 genutzt werden. Die Erkenntnisse sind dort u.a. den einzelnen Hauptprozessen zugeordnet. Für die Rohteilbestimmung sind Handlungsempfehlungen der Stahlerzeugung und des Schmiedens zu notieren (siehe Parameterinformation im Arbeitsplan, Zeile D und E). Für die Prozessfolgeermittlung, die Fertigungsmittelauswahl, die Einstellparameterermittlung und die Vorgabezeitermittlung sind es Handlungsempfehlungen zum Hauptprozess Zerspanung (siehe Hinweise und Informationen zum Drehen, Zeile G). Handlungsempfehlungen, die den Hauptprozess Wärmebehandlung betreffen, werden bei den nachbereitenden Informationen zur Wärmebehandlung unter Parameterinformation im Arbeitsplan angegeben (Zeile I).

<table>
<tr><td>A</td><td>Blatt-Nr.1</td><td>Start
2002</td><td>Ende</td><td>Schmelze 3
Schmelzennr.
162636</td><td>Zeichnungsnr. 1
Fertigteilzeichnung
Ring 1
Radius$_{außen}$ 145mm
Radius$_{innen}$=133mm
Breite = 26 mm
Wandstärke=6mm</td><td>ARBEITS-PLAN
SFB 570</td></tr>
<tr><td>B</td><td colspan="2">Material-Nr.
1.3505</td><td colspan="4">Bezeichnung
Zylindrischer Ring / 100Cr6</td></tr>
<tr><td>C</td><td colspan="6">Chemische Zusammensetzung in Masse-%:
<table>
<tr><th>C</th><th>Si</th><th>Mn</th><th>P</th><th>S</th><th>Cr</th><th>Mo</th><th>Ni</th><th>Cu</th><th>Al</th></tr>
<tr><td>0.97</td><td>0.22</td><td>0.43</td><td>0.008</td><td>0.003</td><td>1.48</td><td>0.09</td><td>0.23</td><td>0.10</td><td>0.006</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

D	Vorbereitende Informationen aus dem Stahlwerk: **Gussformat:** 240 mm quadratisch vierkant **Durchmesser:** ∅ 60 mm **Anlieferzustand Schmiede:** GKZ-geglüht **Parameterinformation:** Lieferung der chemischen Zusammensetzung nach DIN 683-17:1999 und vorgegebenem Reinheitsgrad. Für diese Geometrie und die gewählten Vorprozesse vor der Zerspanung zeigen die inneren Werkstückzustände keinen Einfluss auf den späteren Verzug. Die Einflussgrößen aus den Vorprozessen müssen nicht weiter beachtet werden. Gerührt oder ungerührt zeigte keinen signifikanten Einfluss. Aus dem Stahlwerk ist mit der bisherigen Herstellung kein signifikanter Einfluss bekannt.
E	Vorbereitende Informationen aus der Schmiede: **Umformtemp.:** 1150 °C **Umformgrad:** -0,52 bis -1,1 **Zwischen-WB:** GKZ-geglüht **Parameterinformation:** Für diese Geometrie und die gewählten Vorprozesse vor der Zerspanung zeigen die inneren Werkstückzustände keinen Einfluss auf den späteren Verzug. Die Einflussgrößen aus den Vorprozessen müssen nicht weiter beachtet werden. Die Abkühlart nach dem Schmieden und der Umformgrad in den oben angegebenen Grenzen zeigten keinen signifikanten Einfluss. Aus der Schmiede ist mit der bisherigen Fertigung kein signifikanter Einfluss bekannt.

F	Halbzeug Schmiederohling	Gewicht / ST 1,189 +/- 0,005 kg	Menge / Los

G	Hinweise und Informationen zum Drehen • Wenn die Abschreckung nicht dominant ist, kann der Verzug über Einspanntechnik und Einspannorientierung reduziert werden. Spanndorn und Pendelbacken wirken sich günstig auf das Rundheitsverhalten aus. • Durch geeignete Wahl der Einspannorientierung beim Dreibackenfutter zwischen erster und zweiter Aufspannung können ungleichmäßige Fertigungseigenspannungen reduziert werden.	Gültigkeit	Arbeitsplaner Herr …, Tel.

H

Nr.	Arbeitsvorgang	Arbeitsstufe	Arbeitsplatz	Maschine	Vorrichtung	Werkzeug	Technologiedaten		
							v_c m/min n min^{-1}	a_p mm	f mm
	Drehen komplett		IWT Halle 1b	Drehzentrum Index V250					
1		1.Aufspannung, außen spannen, 20 bar Seite planen	IWT Halle 1b	Drehzentrum Index V250	Pendelbacken	Sandvik DNMG 150616-PR 4025 PDJNL 2525M15	240	1	0,3
2							240	1	0,3

	3		1.Aufspannung, außen spannen, 20 bar Innenbearbeitung	IWT Halle 1b	Drehzentrum Index V250	Pendelbacken	Sandvik DNMG 150616-PR 4025 PDJNL 2525M15	240	0,5	0,3
	4							240	0,5	0,3
	5		2.Aufspannung, innen spannen, 20 bar 2. Seite planen	IWT Halle 1b	Drehzentrum Index V250	Spanndorn	Sandvik CNMG 160608-PM GC 4025 / GC 4225 PCLNR 2525M 16	240	1	0,4
	6							240	1	0,4
	7							240	1	0,4
	8							240	1	0,4
	9		2.Aufspannung, innen spannen, 20 bar Außenbearbeitung	IWT Halle 1b	Drehzentrum Index V250	Spanndorn	Sandvik CNMG 160608-PM GC 4025 / GC 4225 PCLNR 2525M 16	240	0,75	0,4
	10							240	0,75	0,4
	11							240	0,75	0,4
	12							240	0,75	0,4
I	Nachbereitende Informationen zur Wärmebehandlung: **Ofen:** Solo (Laborindustrieofen) **Chargierung:** liegend **Auflage:** Stern **Austenitisiertemperatur:** 10 min 850°C 25 min **Härte-T.:** 850 °C **Abkühlmedium:** N_2 **Gasvolumenstrom:** 5336 ln/min (Normliter pro Minute) **Abkühlart:** Gasdüsenfeld **Verzugsgröße (Zielgröße):** Geringe Rundheits-, Ovalitäts- und Dreieckigkeitsänderung **Parameterinformation:** • Die sternpunktförmige Chargierung zeigt das geringste Verzugsverhalten. Lege sternpunktförmig auf. • Geometrien, die zu thermischen Inhomogenitäten neigen (wie z.B. ein konischer Ring) sollten u.U. nicht in Öl sondern in Gas oder einem Salzbad abgeschreckt werden. • Vermeide thermische Inhomogenitäten, weil dadurch Umwandlungsplastizität erzeugt wird. • Da keine Korrelation zwischen der Ovalitätsänderung nach der Wärmebehandlung und der Ovalität nach der Fertigung existiert, kann die Ovalitätsänderung durch System- und Stellgrößen nicht direkt beeinflusst werden.									

Tabelle 28: Verzugsgerechter Arbeitsplan für den zylindrischen Ring

Im Folgenden werden die einzelnen Teilaufgaben der Arbeitsplanerstellung besprochen, die zum verzugsgerechten Arbeitsplan führen.

Bei der **Ausgangsteilbestimmung** werden die Informationen der Konstruktion, der Stahlerzeugung und des Schmiedens benötigt. Diese Daten werden in den Kopfteil des Arbeitsplans (Zeilen A-F) eingetragen. In Zeile D und E stehen neben den Einflussgrößen auch unter Parameterinformation die Handlungsempfehlungen zu diesen Hauptprozessen. Mithilfe von Tabelle 17 wird deutlich, dass es nur eine Handlungsempfehlung (Nr. 1) für die Hauptprozesse vor der Zerspanung gibt. Diese wurde in den Arbeitsplan eingetragen. Zusätzlich gibt Abbildung 46 noch weitere Informationen, welche Einflussgrößen keinen Einfluss zeigen. Es sind dies „gerührt / ungerührt“, die Abkühlart und der Umformgrad. Diese Informationen werden ebenfalls in den Zeilen D und E notiert.

Bzgl. der **Fertigungsmittelauswahl** werden die Spannmittel Pendelbacken und Spanndorn aus Abbildung 46 gewählt (Zeile H). Zusätzlich werden auch hier weitere Informationen zum Drehen in Form von Handlungsempfehlungen notiert (Zeile G). Diese Handlungsempfehlungen können zum einen für die spätere Nachvollziehbarkeit nützlich sein (Archivierung des Arbeitsplans als Wissensspeicher) und zum anderen, falls die Zerspanparameter im Detail noch angepasst werden sollten. Aus Tabelle 17 wird ersichtlich, dass es zwei Handlungsempfehlungen sind (Nr. 2 und Nr. 3), die dem Hauptprozess Zerspanung zugeordnet werden. Diese Handlungsempfehlungen beziehen sich auf das Spannmittel Dreibackenfutter. Da in diesem Arbeitsplan Pendelbacken und Spanndorn und somit kein Dreibackenfutter eingesetzt wird, muss die Einspannorientierung nicht beachtet werden.

Die Zerspanparameter sind in Abbildung 46 nur im letzten Schnitt angegeben. Deshalb muss für die **Prozessfolgeermittlung (Operationsreihenfolge)** eine geeignete Schnittfolge für die Arbeitsvorgänge angegeben werden (Zeile H). Für die **Einstellparameterermittlung** wurden die Daten aus Abbildung 46 für den letzten Schnitt eingetragen und geeignete Werte für den ersten und zweiten Schnitt gewählt (Zeile H). Die Wahl der Werte für die Schnitte vor dem letzten ist eher unkritisch zu sehen, da vor allem der letzte Schnitt den Verzugspotenzialträger Eigenspannungsverteilung beeinflusst. Die **Vorgabezeitermittlung** ist für dieses Beispiel nicht ausgearbeitet. Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Prozesskette „zylindrischer Ring“ wird auf [Klein und Thoben 2006] verwiesen. Den Abschluss des Arbeitsplans bildet Zeile I. Hier werden die Wärmebehandlungsparameter, die Zielgröße und die Parameterinformationen zur Wärmebehandlung angegeben. Aus Tabelle 17 wird ersichtlich, dass es vier Handlungsempfehlungen sind, da sie dem Hauptprozess Wärmebehandlung (Nr. 4-7) zugeordnet wurden. Die Handlungsempfehlung der Erkenntnis Nr.3 ist zwei Hauptprozessen zugeordnet (Zerspanung und Wärmebehandlung). Da sich diese Erkenntnis hauptsächlich auf die Zerspanung bezieht, wird sie bei der Wärmebehandlung nicht noch einmal notiert.

Der vorgeschlagene verzugsgerechte Arbeitsplan berücksichtigt keine anderweitigen Restriktionen bei der Planung, wie z.B. Kosten. Unter kostenoptimalen Gesichtspunkten, wie der Auswahl von kostenoptimalen Zerspanparametern, könnte ein anderer verzugsgerechter Arbeitsplan entstehen. Zur Bestimmung eines verzugsgerechten Arbeitsplans unter der Berücksichtigung von kostenoptimalen Zerspanparametern ist ein Vorschlag für eine verzugsgerechte Arbeitsplanung erstellt worden [Klein und Thoben 2006].

Nach dem gleichen Vorgehen kann ein verzugsgerechter Arbeitsplan für die Zahnradfertigung aus Abbildung 47 erzeugt werden. Wenn als Zielgröße gleichzeitig die geringsten Maß- und Formänderungen zu Grunde gelegt werden, dann zeigt Versuch 41 durch eine Mittelwertbildung der Maß- und Formänderungen der einzelnen Versuche den geringsten Verzug. Für die Parameterinformationen und die Hinweise zum Drehen und Fräsen wurden hier die Handlungsempfehlungen aus Tabelle 18 eingetragen. Aus Tabelle 19 wird deutlich, für welchen Hauptprozess die Handlungsempfehlungen angegeben werden können. Tabelle 29 zeigt abschließend den Arbeitsplan für die Zahnradfertigung.

<table>
<tr><td>A</td><td>Blatt-Nr.
1</td><td>Start
2008</td><td>Ende</td><td>Schmelze 2
Schmelzen-nr.
183324</td><td>Zeichnungsnr. 1
Fertigteilzeichnung Zahnrad
Außendurchmesser
d_a = 120 mm ± 0,1 mm
Höhe h=15 mm ± 0,1 mm
Bohrung b = 45 mm H8
Fasen f = 1 x 45°</td><td>ARBEITS-PLAN
SFB 570</td></tr>
<tr><td>B</td><td colspan="2">Material-Nr.
1.7147</td><td colspan="4">Bezeichnung
Zahnrad / 20MnCr5</td></tr>
<tr><td>C</td><td colspan="6">Chemische Zusammensetzung in Masse-%:
<table>
<tr><th>C</th><th>Si</th><th>Mn</th><th>P</th><th>S</th><th>Cr</th><th>Mo</th><th>Ni</th><th>Cu</th><th>AL</th><th>N</th></tr>
<tr><td>0.20</td><td>0.23</td><td>1.35</td><td>0.011</td><td>0.020</td><td>1.02</td><td>0.03</td><td>0.10</td><td>0.12</td><td>0.04</td><td>0.015</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>D</td><td colspan="6">Vorbereitende Informationen aus dem Stahlwerk:
Gussformat: 240 mm quadratisch vierkant
Halbzeugformat: rund
Durchmesser: ∅ 73 mm
Anlieferzustand Schmiede: Abgekühlt von der Walzhitze
Parameterinformation: Eine niedrigere Härtbarkeit bewirkt überwiegend einen niedrigeren Grundkörperverzug (Maßänderung) und somit einen geringeren Verzahnungsverzug.</td></tr>
<tr><td>E</td><td colspan="6">Vorbereitende Informationen aus der Schmiede:
Umformtemp.: 1250 °C
Umformgrad: -0,98
Scheibenhöhe: 22,4 mm
Gesenk 1: (asymmetrisch)</td></tr>
</table>

Abkühlart: Luft Schüttgut
Vorwärmebehandlung: FP-Glühen
Parameterinformation: FP-Glühen anstatt Vergüten und Anlassen bewirkt überwiegend einen niedrigeren Grundkörperverzug (Maßänderung) und somit einen geringeren Verzahnungsverzug.

F	Halbzeug Schmiederohling	Gewicht / ST 1965g Außendurchmesser d_{ax} = 125,8 mm Höhe h_x= 20 mm Bohrung b_x = 38 mm Fasen f = 1 x 45°	Menge / Los

G	Hinweise und Informationen zum Drehen und Wälzfräsen: • Die Einstellparameter aus dem Wälzfräsprozess müssen bzgl. der Verzugsberücksichtigung nicht beachtet werden. • Durch geeignete Wahl der Abrichtbedingungen vor dem Härten könnte der Verzug nach dem Härten kompensiert werden. • Durch einflankiges Profilschleifen vor dem Härten könnte der Verzug kompensiert werden. Wälzfräsen ohne Kühlschmierstoff	Gültigkeit	Arbeitsplaner Herr …, Tel.

H	Nr.	Arbeitsvorgang	Arbeitsstufe	Arbeitsplatz	Maschine	Vorrichtung	Werkzeug	Technologiedaten		
								v_c m/min n min^{-1}	a_p mm	f mm
		Drehen komplett		IWT Halle 1b	IWT, Bremen Drehzentrum Index V250					
	1		1.Aufspannung, außen spannen, 30 bar Plandrehen	IWT Halle 1b	IWT, Bremen Drehzentrum Index V250	Inogripbacken	Sandvik CNMG 160608 WM 4025, PCLNR	250	nur ankratzen	0,3
	2							250	1	0,3
	3		1.Aufspannung, außen spannen, 30 bar Außenlängsdrehen	IWT Halle 1b	IWT, Bremen Drehzentrum Index V250	Inogripbacken	Sandvik CNMG 160608 WM 4025, PCLNR	180	1	0,3
	4							180	1	0,3
	5							180	1	0,3
	6		1.Aufspannung, außen spannen, 30 bar Bohrungsausdrehen	IWT Halle 1b	IWT, Bremen Drehzentrum Index V250	Inogripbacken	A25R PCLNL-12, CNMG 120408 PM 4025	250	ankratzen	0,2
	7							250	1	0,2
	8							250	1	0,2

	9							250	1	0,2
	10							250	0,25	0,2
	11		2.Aufspannung, außen spannen, Scheibe umdrehen, 40 bar Plandrehen	IWT Halle 1b	IWT, Bremen Drehzentrum Index V250	Weiche Backen	Sandvik CNMG 160608-WM 4025	250	1	0,3
	12							250	1	0,3
	13							250	1	0,3
	14							250	1	0,3
	15							250	1	0,3
	16							250	1	0,1
Wälzfräsen								v_c m/min n min^{-1}	Tauchtiefe T [mm]	f mm
I	17	Wälzfräsen komplett	1.Schnitt Gleichlauf		Wälzfräsmaschine Gleason-Pfauter GP130	Spreizbuchse, 10,5 bar, Druckglocke 2 kN	Gangzahl, -richtung: 2-gg-re Stollen: 12 PMHSS TiALN	180	7,31	1,3
	18		2.Schnitt Gleichlauf		Wälzfräsmaschine Gleason-Pfauter	Spreizbuchse, 10,5 bar, Druckglocke 2 kN	Gangzahl, -richtung: 2-gg-re Stollen: 12 PMHSS TiALN	300	0,8	1
J	Nachbereitende Informationen zur Wärmebehandlung: **Ofen:** Ipsen (Zweikammer-Vakuum-Anlage im industrieüblichen Maßstab) **Chargierung:** Liegend, einlagig **Auflage:** keine, Gitterrost **Vorwärmtemperatur:** 650°C **Austenitisiertemperatur:** 940°C **Aufkohlungsatmosphäre:** Niederdruck mit gepulster Kohlenwasserstoffzugabe **Aufkohlungstiefe:** 0,4 mm **Randkohlenstoffgehalt:** 0,7 Gew. % **Aufkohlungstemperatur:** 940°C									

	Atmosphäre (Diffusion): Vakuum **Härtetemperatur:** 940 °C **Abkühlmedium:** N_2 **Abkühlart:** Hochdruckgasabschreckung, 10 bar **Anlassen:** nein **Verzugsgröße (Zielgröße):** Möglichst gleichzeitig geringe Maß- und Formänderungen **Parameterinformation:** • Um das Dishing zu reduzieren, sollten die Zahnräder gehängt werden. Werden die Zahnräder gelegt, ist eine Dreipunktauflage günstiger als eine Zweipunktauflage (siehe Auswertung zur Scheibe in [Clausen et al. 2009b, S. 45] • Im Vergleich zu einer Scheibe wird durch das Einbringen der Verzahnung das Volumen reduziert und die Oberfläche erhöht. Desto geringer das Volumen und desto größer die Oberfläche, desto schneller wird das Zahnrad gekühlt. Desto höher ist der Temperaturunterschied zwischen äußerem und innerem (Bohrungs-) Durchmesser und desto mehr Verzug wird erwartet. • Einflussgrößen der Wärmebehandlung beeinflussen den Verzahnungsverzug symmetrisch. Für eine evtl. Nachbearbeitung reicht die Berücksichtigung einer Seite aus. • Verzugsanfällige Grundkörper sollten gehängt werden, um Dishing-Effekte zu reduzieren. Im Falle einer verzugsanfälligen Verzahnung sollten die Zahnräder besser gelegt werden.

Tabelle 29: Verzugsgerechter Arbeitsplan für die Prozesskette „Zahnrad“

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden zuerst noch einmal das Ziel, die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieser Arbeit kurz zusammengefasst. Im Ausblick werden die zwei Planungshilfsmittel „Handlungsempfehlungen“ und „Prozesskettenvergleich“ noch einmal aufgegriffen und abschließende Bemerkungen zur Anwendbarkeit, Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit auf andere Prozessketten gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Arbeitsplanung und hier im Speziellen die Arbeitsplanerstellung so zu unterstützen, dass der innere Werkstückzustand in der Planung von hochfesten Stahlbauteilen der Antriebstechnik hinsichtlich des Verzugs beschrieben werden kann. Dadurch sollten ungewollte Maß- und Formänderungen schon in der Planung antizipiert und berücksichtigt werden können. Als Lösung wurden zwei Planungshilfsmittel (Handlungsempfehlungen und Prozesskettenvergleich) erstellt.

Als erstes wurde gezeigt, an welcher Stelle in der Arbeitsplanerstellung der Verzug berücksichtigt werden kann bzw. sollte (Abschnitt 2.6). Dies betrifft die Stellen der Arbeitsplanerstellung, die die System- und Stellgrößen des Systems planen. Des Weiteren stellte sich heraus, dass die Lösung nur unter der Voraussetzung der Systembetrachtung erfolgreich sein kann. Deshalb müssen auch Planungshilfsmittel für die Arbeitsplanerstellung immer das gesamte System berücksichtigen. Auf Grundlage der vorgeschlagenen Verzugsbeschreibung (Abbildung 11) wurden zwei Planungshilfsmittel vorgestellt, die in der Lage sind, das gesamte System und auch den inneren Werkstückzustand bzw. das Verzugspotenzial zu berücksichtigen. Diese Planungshilfsmittel wurden mittels des Top-Down-Ansatzes entwickelt und detaillierter für die zwei Prozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ betrachtet. Zuerst wurden in Kapitel 5 die Vorgehensweise zur Erstellung der Planungshilfsmittel entlang der gesamten Prozesskette gezeigt. Anhand der zwei Beispielprozessketten wurden daraus Planungshilfsmittel aus Systemsicht erstellt. Danach wurden in Kapitel 6 diese Planungshilfsmittel für die Arbeitsplanerstellung angewendet bzw. dafür modifiziert. Das Ergebnis waren Handlungsempfehlungen, die passend zu den Teilaufgaben abgerufen werden konnten und zwei verzugsgerechte Arbeitspläne. Beide Planungshilfsmittel sind geeignet, eine verzugsgerechte Arbeitsplanerstellung zu unterstützen. Während das Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ den Vorteil der Übersichtlichkeit und leichteren Interpretierbarkeit der Ergebnisse bzgl. anderer Prozessketten besitzt, kann das Planungshilfsmittel „Hand-

lungsempfehlungen“ einfacher um Handlungsempfehlungen für andere Prozessketten erweitert werden.

7.2 Ausblick

Die bisherigen Ausführungen beziehen sich auf experimentelle Prozessketten und auf den Vorteil, Systeminformationen über den Verzug transparent und prozesskettenübergreifend auszutauschen. Übertragen auf die industriellen Prozessketten müsste dieser Informationsaustausch unternehmensübergreifend durchgeführt werden. Diese systemorientierte Betrachtung kann aber nur funktionieren, wenn die an einer Prozesskette beteiligten Unternehmen zusammenarbeiten oder gezielte Anlieferqualitäten und nachfolgende Bearbeitungen vereinbart werden. Der Informationsaustausch würde dann zu einer Art „gemeinsamen“, unternehmensübergreifenden Arbeitsplanung führen.

Bzgl. der Erweiterbarkeit scheint die Methode „Handlungsempfehlung“ im Besonderen geeignet zu sein. Dies kann z.B. durch ein rechnergestütztes System erfolgen. Aufgrund der gewählten Struktur dieser Methode ist die Aufnahme von neuen Erkenntnissen bzw. Handlungsempfehlungen von anderen Prozessketten mit anderen Materialien und Geometrien einfach zu realisieren.

Es bleibt allerdings festzuhalten, dass der Ausarbeitung von universellen Planungshilfsmitteln für eine verzugsgerechte Arbeitsplanung derzeit noch Grenzen gesetzt sind. Solange die Erkenntnisse unmittelbar nur für einen speziellen Werkstoff, dessen Geometrie und dessen Fertigung gültig sind, sind auch die Planungshilfsmittel sehr speziell und wenig verallgemeinerbar. Dadurch sind diese Planungshilfsmittel im Sinne der Planungsarten für eine Neuplanung derzeit nicht geeignet. Trotz allem geht es um Transparenz und darum, die Erkenntnisse und Planungshilfsmittel aufzuschreiben und zu dokumentieren. In dieser Arbeit wurden nur die Prozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ besprochen. Insgesamt wurden sechs Planungshilfsmittel zum Prozesskettenvergleich erstellt. Die weiteren vier Planungshilfsmittel befinden sich im Anhang. Mit ihnen können weitere verzugsgerechte Arbeitspläne aufgestellt und weitere Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Dieses spezielle Wissen aus den Planungshilfsmitteln kann, einmal aufgeschrieben und zur Verfügung gestellt, dem einen oder anderen Experten auch für andere Planungsarten nützlich sein, ganz von dem Kenntnisstand des Experten abhängig.

8 Literaturverzeichnis

Acht, C.: Untersuchung des Einflusses von Geometrie und Prozessparametern auf den Verzug einsatzgehärteter Scheiben aus 20MnCr5 durch Experiment und Simulation. Bremen, 2007.

Andersch, C.; Ehlers, M.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Systematic analysis of the relation between part geometry and distortion due to heat treatment. Proceedings of: *IDE 2005, 1st International Conference on Distortion Engineering*, Bremen, 2005, S. 49-56.

Awiszus, B.; Bast, J.; Dürr, H.; Matthes, K.-D.: *Grundlagen der Fertigungstechnik*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2003.

Bahnsen, C.; Clausen, B.; Hoffmann, F.: "Einfluss des Aufkohlens auf das Verzugsverhalten einsatzgehärteter Bauteile." Wiesbaden: Präsentation, 10.-12.10., HK 2007, 2007.

Bargel, H.-J.; Schulze, G.: "Werkstoffkunde." 7. ed. Berlin: Springer Verlag, 2000.

Bausch, T.; Becker, J.; Faulstich, I.; Felten, K.; Joachim, F.; Koellner, T.; Koepfer, T.; Mallener, H.; Mikoleizig, G.; Och, R.; Pomp, J.: *Innovative Zahnradfertigung* 3. Auflage, expert-Verlag, Renningen, 2006.

Beitz, W. (Hrsg.); Grote, K.-H. (Hrsg.): *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20.Auflage, Springer Verlag, 2001.

Berger, C.; Burr, A.; Gugau, M.; Habig, K.-H.; Harsch, G.; Kloos, K.H.; Speckhardt, H.: Werkstofftechnik. In: *Dubbel - Taschnebuch für den Maschinenbau*. Eds, Beitz, W.; Grote, K.-H., Vol. 20, Springer Verlag, Berlin, 2001,

Berger, C.; Kloos, K.H.: Eigenschaften und Verwendung der Werkstoffe. In: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Eds, Grote, K.-H.; Feldhusen, J., Springer, Berlin, 2011,

Bergmann, W.: *Werkstofftechnik 1: Grundlagen, Band 1*. Hanser Verlag, München, 2008.

Berns, H.: Verzug von Stählen infolge Wärmebehandlung: In: *Z. Werkstofftech.* , 8, (1977), S. 149-157.

Bettin, V.: *Ansatz zur übergreifenden Qualitätsregelung von Prozessketten in der Fertigung*. Shaker Verlag, Aachen, 2004.

Bossmann, M.: Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung. 2007.

Brinksmeier, E.: *Prozess- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung. VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 2, Nr. 234* VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.

Brinksmeier, E.: *SFB 570 Distortion Engineering, Finanzierungsantrag 2001-2003*. Universität Bremen, Bremen, 1999.

Brinksmeier, E.: "Analyse des mechanischen und thermischen Belastungskollektivs als Verzugspotenzial bei der spanenden Bearbeitung, Arbeitsbericht". Bremen, 2003. 09.03.2013 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/A4-Bericht.pdf>.

Brinksmeier, E.; Garbrecht, M.: "Analyse des thermisch-mechanischen Belastungskollektivs als Verzugspotenzial in der spanenden Bearbeitung". Bremen, 2007. 09.03 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP%20A4.pdf>.

Brinksmeier, E.; Lübben, Th.; Fritsching, U.; Cui, C.; Rentsch, R.; Sölter, J.: Distortion minimization of disks for gear manufacture: In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51, (2011), S. 331-338.

Brinksmeier, E.; Rentsch, R.: "Numerische und experimentelle Untersuchung des Verzugspotentials beim Umformen, Arbeitsbericht". 2003. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/A3-Bericht.pdf>.

Brinksmeier, E.; Rentsch, R.: "Numerische und experimentelle Untersuchung des Verzugspotenzials beim Umformen". Bremen, 2007. 09.03 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP%20A3..pdf>.

Brinksmeier, E.; Walter, A.; Sölter, J.; Nowag, L.: Einfluss der Drehbearbeitung auf den Verzug von 100Cr6-Ringen: In: *HTM*, 58, 5 (2003), S. 266-270.

Brzoza, M.: Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug von Stahlbauteilen durch örtliche Beeinflussung der Abkühlung. 2007.

Cesnik, D.; Bratus, V.; Bizjak, M.: Distortion of steel flat ring type products during the production cycle. Proceedings of: *IDE 2011, 3rd Conference on Distortion Engineering*, 2011, S. 221-228.

Clausen, B. ; Frerichs, F.; Goch, G.; Klein, D.; Lübben, T.; Nowag, L.; Prinz, C.; Sackmann, T.; Stöbener, D.; Surm, H.; Zoch, H.-W.: Prozesskettenübergreifende Analyse der Verzugsentstehung am Beispiel von Wälzlagerringen: In: *HTM J. Heat Treatm. Mat.*, 61, 6 (2006), S. 309-319.

Clausen, B.; Frerichs, F.; Kohlhoff, T.; Lübben, Th.; Prinz, C.; Rentsch, R.; Sölter, J.; Surm, H.; Stöbener, D.; D., Klein.: Identification of process parameters affecting distortion of disks for gear manufacture. Part I: casting, forming and machining.: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40, 5-6 (2009a), S. 354-360.

Clausen, B.; Frerichs, F.; Kohlhoff, T.; Lübben, Th.; Prinz, C.; Rentsch, R.; Sölter, J.; Surm, H.; Stöbener, D.; D., Klein.: Identification of process parameters affecting distortion of disks for gear manufacture. Part II: heating, carburizing, quenching.: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40, 5-6 (2009b), S. 361-367.

Clausen, B.; Hoffmann, F.: "Schmelzmetallurgische Werkstoffherstellung". Bremen, 2007a. 09.03 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP%20A1.pdf>.

Clausen, B.; Hoffmann, F.: "Einfluss der Aufkohlung auf das Maß- und Formänderungsverhalten". Bremen, 2007b. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP%20A7.pdf>.

Clausen, B.; Lübben, Th.; Frerichs, F.; Klein, D.; Kusmierz, R.; Nowag, L.; Prinz, C.; Surm, H.: Prozesskettenübergreifende Analyse der Verzugsentstehung am Beispiel von Wälzlagerringen: In: *HTM J. Heat Treatm. Mat.*, 59, 1 (2004), S. 35-44.

Cook, W.T.: A Review of Selected Steel-related Factors Controlling Distortion in Heat-treatable Steels: In: *Heat treatment of Metals*, 2 (1999), S. 27-36.

Cremer, R.: *Informationsmodellierung für die integrierte Arbeitsplanerstellung im Bereich der zerspanenden Fertigung* Eds, Eversheim, W.; König, W.; Pfeifer, T.; Weck, M., Verlag Shaker, Aachen, 1992.

Cui, C.; Schulz, A.; Fritsching, U.: Spray-formed Homogeneous Steels of Low Distortion Potential. Proceedings of: *Proceedings of the 3rd International Conference on Spray Deposition and Melt Atomization and the 6th International Conference on Spray Forming (SDMA2006 & ICSF VI)*, Bremen, 2006b, S. CD version.

Cui, C.; Schulz, A.; Fritsching, U.; Kohlmann, R.: Spray Forming of homogeneous 20MnCr5 Steel of Low Distortion Potential: In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37, 1 (2006a), S. 34-39.

Daenzer, W.F.; Huber, F.: *Systems Engineering - Methodik und Praxis*. Verlag Industrielle Organisation, 2002.

Denkena, B.; Lorenzen, L.-E.; Charlin, F.; Dengler, B.: Quo vadis Arbeitsplanung? Marktstudie zu den Entwicklungs-trends von Arbeitsplanungssoftware Industrial Engineering 2010: 6-11

Denkena, B.; Rudzio, H.; Brandes, A.: Methodology for Dimensioning Technological Interfaces of Manufacturing Process Chains: In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55, 1 (2006), S. 497-500.

Dijkman, M.: "Automated Compensation of Distortion in the Production Process of Bearing Rings." BIMAQ. Aachen: Druck und Verlagshaus Mainz GmbH Aachen, 2009.

Dürr, H.; Pilz, R.; Herrbach, S.; Seliga, E.: Trennen. In: *Grundlagen der Fertigungstechnik*. Eds, Awiszus, B.; Bast, J.; Dürr, H.; Matthes, K.-D., Carl Hanser Verlag, München, 2003,

Edenhofer, B.: *Umgang mit der Verzugsproblematik in der industriellen Wärmebehandlungspraxis*. Distortion Engineering - Verzugsbeherrschung in der Fertigung, Kolloquiumsband 1 des SFB 570, Eds, Mayr, P.; Lübben, T., 2, Universität Bremen, Bremen, 2004.

Engstler, M.: NC-Prozeßkette in Kleinbetrieben - Anforderungen, Verfahrensauswahl, Systemeinführung und Erweiterungen. München, 2002.

Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik 3 - Arbeitsvorbereitung*. Springer, Berlin, 2002.

Eversheim, W.; Schuh, G.: *Produktion und Management 4 - Betrieb von Produktionssystemen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.

Fischer, U.; Gomeringer, R.; Heinzler , M.; u.a.: *Tabellenbuch Metall*. Verlag Europa Lehrmittel, 2005.

Franke, V.: *Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung*. Meisenbach Verlag Bamberg, Erlangen-Nürnberg, 1998.

Franz, C.; Lübben, Th.; Lütjens, J.; Streicher, F.; Trapp, N.; Vogel, M.: Case Hardening Simulation of Complex Components by Use of Abstraction. Proceedings of: *IDE 2005, 1st Int. Conf. on Distortion Engineering*, Bremen, 2005, S. 281-288.

Franz, C.; Lübben, Th.; Lütjens, J.; Streicher, F.; Trapp, N.; Vogel, M.: Computer Aided Simulation of Heat Treatment (C.A.S.H.) Teil 3: Simulation der Einsatzhärtung komplexer Bauteilgeometrien durch

Abstraktion: In: *HTM - Z. Werkst. Wärmebeh. Fertigung*, 61, 1 (2006), S. 19-24.

Frerichs, F.; Lübben, T.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Distortion of conical formed bearing rings made of SAE 52100: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40, 5-6 (2009), S. 402-407.

Frerichs, F.; Luebben, Th.; Hoffmann, F.; Mayr, P.; Zoch, H.-W.: Einfluss von gezielt asymmetrischen Vertigungsbedingungen auf den Verzug von Wellen infolge von Abschreckprozessen: In: *HTM*, 60, 6 (2005), S. 323-330.

Fritsching, U.; Hunkel, M.: "Verzugskompensation durch asymmetrische Abkühlbedingungen, Arbeitsbericht". Bremen, 2003. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/B4-Bericht.pdf>.

Fritsching, U.; Hunkel, M.: "Verzugskompensation durch asymmetrische Abkühlbedingungen". Bremen, 2007. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP-B4.pdf>.

Geipel, T.; Hentschel, B.: "Rechnergestüzte Arbeitsplanung (CAP)." Berlin: Offsetdruckerei Gerhard Weinert GmbH, 2001.

Goch, G.: "Regelungsstrategien für die verzugsgerechte Bearbeitung von Bauteilen in der Prozesskette". Bremen, 2007. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP-B6.pdf>.

Goch, G.; Jüpner, W.: "Mess- und Regelungstechnik zur In-Prozess Verzugserfassung und -kompensation in der Wärmebehandlung, Arbeitsbericht". Bremen, 2003. 09.03.13 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/B3-Bericht.pdf>.

Goch, G.; Kopylow, von: "Messtechnik zur In-Prozess-Verzugserfassung". Bremen, 2007. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP-B3.pdf>.

Haase, B.: Bauteilreinigung vor/nach der Wärmebehandlung.: In: *HTM J. Heat Treatm. Mat.*, 63, 2 (2008), S. S. 104-114.

Hämmerle, E.: Werkstattorientierte Systeme zur Arbeitsplanung und kurzfristigen Fertigungssteuerung. Bremen, 1993.

Haufe, A. : *Konfiguration von Arbeitsplanungssystemen*. Eds, Eversheim, W.; Klocke, F.; König, D.; Pfeifer, T.; Weck, M., Shaker Verlag, Aachen, 2000.

Heeß, K.; Besserdich, G.; Bohn, R.; Ehlers, M.; Escher, C.; Fiderer, M.; Franz, C.; Göbel, M.; Grasemann, H.-J.; Haase, P.; Hoferer, M.; Hunkel, M.; Jennes, R.; Jung, M.; Keßler, O.; Klingemann, R.; Lohrmann, M.; Lübben, Th.; Majorek, A.; Miskiewicz, S.; Porzner, H.; Schmitt, G.; Schützenhöfer, W.; Thoden, B.; Trapp, N.; Volkmuth, J.; Wägner, M.; Wiedmann, D.; Zoch, H.-W.: *Maß- und Formänderungen infolge Wärmebehandlung von Stählen.*, 3, Expert-Verlag, Renningen, 2007.

Hippenstiel, F.: Metallurgical and production-related protocols to reduce heat-treatment distortion in the manufacture of gear components. Proceedings of: *IDE 2005, 1st International Conference on Distortion Engineering*, Bremen, 2005, S. 57-64.

Hoffmann, F.: "Verzugsgerechtes Erwärmen bei der Wärmebehandlung". Bremen, 2007. 09.03 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP%20A5.pdf>.

Hoffmann, F.; Clausen, B.: "Schmelzmetallurgische Werkstoffherstellung, Arbeitsbericht". 2003. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/A1-Bericht.pdf>.

Hoffmann, F.; Keßler, O.; Lübben, Th.; Mayr, P.: "Distortion Engineering" - Verzugsbeherrschung in der Fertigung: In: *HTM Z. Werkst. Waermebeh. Fertigung*, 57, 3 (2002), S. p. 213-217.

Höinghaus, L.: *Umformtechnische Herstellung von Wälzlagerkomponenten - Optimierungspotenziale durch Prozessanalyse*. Distortion Engineering - Verzugsbeherrschung in der Fertigung, Kolloquiumsband 1 des SFB 570, Eds, Mayr, P.; Lübben, T., 1, Universität Bremen, Herstellung: Books on Demand GmbH, Norderstedt, Bremen, 2002.

Hunkel, M.: Anisotropic Transformation Strain and Transformation Plasticity: Two Corresponding Effects. Proceedings of: *2nd Int. Conf. On Distortion Engineering IDE 2008*, Bremen, Germany, 2008b, S. 431-440.

Hunkel, M.: Modelling of phase transformations and transformation plasticity of a continuous casted steel 20MnCr5 incorporating segregations. Proceedings of: *Proceedings of 3rd Int. Conf. on Distortion Engineering IDE 2011*, Bremen, Germany, 2011, S. 399-410.

Hunkel, M.; Dalgic, M.; Hoffmann, F.: Plasticity of the low alloy steel SAE 5120 during heating and austenitizing: In: *BHM*, 155, 3 (2010), S. 125-128.

Hunkel, M.; Frerichs, F.; Prinz, C.; Surm, H.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Size Change due to Anisotropic Dilation Behaviour of a Low Alloy SAE 5120 Steel: In: *Steel research int.*, 78, 1 (2007b), S. 45-51.

Hunkel, M.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Distortion due to Segregations of Components of a Low Alloy SAE 5120 Steel after Blank and Case Hardening: In: *HTM Z. Werkst. Waermebeh. Fertigung*, 62, 4 (2007a), S. 144-149.

Hunkel, M.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Simulation of the Distortion of Cylindrical Shafts during Heat Treatment due to Segregations International Journal of Microstructure and Materials Properties: In: *IJMMP*, 3, 1 (2008a), S. 162-177.

Husson, R.; Baudouin, C.; Scheer, T.; Bigot, R.; Frabolot, M.: Towards a new way of identification and modeling of gearbox shafts manufacturing process to prevent teeth distortion. Proceedings of: *IDE 2011, 3rd Conference on Distortion Engineering*, Bremen, 2011, S. 213-220.

Jacobs, H.-J.; Dürr, H. : *Entwicklung und Gestaltung von Fertigungsprozessen*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Leipzip, 2002.

Karsten, O.; Schimanski, K.; von Hehl, A.; Zoch, H.-W.: Reasons and influencing factors on distortion within a process chain of an aluminium die casting component in the automotive industry Proceedings of: *IDE 2011, 3rd Conference on Distortion Engineering*, Bremen, 2011, S. 179-186.

Keßler, O.; Hoffmann, F.: "Verzugsgerechtes Erwärmen bei der Wärmebehandlung, Arbeitsbericht". Bremen, 2003. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/A5-Bericht.pdf>.

Keßler, O.; Surm, H.; Hoffmann, F.; Mayr, P.: Influence of the Heating Parameters on the Distortion of Quench Hardened AISI 52100 Steel Bearing Rings. Proceedings of: *Fourth International Conference on Quenching and Distortion*, Peking, China, 2003, S. 341-346.

Klein, D.; Seifert, M.; Thoben, K.-D.: Taking the distortion of component parts along a manufacturing chain into consideration during planning: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40, 5-6 (2009), S. 349-353.

Klein, D.; Thoben, K.-D.: Vorschlag einer verzugsgerechten Arbeitsplanung in der Ringherstellung.: In: *HTM Z. Werkst. Waermebeh. Fertigung*, 61, 6 (2006), S. 320-325.

Klocke, F.; Zeppenfeld, C.; Pampus, A.; Mattfeld, P.: *Fertigungsbedingte Produkteigenschaften - FePro*. Apprimus Verlag, Aachen, 2008.

Kohlhoff, T.; Prinz, C.; Rentsch, R.; Surm, H.: Influence of manufacturing parameters on gear distortion. Proceedings of: *IDE 2011 Distortion Engineering*, Bremen, 2011, S. 155-165.

Köhlscheid, W.: *Methodik zur lebenszyklusorientierten Produktgestaltung*. Eds, Eversheim, W.; Klocke, F.; König, D.; Pfeifer, T.; Weck, M., Shaker Verlag, Aachen, 1999.

Künne, B.: *Einführung in die Maschinenelemente - Gestaltung, Berechnung, Konstruktion*. Vol. 2. Auflage, Teubner, Stuttgart, 2001.

Kusmierz, R.; Rentsch, R.; Brinksmeier, E.: Verzugsverhalten von geschmiedeten Lagerringen aus 100Cr6: In: *HTM*, 58, 5 (2003), S. 276-281.

Lamesle, P.; Vareilles, E.; Aldanondo, M.: Towards a KBS for a qualitative distortion prediction for heat treatments. Proceedings of: *IDE 2005, 1st Int. Conf. on Distortion Engineering*, Bremen, 2005, S. 39-47.

Lübben, Th.; Mayr, P.: "Einfluss von asymmetrischen Fertigungsbedingungen auf den Verzug infolge von Abschreckprozessen, Arbeitsbericht". Bremen, 2003. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/A6-Bericht.pdf>.

Lübben, Th.; Zoch, H.-W.: "Einfluss von asymmetrischen Fertigungsbedingungen auf den Verzug in-folge von Abschreckprozessen". Bremen, 2007. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP%20A6.pdf>.

Macherauch, E.; Wohlfahrt, H.; Wolfstieg, U.: Zur zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen.: In: *HTM Zeitschrift für Werkstoffe Wärmebehandlung Fertigung*, 28, 3 (1973), S. 201-211.

Mallener, H.: Maß- und Formänderungen beim Einsatzhärten: In: *HTM*, 45, 1 (1990), S. 66-72.

Mayr, P.; Hoffmann, F.; Walter, A.; Neumann, P.; Stein, F.; Kaspar, R.; Santhoff, G.; Doege, E.; Dittmann, J.; Abdelfattah, S.; Bauckhage, K.; Fritsching, U.; Zöller, H.; Lübben, Th.; Dong, J.; Müller, H.; Franz, C.; Tönshoff, H. K.; Hillmann-Apmann, H.; Brinksmeier, E.; Eckebrecht, J.; Wohlfahrt, H.; Nitschke-Pagel, Th.: *Beherrschung von Wärmeprozessen im Fertigungsablauf*. Abschlussbericht - Vordringliche Aktion 19, Eds, Mayr, P.; Hoffmann, F.; Walter, A., Selbstverlag, Bremen, 2001.

Mehnert, J.: Gestaltung und Integration von Arbeitsplanungskompetenzen für hierarchielose Produktionsnetze. 2004.

Moryson, R.-D.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung 2004.

N.N.: *Handbuch der Arbeitsvorbereitung, Teil 1: Arbeitsplanung*. Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung (AWF) e.V. / Rationalisierungskuratorium der Deutschen Wirtschaft (RKW) e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1968.

N.N.: *DIN 19 226, Teil 1 Leittechnik; Regelungstechnik und Steuerungstechnik; Allgemeine Grundbegriffe*. Beuth, Berlin, 1994.

N.N.: *DIN EN ISO 683-17: Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle - Teil 17: Wälzlagerstähle* 1999.

N.N.: *DIN 8580: 2003-09, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag, Berlin, 2003a.

N.N.: *DIN 8589-0:2003-09: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, 2003b.

N.N.: *DIN EN ISO 1101:2008-08: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2004); Deutsche Fassung EN ISO 1101:2005*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.

N.N.: "Prozesskettenposter_Zahnrad_FINAL". Bremen, 2011. Klein, D. 09.03 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/Prozesskettenposter_Zahnrad_FINAL.pdf>.

Oral, A.; Cemal Cakir, M.: Automated cutting tool selection and cutting tool sequence optimisation for rotational parts In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20, (2004), S. 127-141.

Pfeifer, T.: *Qualitätsmanagement - Strategien, Methoden, Techniken*. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2001a.

Pfeifer, T.: *Praxisbuch Qualitätsmanagement*. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2001b.

Prinz, C.; Clausen, B.; Hoffmann, F.; Kohlmann, R.; Zoch, H.-W.: Metallurgical influence on distortion of the case-hardening steel 20MnCr5. Proceedings of: *1st Int. Conf. on Distortion Engineering*, Bremen, 2005, S. 75-82.

Prinz, C.; Hunkel, M.; Clausen, B.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Characterization of segregations and microstructure and their influence on

distortion of low alloy SAE 5120 steel. Proceedings of: *2nd Int. Conf. on Distortion Engineering IDE 2008*, Bremen, 2008, S. 61-68.

Prinz, C.; Rentsch, R.: Experimental Investigations concerning the development of distortion potential during the production of 20MnCr5: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 43, 1-2 (2012), S. 63 - 67.

Puller, S.: "Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen mittels elementarer Plastizitätstheorie." Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.

Pulm, U. : "Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung". München, 2004. Dissertation. 09.03 2013. <WWW-Seite. http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/mw/2004/pulm.pdf>.

Rentsch, R.; Prinz, C.: FE analysis of the hot rolling process on the origins of inhomogeneities related to steel bar distortion: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 43, 1-2 (2012), S. 73 - 77.

Scheffler, E.: *Statistische Versuchsplanung und -auswertung, Eine Einführung für Praktiker.*, Vol. 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997.

Schlecht, B.: *Maschinenelemente 2: Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen*. Verlag Pearson Studium, München, 2010.

Schuh, G.: "Produktionsmanagement I - Anhang 6 - Arbeitsvorbereitung / Arbeitsplanung". Aachen, 2011. WZL Aachen. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/080d8d8c949a1ac0c1256f190035d886/pm_i_eng_v6_2.pdf >.

Schwarzer, J.; Ehlers, M.; Güttler, J.: C.A.S.H. Computer Aided Simulation of Heat Treatment – An Overview Proceedings of: *IDE 2005, 1st International Conference on Distortion Engineering*, Bremen, 2005, S. 261-267.

Sim, W.-M.: Residual stress engineering in manufacture of aerospace structural parts. Proceedings of: *IDE 2011, 3rd Conference on Distortion Engineering*, 2011, S. 187-194.

Sisson, R. D. Jr.: A CHTE Project Summary.: In: *Heat Treating Progress*, March/April (2006), S. 18-20.

Sölter, J.: Ursachen und Wirkmechanismen der Entstehung von Verzug infolge spanender Bearbeitung. Dissertation, Bremen, 2010.

Sölter, J.; Nowag, L.; Sackmann, T.; Walter, A.; Rentsch, R.; Brinksmeier, E.: Einflüsse von Zerspanung und Umformung auf den Bauteilverzug: In: *wt Werkstattstechnik online*, 96, 3 (2006), S. Seite 131-137.

Steinbacher, M.; Surm, H.; Clausen, B.; Luebben, Th.; Hoffmann, F.: Methodical investigation of distortion biasing parameters during case hardening of spur wheels. Proceedings of: *Distortion Engineering*, Bremen, 2011, S. 167-176.

Steinbuch, A. P.: *Fertigungswirtschaft*. Ed. Olfert, K., Friedrich Kiehl Verlag, Ludwigshafen, 1999.

Stöbener, D.; von Freyberg, A.; Fuhrmann, M.; Goch, G.: Areal parameters for the characterisation of gear distortions: In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 43, 1-2 (2012), S. 120 - 124.

Surm, H.: Distortion of rings due to inhomogeneous temperature distributions. Proceedings of: *Distortion Engineering*, Bremen, 2011a, S. 23-32.

Surm, H.: Identifikation der verzugsbestimmenden Einflussgrößen beim Austenitisieren am Beispiel von Ringen aus dem Wälzlagerstahl 100Cr6. 2011b.

Surm, H.; Frerichs, F.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Erweiterte Verzugsanalyse am Beispiel von Wälzlagerringen – Dem Verzug eine Richtung geben!: In: *HTM Zeitschrift für Werkstoffe Wärmebehandlung Fertigung*, 63, 2 (2008), S. 95-103.

Surm, H.; Frerichs, F.; Lübben, Th.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Distortion of rings due to inhomogeneous temperature distributions: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 43, 1-2 (2012), S. 29-36.

Surm, H.; Hermann, M; Sattelberger, K.; Küper, A.; Hoffmann, F.: Identifikation verzugsrelevanter Einflussgrößen und Wechselwirkungen in der Fertigungskette "Einsatzgehärtetes Tellerrad: In: *HTM J. Heat Treatm. Mat.*, 65, 2 (2010), S. 85-94.

Surm, H.; Hoffmann, F.: Influence ofclamping condotions on distortion during heating of bearing rings: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40, 5-6 (2009), S. 396-401.

Surm, H.; Prinz, C.; Nowag, L.; Frerichs, F.; Hunkel, M.: Stand der Untersuchungen zu den Ursachen des Verzuges von blindgehärteten Wellen aus 20MnCr5. Proceedings of: *Distortion Engineering – Verzugsbeherrschung in der Fertigung. Kolloquium des SFB 570, Band 3*, 2006, S. 1-26.

Thoben, K.-D.: "Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B5 - Verzugsgerechte Produkt- und Prozessgestaltung". Bremen, 2007. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://www.sfb570.uni-bremen.de/files/TP-B5.pdf>.

Thoben, K.-D.; Klein, D.; Seifert, M.; Wuest, T.: Approaches to describe distortion along process chains: In: *Mat.-wiss. u.Werkstofftech*, 43, 1-2 (2012a), S. 178-185.

Thoben, K.-D.; Klein, D.; Wuest, T.; Zoch, H.-W.: Knowledge and planning system for distortion engineering: In: *Mat.-wiss. u.Werkstofftech*, 43, 1-2 (2012b), S. 192-198.

Thoben, K.-D.; Lübben, T.; Clausen, B.; Prinz, C.; Schulz, A.; Rentsch, R.; Kusmierz, R.; Nowag, L.; Surm, H.; Frerichs, F.; Hunkel, M.; Klein, D.; Mayr, P.: „Distortion Engineering“: Eine systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs: In: *HTM*, 57, 4 (2002), S. 6.

Tönshoff, H. K.: Trennen, Cutting. In: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Eds, Beitz, W.; Grote, K.-H., Vol. 20, Springer Verlag, Berlin, 2001,

Trapp, N.; Fiderer, M.; Lütjens, J.; Ehlers, M.; Schulze, G.: Simulation of case hardening of complex components by use of a construction kit. Proceedings of: *IDE 2005, 1st Int. Conf. on Distortion Engineering*, Bremen, 2005, S. 289-296.

Trute, S. : "Einfluss der Prozesskette auf die Feinkornbeständigkeit von mikrolegierten Einsatzstählen". Aachen, 2009. 09.03. 2013. <WWW-Seite. http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2009/2659/>.

Varde, A. S.; Rundensteiner, E. A.; Maniruzzaman, M.; Sisson, R.D. Jr.: "The QuenchMiner Expert System for Quenching and Distortion Control." Heat treating and surface engineering, ASM's HTS-03. Indianapolis, Indiana, USA, 2003. 174-183.

VDA4.1: *Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz*. 1996.

Volkmuth, J.: Eigenspannungen und Verzug: In: *HTM*, 51, 3 (1996), S. 145-154.

Volkmuth, J.: *Verzug bei Bauteilen aus dem Wälzlagerbereich*. Vol. Kolloquiumsband 1, Bremen, 2002.

Volkmuth, J.: Immer Ärger mit dem Verzug? Wo er herkommt und was man dagegen tun kann: In: *Konstruktion*, 7/8 (2005a), S. 57-63.

Volkmuth, J.; Lane, S.; Jung, M.; Sjöblom, U.: Uneven residual stress in bearing rings prior to hardening and their effect on shape changes after hardening.

Proceedings of: *IDE 2005, 1st International Conference on Distortion Engineering*, Bremen, 2005b, S. 23-30.

Weißbach, W.: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. 15. Auflage, Vieweg, Wiesbaden, 2004.

Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: *Einführung in die Fertigungstechnik*. Teubner, Stuttgart, 2004.

Zahn, G. : *Wissenbasiertes Datenmodell zur Integration von Konstruktion, Arbeitsplanerstellung und Spannplanung*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1999.

Zoch, H.-W.: Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Erstarrungsgeometrien von Strangguß aus dem Wälzlagerstahl 100Cr6 auf das Verzugsverhalten ringförmiger Bauteile beim Abschrecken in Härtepressen. Bremen, 1995.

Zoch, H.-W.: From Single Production Step to Entire Process Chain – the Global Approach of Distortion Engineering.: In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37, 1 (2006), S. 6-10.

Zoch, H.-W.: Distortion engineering: vision or ready to application.: In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40, 5-6 (2009), S. 342-348.

9 Anhang

Der Anhang beginnt mit einem Glossar (9.1), in dem die wichtigsten Begriffe dieser Arbeit kurz und übersichtlich erläutert werden. Anschließend werden neben den Abbildungen zum Prozesskettenvergleich der Prozessketten „zylindrischer Ring“ und „Zahnrad“ weitere vier Planungshilfsmittel „Prozesskettenvergleich“ präsentiert. Dies sind im Einzelnen:

- Prozesskettenvergleich der Prozesskette konischer Ring
- Prozesskettenvergleich der Prozesskette zylindrische Welle
- Prozesskettenvergleich der Prozesskette abgesetzte Welle
- Prozesskettenvergleich der Prozesskette Scheibe

In der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind:

Bae, M. K.: Using Fuzzy Logic to predict distortion tendency for supporting process planning. Diplomarbeit, Universität Bremen, 2005.

Scheuer, J.: Konzept und Entwicklung eines Prognosemodells mit Künstlichen Neuronalen Netzen für den Bauteilverzug. Diplomarbeit, Universität Bremen, 2007.

9.1 Glossar

Antriebstechnik: Unter Antriebstechnik sollen technische Systeme verstanden werden, die mittels Kraftübertragung Bewegungen erzeugen.

Arbeitsablaufplanung: Kurz- und mittelfristige Tätigkeiten werden in der Arbeitsablaufplanung (auch Prozessgestaltung genannt) zusammengefasst. Das Ergebnis der Arbeitsablaufplanung ist u.a. der Arbeitsplan für die anschließende Fertigung.

Arbeitsgang-(Arbeitsvorgang-)Ausarbeitung: Ausgestaltung und Detaillierung der einzelnen im Schritt Arbeitsgangfolgebestimmung definierten Arbeitsgänge [Geipel und Hentschel 2001, S. 33].

Arbeitsgang/Arbeitsvorgang: Alle die technologischen Operationen an einem oder mehreren Werkstücken, die nacheinander auf ein und derselben Maschine/Arbeitsplatz durchgeführt werden [Geipel und Hentschel 2001, S. 29].

Arbeitsplanerstellung: Unter Arbeitsplanerstellung werden Prozess- und Operationsplanung zusammengefasst. Sie besteht aus den fünf Teilaufgaben: Ausgangsteilbestimmung, Prozessfolgeermittlung, Fertigungsmittelauswahl, Einstellparameterermittlung und Vorgabezeitermittlung.

Arbeitsplanung: Gemäß der Definition des Ausschusses für wirtschaftliche Fertigung e.V. (AWF) umfasst die Arbeitsplanung einmalig durchzuführende Planungstätigkeiten, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Herstellung eines Erzeugnisses sichern [zitiert in Eversheim und Schuh 1999; S. 7-73]. Die Arbeitsplanung legt fest, was, wie und womit hergestellt werden soll [Eversheim 2002, S. 3].

Arbeitsstufe: Eine Arbeitsstufe (Teilarbeitsvorgang) umfasst alle technologischen Operationen, die nacheinander mit ein und demselben Werkzeug ausgeführt werden [Geipel und Hentschel 2001, S. 33].

Arbeitsvorgangsfolge/Arbeitsgangfolge: Zuordnung der Maschinen [Geipel und Hentschel 2001, S. 31]

Äußerer Zustand: Als äußerer Zustand sollen in dieser Arbeit alle Eigenschaften des Werkstücks verstanden werden, die sich auf die Oberfläche des Werkstücks beziehen. Dies sind u.a. die geometrische Form, Rauheit, Oberflächenverunreinigungen usw.

Aufgabenbereich: Aufgabenbereiche bestehen aus mehreren Teilaufgaben. Der Aufgabenbereich Prozessplanung besteht z.B. aus den vier Teilaufgaben: Aus-

gangsteilbestimmung, Prozessfolgeermittlung, Fertigungsmittelauswahl und Vorgabezeitermittlung.

Bauteil: Mit der Fertigstellung des Produkts wird ein Werkstück zum Bauteil (siehe auch Werkstück).

Bauteilverzug: siehe Verzug.

Bearbeitungsoperation: Als Bearbeitungsoperation wird der Teil eines Arbeitsvorgangs bezeichnet, der die Bearbeitung einer zusammenhängenden Bearbeitungsstelle am Werkstück mit einem Werkzeug auf einer Maschine beinhaltet (Beispiel: Vordrehen einer Stirnseite) [Eversheim 2002, S. 50].

Dishing: Spezielle Formänderung von Scheiben und Zahnrädern - tellerförmiges Verziehen [Clausen et al. 2009a, S. 357].

Eigenschaft: Die Eigenschaft bezeichnet ein Merkmal oder eine Besonderheit einer Sache. Bezogen auf das Werkstück soll als Eigenschaft das Vorhandensein eines Verzugspotenzials verstanden werden.

Einflussgröße: Eine Einflussgröße bedeutet ganz allgemein eine Größe, die einen Einfluss auf das System besitzt. U.a. sind System- und Stellgrößen ebenfalls Einflussgrößen.

Fertigungsmittel (Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge): Fertigungsmittel werden nach VDI „als Mittel zur direkten oder indirekten Form-, Substanz- oder Fertigungszustandsänderung mechanischer oder chemischer Art“ definiert [Eversheim 2002, S. 70].

Fertigungsprozess: Unter dem Fertigungsprozess sollen ganz allgemein alle Prozesse verstanden werden, die aus Rohmaterial bzw. aus einem Rohteil ein Fertigteil innerhalb der Betrachtung der gesamten Prozesskette herstellen.

Fertigungstechnik: Die Fertigungstechnik bezeichnet die industrielle Fertigung geometrisch bestimmter Körper [Jacobs und Dürr 2002, S. 11].

Fertigungstiefe: Unter Fertigungstiefe soll verstanden werden, wie viele einzelne Fertigungsschritte bei der Produktion eines Produktes notwendig sind und wie viele davon innerhalb eines Unternehmens stattfinden bzw. von Zulieferern stammen.

Fertigungsverfahren: Im Gegensatz zum Fertigungsprozess bezeichnet das Fertigungsverfahren die Prozesse, die geregelt (siehe Verfahren) das Werkstück vom Urzustand (Erschmelzen) in den Endzustand überführen (z.B. Urformver-

fahren, Umformverfahren, Trennverfahren, Form ändernde Verfahren und Stoffeigenschaft ändernde Verfahren).

Formabweichung: Bezeichnen ganz allgemein die Abweichung zwischen der Form nach einem Bearbeitungsprozess und den Angaben in der Konstruktionszeichnung. Die Formabweichung kann also nach dem Schmieden, der Zerspanung oder nach der abschließenden Wärmebehandlung entstehen.

Formänderung: Bezeichnet die Änderung zwischen der Form vor und nach der abschließenden Wärmebehandlung. Die Änderungen beziehen sich auf Winkelbeziehungen und Krümmungen eines Werkstückes.

Gefüge: Vielkristallaufbau metallischer Werkstoffe. Das Gefüge bezeichnet den Verband der Körner/Kristallite [Bargel und Schulze 2000, S. 8].

Herstellung: Der Begriff Herstellung wird vornehmlich für den Bereich der Stahlerzeugung verwendet. Wenn die gesamte Prozesskette von der Stahlerzeugung bis zur Wärmebehandlung im Vordergrund steht, wird der Begriff Fertigung verwendet (siehe auch Fertigungsprozess).

Hauptprozess: Unter einem Hauptprozess soll in dieser Arbeit eine Gliederung auf höchster Ebene verstanden werden. Sie können Unternehmen oder „Werkstätten“ darstellen. Hauptprozesse können z.B. durch Unternehmensgrenzen getrennt werden. Ein Beispiel für eine Unterteilung in Hauptprozesse wäre: Stahlerzeugung, Schmieden, Zerspanen und Wärmebehandlung.

Hochfeste Stahlbauteile: Unter hochfesten Stahlbauteilen sollen Bauteile verstanden werden, die besondere Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit, Zähigkeit, Härte, Verschleiß und Lebensdauer besitzen und meist mehrfach umgeformt, zerspant und gehärtet werden. Hochfeste Stahlbauteile sind z.B. Wälzlagerringe, Wellen und Zahnräder.

Innerer Zustand: Der innere Zustand bezeichnet alle Eigenschaften des Werkstücks, die sich auf das Innere eines Werkstücks beziehen. Dies sind u.a. die chemische Zusammensetzung, Seigerung, Eigenspannungen, Temperatur, mechanische Historie usw.

Kompensationspotenzial: Derzeit liegt nur eine qualitative Definition vor:
Die Summe aller Einflussmöglichkeiten, Vorgänge auszulösen, welche die Maße und Formen eines Bauteils günstig beeinflussen können [Hoffmann et al. 2002, S. 214].

Maßabweichung: Bezeichnet ganz allgemein die Abweichung zwischen dem Maß nach einem Bearbeitungsprozess und den Angaben in der Konstruktions-

zeichnung. Die Maßabweichung kann also nach dem Schmieden, der Zerspanung oder nach der abschließenden Wärmebehandlung entstehen.

Maßänderung: Bezeichnet die Änderung zwischen dem Maß vor und nach der abschließenden Wärmebehandlung. Es ist nur die Änderung der Maße eines Werkstückes gemeint, Winkelbeziehungen bleiben erhalten.

Methode: Unter einer Methode soll eine Vorgehensweise verstanden werden, die zu einem bestimmten Ziel führt.

Operationsplanung: Detaillierte Bearbeitungsplanung auf einer Maschine. Zerlegung eines Arbeitsvorgangs in Teilarbeitsvorgänge (Operationen [Eversheim 2002, S. 24, S. 50]/ Arbeitsstufen [Geipel und Hentschel 2001, S. 33]).

Planungsgrößen: Bezeichnet ganz allgemein Größen, die zur Planung eines Werkstücks entlang einer Prozesskette eingesetzt werden können. Eine Teilmenge der Planungsgrößen sind die System- und Stellgrößen. Planungsgrößen sind: Prozesskette, Material, Bauteilgeometrie, Hauptprozess, Rohteil (Geometrie), Unterprozess, Fertigungsmittel, Einstellparameter, Werkstückzustand, Verzug und Wechselwirkung.

Planungshilfsmittel: Werkzeug, sowohl papierbasiert als auch elektronisch, zur Unterstützung der Teilaufgaben der Arbeitsplanung. Die Planungshilfsmittel müssen der Kurzfristigkeit der Planung genüge tragen und müssen somit kurzfristig anwendbar sein. Ein Beispiel ist die Maschinenkarte, die alle notwendigen Angaben zur Auslegung eines Drehprozesses enthält.

Prozess (Sichtweise Arbeitsplanung): Mit dem Begriff Prozess aus der Sichtweise der Arbeitsplanung wird diejenige Arbeit bezeichnet, die im Rahmen des organisatorischen Ablaufs jeweils von einem Werker oder einer Werkergruppe an einem Arbeitsplatz zusammenhängend durchgeführt wird. In der Regel entspricht die Prozessfolge der Arbeitsplatzfolge [Eversheim 2002, S. 27].

Prozessfolge: Mit Prozessfolge ist die Reihenfolge gemeint, um einen Stoff oder Körper vom Roh- in den Fertigzustand zu überführen. Die Prozessfolge entspricht in der Regel der Arbeitsplatzfolge [Eversheim 2002, S. 27] = Arbeitsvorgangfolge [Geipel und Hentschel 2001, S. 24].

Prozesskette: Eine Prozesskette entsteht aus Verknüpfungen von Prozessen und stellt ein Netzwerk dar, dessen Komponenten (Prozesse) gemeinsam einen bestimmten Nutzen (Produkte) erbringen.

Prozessplanung: Arbeitsplanung: In der Prozessplanung wird der Durchlauf der Bearbeitungsschritte eines Werkstücks geplant. In der Prozessplanung wird ein-

zelnen Arbeitsvorgängen (Prozessen) eine Maschine bzw. ein Arbeitsplatz zugeordnet [Eversheim 2002, S. 24].

Ring, zylindrisch: Ring mit zylindrischem Querschnitt. Innendurchmesser 133 mm, Wandstärke 6 mm, Breite 26 mm; Werkstoff 100Cr6.

Ring, konisch: Ring mit konischem Querschnitt. Außendurchmesser 148 mm, minimaler Innendurchmesser 133 mm, Konuswinkel 9°, Breite 26 mm; Werkstoff 100Cr6.

Rohteil = Ausgangsteil

Rohteilbestimmung = Rohteilfestlegung [Geipel und Hentschel 2001, S. 25].

Rundheitsabweichung: Teil der Formabweichung insbesondere bei Ringen.

Rundheitsänderung: Teil der Formänderung insbesondere bei Ringen.

Rundheit: Abstand zweier konzentrischer Kreise, die die erfasste Umfangslinie berührend einschließen und deren radialer Abstand ein Minimum ist [N.N. 2008, S. 21].

Schmieden: Unter dem Oberbegriff „Schmieden“ soll hauptsächlich das Warmumformen von Stahl u.a. auf Pressen und Schmiedemaschinen verstanden werden. Schmieden besteht aus einer Verfahrensgruppe, die sich aus mehreren Grundverfahren nach DIN 8580 (Urformen, Umformen, Trennen, Stoffeigenschaft ändern, …) zusammensetzt.

Stand der Technik: Unter dem Stand der Technik soll das bislang technisch Mögliche verstanden werden. Das Mögliche bezieht sich sowohl auf den bereits industriellen Einsatz als auch auf das derzeit in der Forschung befindliche.

Stellgröße: Unter einer Stellgröße sollen die Größen eines Fertigungsprozesses verstanden werden, die für den Prozess z. B. an einer Maschine eingestellt werden können. Dies sind u.a. Temperatur, Umformgrade, Schnittparameter usw. [Brinksmeier 1991, S. 26]. Stellgrößen lassen sich direkt an den Geräten / Maschinen einstellen.

Sollgeometrie: Gewünschte Form und Abmessung des Bauteils am Ende der Prozesskette.

Systemgröße: Unter Systemgrößen eines Fertigungsprozesses sollen Maschine, Werkstück, Werkzeug, Kühlschmierung usw. verstanden werden [Brinksmeier 1991, S. 26].

Technologische Kriterien: Technologische Kriterien (Werkstoff, Gestalt, Oberfläche usw.) sind Kriterien, die die Technik betreffen, um das Bauteil laut Spezifikation herzustellen. Sie resultieren aus verfahrensspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Rohteilarten [Eversheim 2002, S. 25].

Teilaufgaben: Teilaufgaben bezeichnen die Aufgaben innerhalb der Arbeitsplanerstellung sowie der Prozess- und Operationsplanung (siehe auch Arbeitsplanerstellung).

Teilefertigung: Vorstufe der Produktion bei mehrstufiger Produktion vor der Montage (Zusammensetzung fertiger Teile).

Teilprozess: Als Teilprozess wird die erste Untergliederung eines Hauptprozesses bezeichnet. Ein Teilprozess bezieht sich jeweils auf den Prozess an einem Arbeitsplatz (oder einer Anlage/Maschine). Eine weitere Untergliederung erfragt dann die Unterprozesse, die an einem Arbeitsplatz durchgeführt werden.

Träger des Verzugspotenzials sind die Zustandsgrößen am Ende eines Teilprozesses.

Unterprozess: Ein Unterprozess bezeichnet in dieser Arbeit die weitere Untergliederung der Teilprozesse. Die Unterprozesse sind die Prozesse, die an einem Arbeitsplatz durchgeführt werden.

Verfahren: Unter einem Verfahren soll ein geregelter, in Verfahrensschritte zerlegbarer, nachvollziehbarer und wiederholbarer Ablauf verstanden werden.

Verfahrensgruppe: Eine Verfahrensgruppe (z.B. Schmieden) ist ein Ober- bzw. Hauptbegriff, in dem mehrere Einzel-Verfahren, bezeichnet nach DIN 8580 (Urformen, Umformen usw.), enthalten sind.

Verzug: Der Begriff „Verzug“ soll in Anlehnung an [Heeß et al. 2007, S. 1] rein umgangssprachlich verwendet werden, um anzudeuten, dass sich ein Werkstück nach der abschließenden Wärmebehandlung in Form von Maß- und/oder Formänderungen „verzogen“ hat.

Verzugscharakterisierung: Zur Verzugscharakterisierung werden beispielsweise bei Ringgeometrien die Rundheit, bei Wellengeometrien die „Krümmung“ und bei Zahnradgeometrien eine Art „Schalen- bzw. Tellerform“ oder auch die Flankenlinienabweichung usw. gewählt [Hoffmann et al. 2002, S. 216], [Clausen et al. 2009a, S. 357], [Kohlhoff et al. 2011, S. 157].

Verzugskenngröße: Verzugskenngrößen quantifizieren die Maß- und Formänderungen eines Bauteils. Mögliche Verzugskenngrößen sind Rundheitsänderung oder Krümmungsänderung (siehe auch Verzugscharakterisierung).

Verzugsmechanismus: Unter Verzugsmechanismus soll hier die physikalische Wirk- und Funktionsweise zur Beschreibung im Innern des Werkstücks bezogen auf die Verzugsentstehung verstanden werden.

Verzugspotential: Derzeit liegt nur eine qualitative Definition vor: „Das Verzugspotenzial ist die Summe aller Einflussmöglichkeiten, Vorgänge auszulösen, welche die Maße und Formen eines Bauteils ungünstig beeinflussen können“ [Hoffmann et al. 2002, S. 214].

Verzugspotenzialträger: siehe Träger des Verzugspotenzials.

Vorrichtungen (z.B. Spannmittel): Vorrichtungen sind Fertigungsmittel, welche die Lage eines Materials zum Werkzeug bestimmen und bis zur Beendigung der Bearbeitung sichern [Eversheim 2002, S. 74]. Das Spannmittel kann z.B. eine Vorrichtung oder aber aus anderer Sicht auch ein Werkzeug sein (siehe Werkzeug).

Wechselwirkung: Wechselwirkung bedeutet ganz allgemein, dass etwas durch etwas anderes auf gleicher Betrachtungsebene verändert wird. Wechselwirkungen führen zu Änderungen von Zustandsgrößen durch andere Zustandsgrößen während eines Prozesses. Man spricht aber auch von Wechselwirkung, wenn die System- und Stellgrößen eines Fertigungsprozesses im Zusammenspiel mit den System- und Stellgrößen eines anderen Fertigungsprozesses, einen Einfluss auf das Ergebnis dieses anderen Fertigungsprozesses besitzen.

Weichbearbeitung: Unter Weichbearbeitung soll das Zerspanen bzw. Drehen des Werkstücks im „weichen“ Zustand zu verstehen sein, im Gegensatz zur Hartbearbeitung am „harten“ Zustand nach der Härtung z.B. durch Schleifen.

Werkstoffeigenschaften: Eigenschaften, durch die der Werkstoff beschrieben werden kann. Dies sind z. B. seine Härte, Festigkeit, Zähigkeit usw.

Werkstück: Als Werkstück sollen die sich in der Fertigung befindlichen Produkte bezeichnet werden. Das "Werkstück" ist das zu "werkende" bzw. zu bearbeitende Stück. Mit der Fertigstellung des Produkts wird das Werkstück zum Bauteil (siehe auch Bauteil).

Werkzeug: Unter einem Werkzeug soll ganz allgemein ein Hilfsmittel verstanden werden, mit dem eine Aufgabe bzw. ein Gegenstand bearbeitet werden kann. Ein Werkzeug kann eine Methode selbst, das Ergebnis einer Methode (Planungshilfsmittel), aber auch ein Spannmittel sein.

Werkstückeigenschaften: Äußere (z.B. Oberfläche) und innere Eigenschaften (z.B. Gefüge) eines Werkstücks (siehe auch Eigenschaften, äußerer Zustand, innerer Zustand).

Zahnrad: Schrägstirnrad mit folgenden Maßen: Bohrungsdurchmesser 45 mm, Breite 15 mm, Teilkreisdurchmesser 116,669 mm, Normalmodul 2,557, Zähnezahl 42; Werkstoff 20MnCr5.

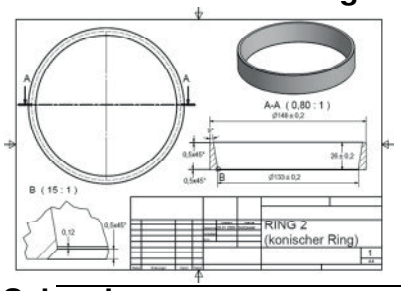
Zerspanen (Zerspanung): Unter Zerspanen (Spanen) soll nach [N.N. 2003b] (siehe auch [Tönshoff 2001, S. S39]) das Bearbeiten mit bestimmter Schneide (u.a. das Drehen) und unbestimmter Schneide (u.a. Schleifen) verstanden werden.

Zustand: Unter einem Zustand wird die Gesamtheit aller Eigenschaften verstanden, die zur Abgrenzung und Unterscheidung des Werkstücks zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Fertigung von einem anderen Zeitpunkt nötig sind.

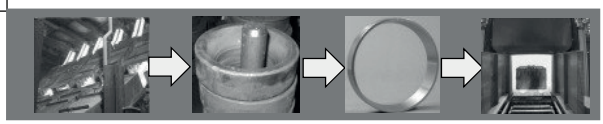
Zustandsgröße: Zustandsgrößen beschreiben alle Vorgänge im Bauteil (Sollgeometrie, chemische Zusammensetzung, Gefüge und Korngröße, (Eigen-) Spannungen, Temperatur, mechanische Historie). Zustandsgrößen, die im Prozess direkt durch die Prozessparameter beeinflusst werden können sind: Temperatur, Spannungen und Kohlenstoffgehalt. Alle Zustandsgrößen können während des Prozesses wechselwirken.

9.2 Prozesskettenvergleich verschiedener Prozessketten

1 Konstruktionszeichnung



2 Fertigungsprozesskette



DEW, Siegen	FAG,	IWT, Bremen	IWT,
Stranggussanlage	Schweinfurt	Drehzentrum Index	Bremen
Gefertigt nach	Hatebur,	V250:	Solo und
Richtlinien von	Induktionsofe	-Pickup-Bauweise	IPSEN
DEW, Siegen	n	-Werkzeugrevolver	(rot)

3 Schmelze

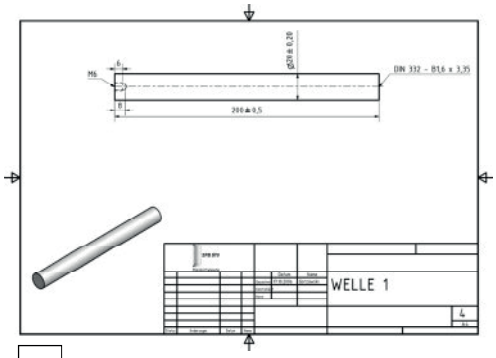
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	AL	Ti
Target after EN ISO 683-17	0.93-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	<0.025	<0.015	1.35-1.60	<0.10	-	<0.03	<0.050	-
Melt 1 No. 152852	0.91	0.20	0.43	0.018	0.008	1.38	0.05	0.17	0.17	0.002	0.002
Melt 2 No. 156272	0.97	0.21	0.44	0.011	0.007	1.51	0.05	0.11	0.11	0.006	0.002

4 Wesentliche Erkenntnisse

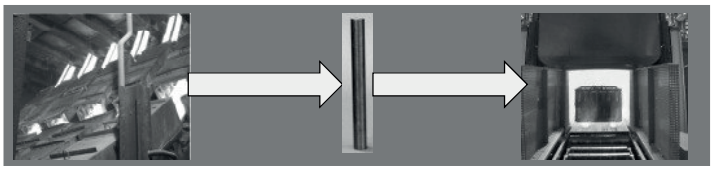
1. Art der Einspannung bestimmt Rundheitsabweichung und Fertigungseigenspannungen [Sölter 2010].
2. Effekte aufgrund Eigengewicht / Reibung beeinflussen die Rundheitsabweichungen [Surm 2011].
3. Formabweichungen aufgrund rein thermischer Inhomogenitäten werden nur bei der Ölabschreckung erwartet [Surm et al. 2012].
4. Effekte der Umwandlungsplastizität bestimmen das Verzugsverhalten [Surm et al. 2012], [Frerichs et al. 2009].
5. Ovalitätsänderungen können im Moment nicht vollständig auf ein konkretes Verzugspotenzial zurückgeführt werden [Clausen et al. 2006].
6. Die Orientierung des konischen Ringes bezüglich der Auflage (schmale/breite Seite) beeinflusst die Ebenheitsabweichungen der Stirnflächen [Hoffmann 2007, S. 341].
7. Bei ungleichmäßiger Abkühlung in axialer Richtung stellt sich ein Kippen der Mantelfläche ein [Frerichs et al. 2009].
8. Die konische Form beeinflusst die ungleichmäßige Abkühlung [Frerichs et al. 2009].
9. Das Kippen der Mantelflächen kann durch gezielt ungleichmäßige Wärmeübergangskoeffizienten beeinflusst werden [Frerichs et al. 2009].
10. Begleitende FEM-Simulationen zeigen, dass der Effekt im wesentlichen durch Umwandlungsplastizität hervorgerufen wird [Frerichs et al. 2009].
11. Die Rundheitsabweichungen entsprechen im Wesentlichen denen von zylindrischen Ringen [Frerichs et al. 2009] .

Abbildung 42: Zusatzinformationen Prozesskette „konischer Ring“

1 Konstruktionszeichnung



2 Fertigungsprozesskette



DEW, Siegen
Stranggussanlage
Gefertigt nach
Richtlinien von
DEW, Siegen

Drehzentrum Weiler
DZ 32 CNC
- Horizontale Spindel
- Werkzeugrevolver

IWT, Bremen
Öfen
Solo und
Rohrofen

3 Schmelze

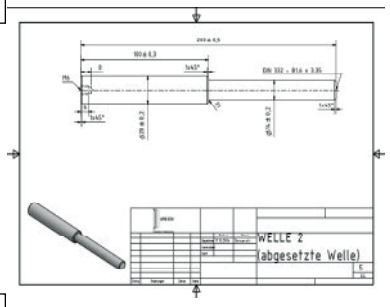
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	AL	N
Soll nach DIN 10084:2008	0,20	0,25	1,25	<0,0035	<0,0035	1,15	-	-	-	-	-
Schmelze 1 Nr. 156944	0,20	0,17	1,35	0,011	0,021	1,09	0,04	0,14	0,11	0,028	0,0139

4 Wesentliche Erkenntnisse

1. Krümmungsänderung blindgehärteter Wellen besitzt eine Vorzugsrichtung und kann mit einer Struktur im Querschliff korreliert werden [Prinz et al. 2005], [Prinz et al. 2008], [Hunkel et al. 2007].
2. Härtbarkeit und Vorwärmebehandlung beeinflussen die Krümmungsänderung und die Maßänderungen [Prinz et al. 2005]. Dies wurde bei einsatzgehärteter Tellerräder bestätigt [Surm et al. 2010].
3. Maß und Formänderungen werden durch Umwandlungsdehnung , -Plastizität sowie Kriechen beeinflusst [Hunkel et al. 2010].
4. Die Krümmungsänderung wird durch eine Anisotropie und Ortsabhängigkeit in der Umwandlungsdehnung und -Plastizität beeinflusst, die durch die Ausbildung eines Zeiligen Gefüges erklärt werden kann [Hunkel et al. 2010].
5. Die Struktur im Querschliff wird beeinflusst durch Überlagerung von Seigerungen und lokalem Umformgrad [Prinz et al. 2005], [Prinz und Rentsch 2012], [Rentsch und Prinz 2012].

Abbildung 43: Zusatzinformationen Prozesskette „zylindrische Welle“

1 Konstruktionszeichnung



2 Fertigungsprozesskette

DEW, Siegen Stranggussanlage Gefertigt nach Richtlinien von DEW, Siegen	Drehzentrum Weiler DZ 32 CNC – Horizontale Spindel – Werkzeugrevolver	IWT, Bremen Öfen Solo und Rohrofen

3 Schmelze

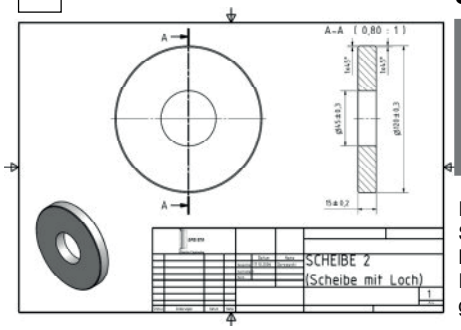
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	AL	N
Target after DIN 10084:2008	0.17-0.22	max 0.4	1.1-1.4	max 0.025	max 0.035	1.0-1.3	-	-	-	-	-
Melt 1 No. 156944	0,20	0,17	1,35	0,011	0,021	1,09	0,04	0,14	0,11	0,028	0,0139

4 Wesentliche Erkenntnisse

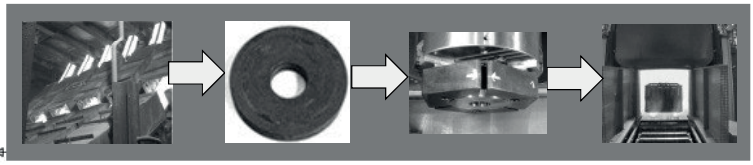
1. Die Formänderungen, die sich eindeutig auf das Aufkohlen zurückführen lassen, sind klein, sofern die Aufkohlung symmetrisch ist [Bahnsen et al. 2007].
2. Die Aufkohlungstiefe bzw. die damit verbundene relativ eingebrachte Kohlenstoffmenge lassen sich in eine einfache mathematische Beziehung zu unterschiedlichen Maßänderungsparametern setzen [Bahnsen et al. 2007].
3. Anhand der Ergebnisse zu Welle und Scheibe kann vermutet werden, dass eine universelle, von der jeweils betrachteten Bauteilgeometrie unabhängige Berechnung der Maßänderungen möglich ist [Bahnsen et al. 2007].
4. Die Krümmungsänderung erfolgt in eine Vorzugsrichtung. Der Streubereich des dünneren Zylinderabschnittes erstreckt sich über einen größeren Winkelbereich [Hoffmann 2007, S. 349, Abb. 29].

Abbildung 44: Zusatzinformationen Prozesskette „abgesetzte Welle“

1 Konstruktionszeichnung



2 Fertigungsprozesskette



DEW, Siegen
Stranggießanlage
Nach DEW-Prozeduren gefertigt

Hay, Bad Sobernheim
halbautomatische Schmiedepresse
Šmeral LMZ/LZK 1000
Induktionsofen EBS 30

IWT, Bremen
Drehzentrum Index V250:
-Pickup-Bauweise
-Werkzeugrevolver

IWT, Bremen
Öfen: Solo und IPSEN

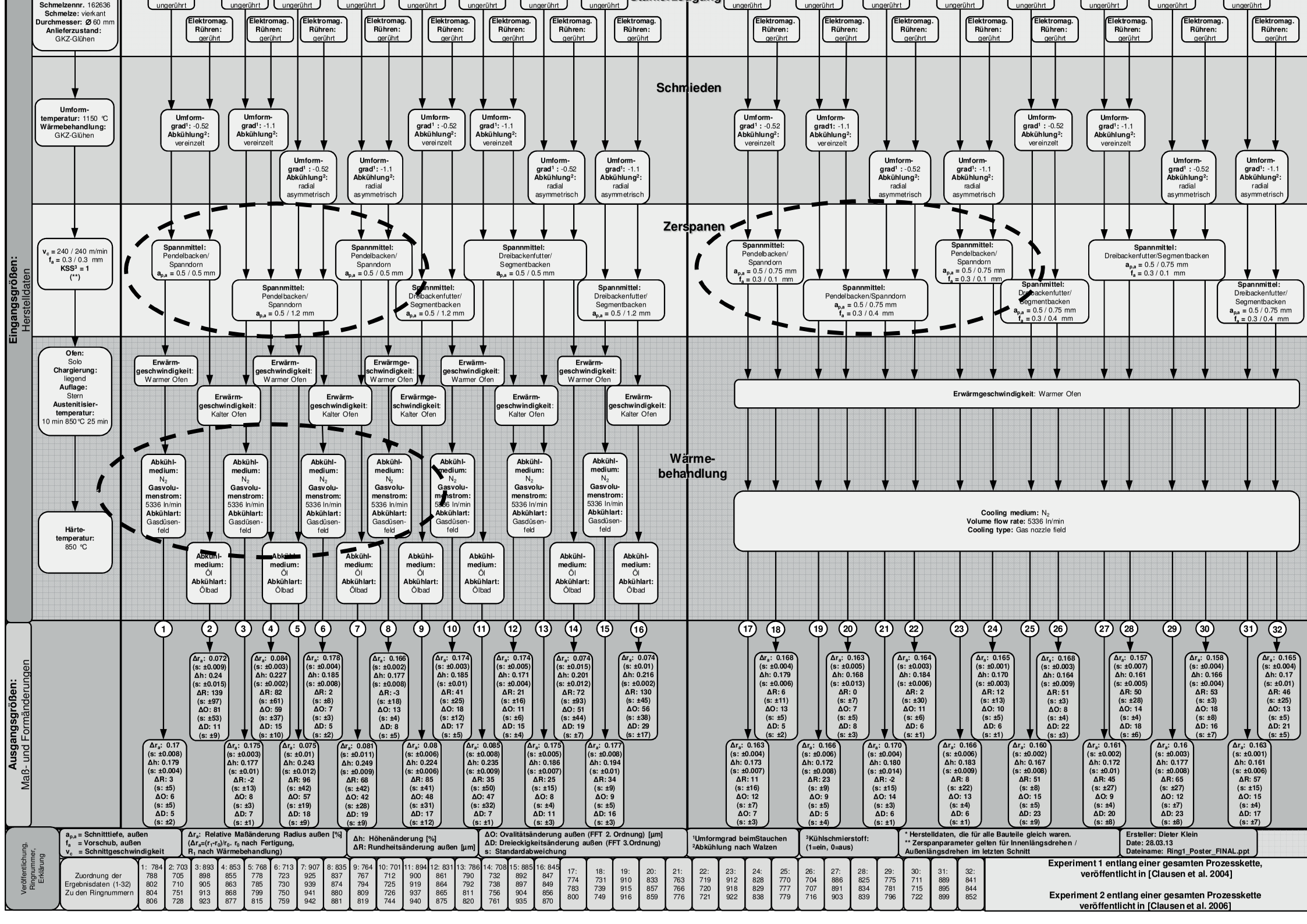
3 Schmelze

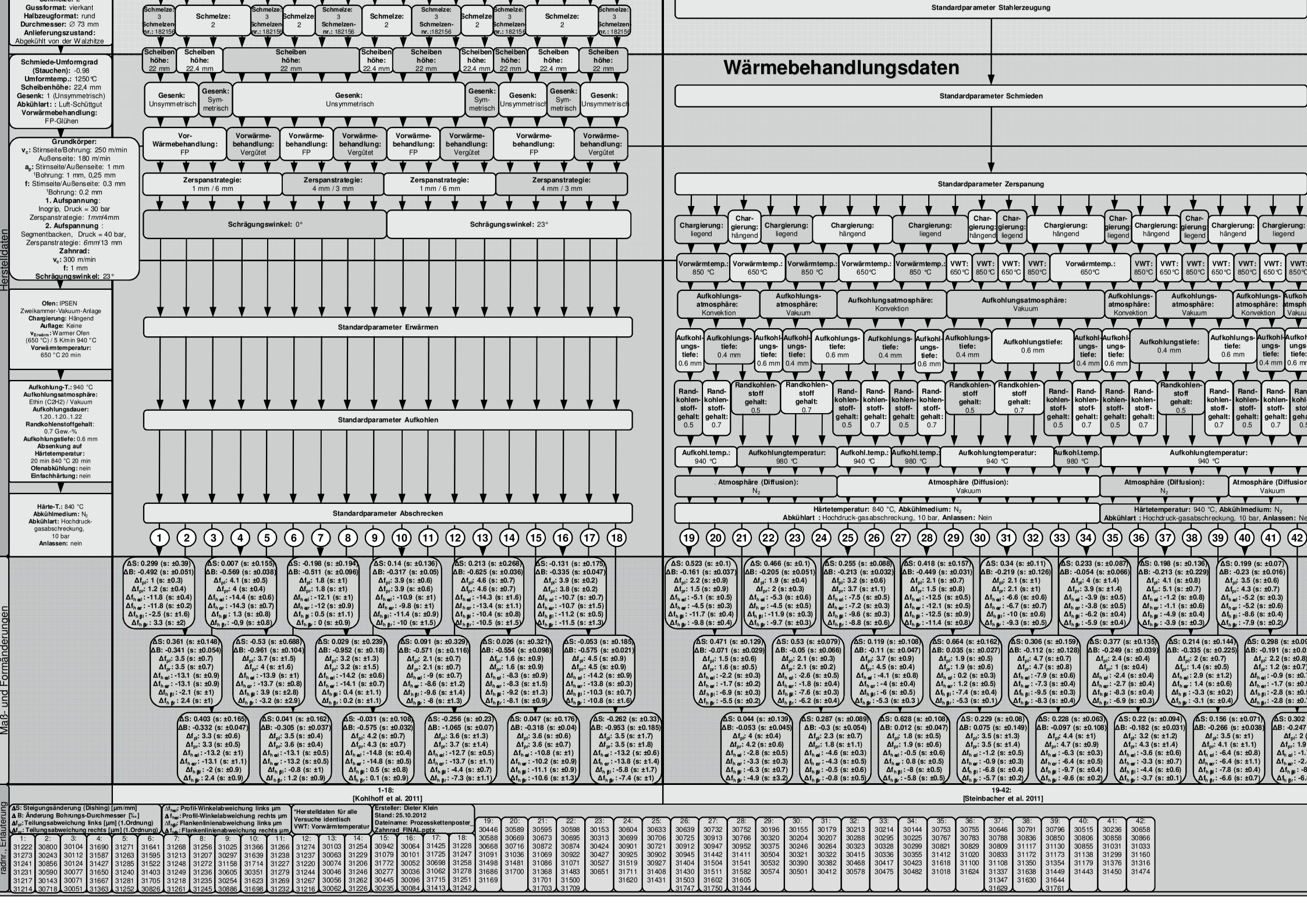
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	AL	N
Target after DIN 10084:2008	0.17-0.22	max 0.4	1.1-1.4	max 0.025	max 0.035	1.0-1.3	-	-	-	-	-
Melt 1 No. 156944	0.20	0.17	1.35	0.011	0.021	1.09	0.04	0.14	0.11	0.028	0.0139
Melt 2 No.183324	0.20	0.23	1.35	0.011	0.020	1.02	0.03	0.10	0.12	0.04	0.015
Melt 3 No. 182156	0.21	0.09	1.35	0.013	0.026	1.24	0.09	0.12	0.10	0.03	0.012

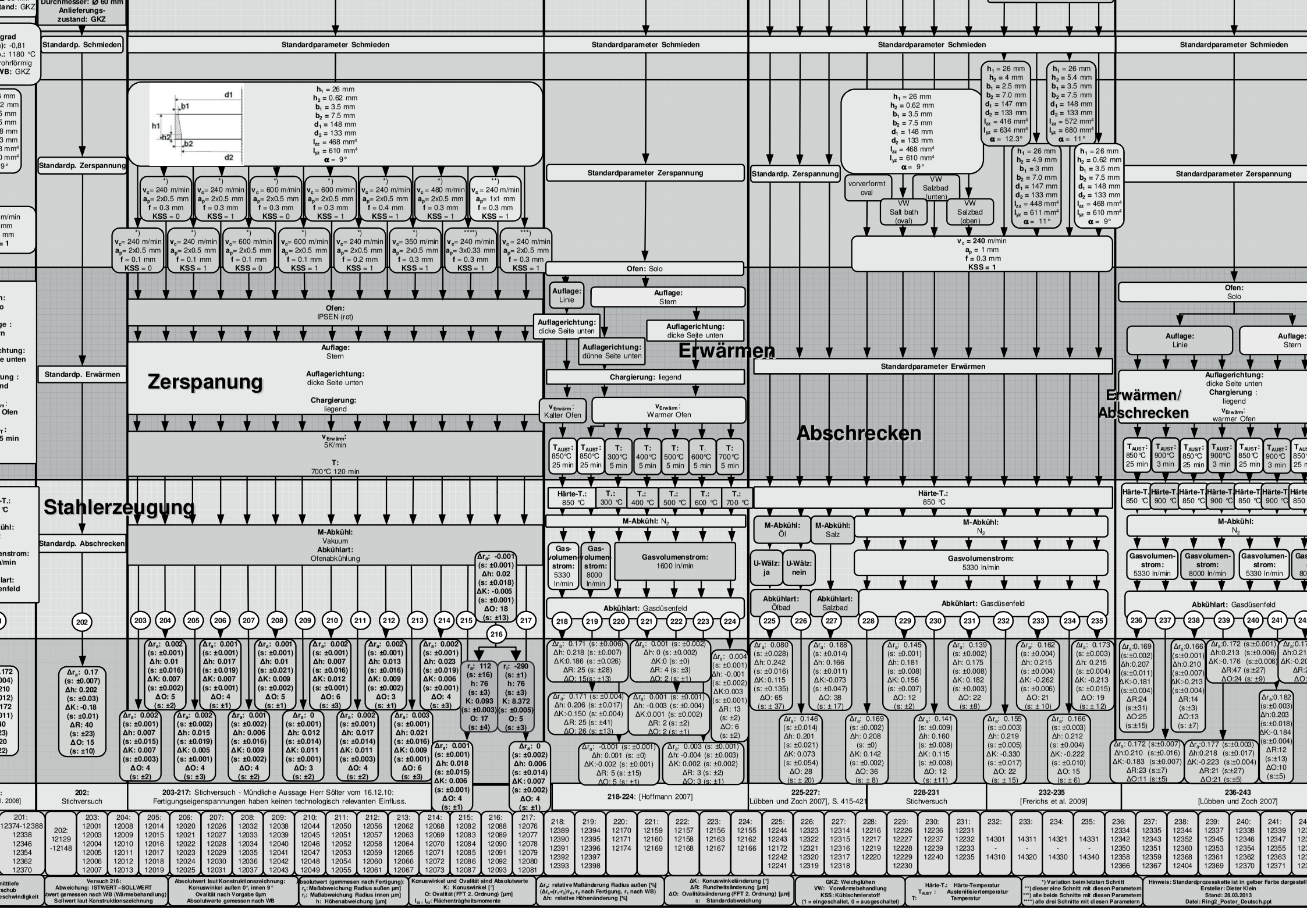
4 Wesentliche Erkenntnisse:

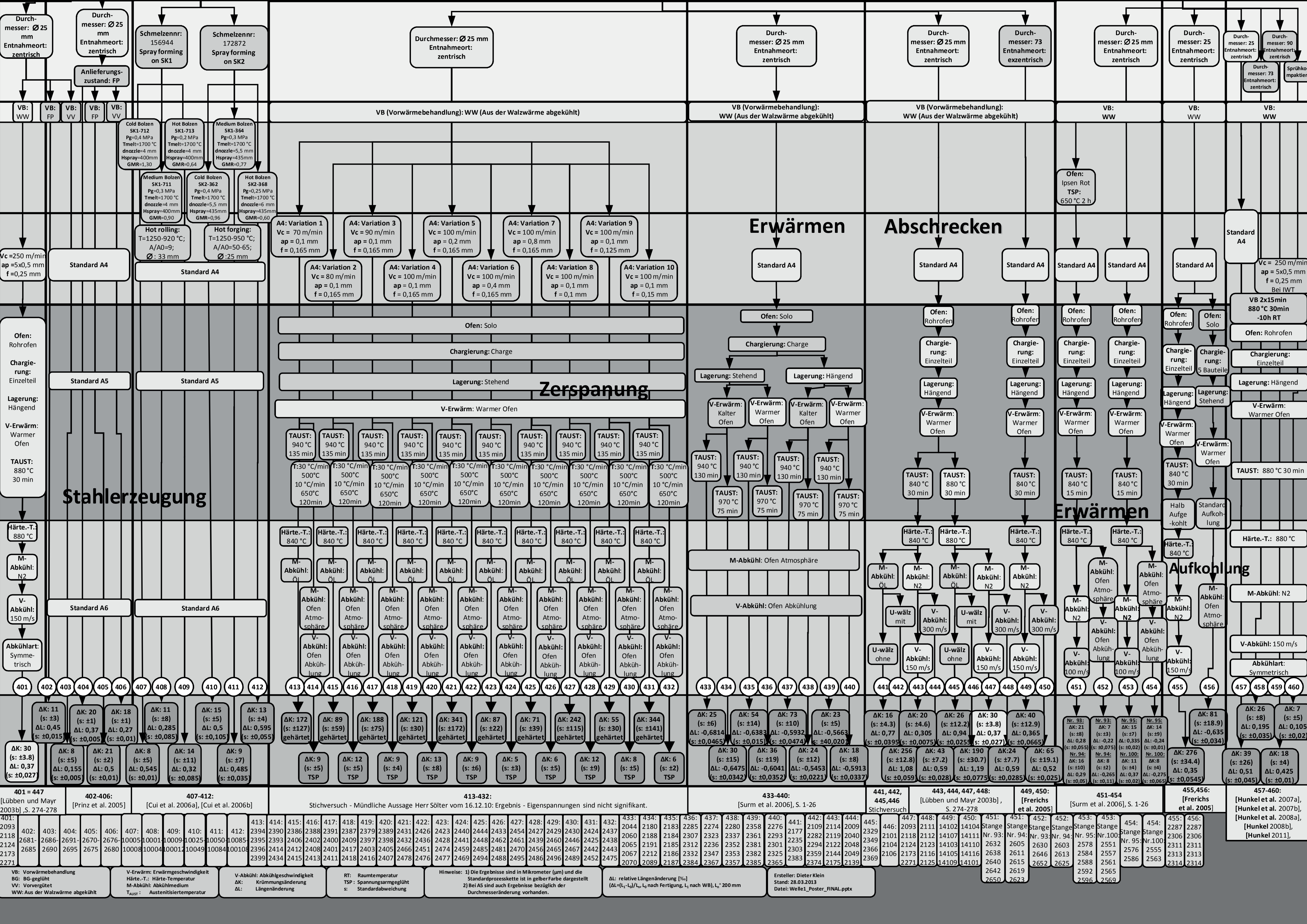
1. Signifikanter Einfluss der Härtbarkeit und der Vorwärmebehandlung auf die Maßänderung [Clausen et al. 2009a].
2. Signifikanter Einfluss von Härtetemperatur, Aufkohlungstiefe und Volumenstrom beim Abschrecken auf die Maßänderung [Clausen et al. 2009b].
3. Signifikanter Einfluss der Auflage beim Härten ([Clausen et al. 2009b), der Zerspanstrategie und der Wechselwirkung Zerspanstrategie-Härtbarkeit ([Clausen et al. 2009a) auf das mittlere Dishing.
4. Bei symmetrischer/asymmetrischer Umformstrategie kann das mittlere Dishing durch eine symmetrische/asymmetrische Zerspanstrategie minimiert werden [Brinksmeier et al. 2011].
5. Bei nahezu seigerungsfreiem Werkstoff entsteht kein mittleres Dishing, die Streuungen sind halb so groß wie bei gegossenem Werkstoff [Brinksmeier et al. 2011].
6. Die Ursache für das Dishing sind werkstoffliche Mechanismen, deren Auswirkung durch Umformung und Zerspanung kompensiert werden können [Brinksmeier et al. 2011].

Abbildung 45: Zusatzinformationen Prozesskette „Scheibe“

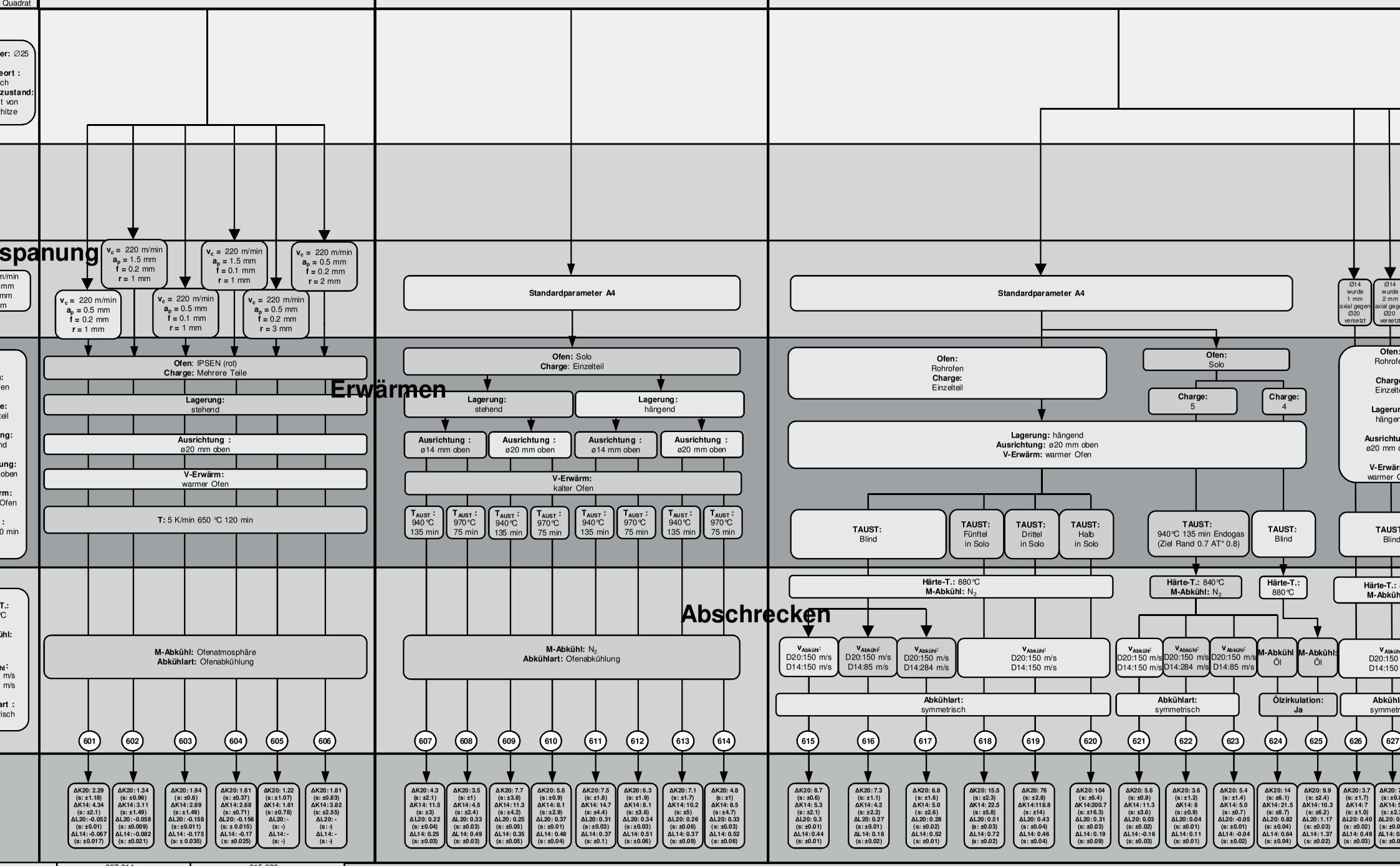

Eingangsgrößen: Herstelldaten
Ausgangsgrößen: Maß- und Formänderungen
Schmieden
Zerspanen
Wärme-behandlung
Schmelzenr. 162636
Schmelze: vierkant
Durchmesser: Ø 60 mm
Anlieferzustand: GKZ-Glühen
ungerührt
Elektromag. Rühren: gerührt
Umformtemperatur: 1150 °C
Wärmebehandlung: GKZ-Glühen
Umformgrad¹: -0.52
Umformgrad¹: -1.1
Abkühlung²: vereinzelt
Abkühlung²: radial asymmetrisch
v_c = 240 / 240 m/min
f_a = 0.3 / 0.3 mm
KSS³ = 1
(**)
Spannmittel: Pendelbacken/ Spanndorn
a_p,a = 0.5 / 0.5 mm
Spannmittel: Pendelbacken/ Spanndorn
a_p,a = 0.5 / 1.2 mm
Spannmittel: Dreibackenfutter/ Segmentbacken
a_p,a = 0.5 / 0.5 mm
Spannmittel: Dreibackenfutter/ Segmentbacken
a_p,a = 0.5 / 1.2 mm
Spannmittel: Pendelbacken/ Spanndorn
a_p,a = 0.5 / 0.75 mm
f_a = 0.3 / 0.1 mm
Spannmittel: Pendelbacken/Spanndorn
a_p,a = 0.5 / 0.75 mm
f_a = 0.3 / 0.4 mm
Spannmittel: Dreibackenfutter/ Segmentbacken
a_p,a = 0.5 / 0.75 mm
f_a = 0.3 / 0.1 mm
Spannmittel: Dreibackenfutter/ Segmentbacken
a_p,a = 0.5 / 0.75 mm
f_a = 0.3 / 0.4 mm
Ofen: Solo
Chargierung: liegend
Auflage: Stern
Austenitisiertemperatur: 10 min 850 °C 25 min
Härtetemperatur: 850 °C
Erwärmgeschwindigkeit: Warmer Ofen
Erwärmgeschwindigkeit: Kalter Ofen
Abkühlmedium: N2
Gasvolumenstrom: 5336 ln/min
Abkühlart: Gasdüsenfeld
Abkühlmedium: Öl
Abkühlart: Ölbad
Cooling medium: N2
Volume flow rate: 5336 ln/min
Cooling type: Gas nozzle field
1: Δra: 0.17 (s: ±0.008) Δh: 0.179 (s: ±0.004) ΔR: 3 (s: ±5) ΔO: 6 (s: ±5) ΔD: 5 (s: ±2)
2: Δra: 0.072 (s: ±0.009) Δh: 0.24 (s: ±0.015) ΔR: 139 (s: ±97) ΔO: 81 (s: ±53) ΔD: 11 (s: ±9)
3: Δra: 0.175 (s: ±0.003) Δh: 0.177 (s: ±0.01) ΔR: -2 (s: ±13) ΔO: 8 (s: ±3) ΔD: 7 (s: ±1)
4: Δra: 0.084 (s: ±0.003) Δh: 0.227 (s: ±0.002) ΔR: 82 (s: ±61) ΔO: 59 (s: ±37) ΔD: 15 (s: ±10)
5: Δra: 0.075 (s: ±0.01) Δh: 0.243 (s: ±0.012) ΔR: 96 (s: ±42) ΔO: 57 (s: ±19) ΔD: 18 (s: ±9)
6: Δra: 0.178 (s: ±0.004) Δh: 0.185 (s: ±0.008) ΔR: 2 (s: ±8) ΔO: 7 (s: ±3) ΔD: 5 (s: ±2)
7: Δra: 0.081 (s: ±0.011) Δh: 0.249 (s: ±0.009) ΔR: 68 (s: ±42) ΔO: 42 (s: ±28) ΔD: 19 (s: ±9)
8: Δra: 0.166 (s: ±0.002) Δh: 0.177 (s: ±0.008) ΔR: -3 (s: ±18) ΔO: 13 (s: ±4) ΔD: 8 (s: ±5)
9: Δra: 0.08 (s: ±0.006) Δh: 0.224 (s: ±0.006) ΔR: 85 (s: ±41) ΔO: 48 (s: ±31) ΔD: 17 (s: ±12)
10: Δra: 0.174 (s: ±0.003) Δh: 0.185 (s: ±0.01) ΔR: 41 (s: ±25) ΔO: 18 (s: ±12) ΔD: 17 (s: ±5)
11: Δra: 0.085 (s: ±0.008) Δh: 0.235 (s: ±0.009) ΔR: 35 (s: ±50) ΔO: 47 (s: ±32) ΔD: 7 (s: ±1)
12: Δra: 0.174 (s: ±0.005) Δh: 0.171 (s: ±0.004) ΔR: 21 (s: ±16) ΔO: 11 (s: ±6) ΔD: 15 (s: ±4)
13: Δra: 0.175 (s: ±0.005) Δh: 0.186 (s: ±0.007) ΔR: 25 (s: ±15) ΔO: 8 (s: ±4) ΔD: 11 (s: ±3)
14: Δra: 0.074 (s: ±0.015) Δh: 0.201 (s: ±0.012) ΔR: 72 (s: ±93) ΔO: 51 (s: ±44) ΔD: 19 (s: ±7)
15: Δra: 0.177 (s: ±0.008) Δh: 0.194 (s: ±0.01) ΔR: 34 (s: ±9) ΔO: 9 (s: ±5) ΔD: 16 (s: ±3)
16: Δra: 0.074 (s: ±0.01) Δh: 0.216 (s: ±0.002) ΔR: 130 (s: ±45) ΔO: 56 (s: ±38) ΔD: 29 (s: ±17)
17: Δra: 0.163 (s: ±0.004) Δh: 0.173 (s: ±0.007) ΔR: 11 (s: ±16) ΔO: 12 (s: ±7) ΔO: 7 (s: ±3)
18: Δra: 0.168 (s: ±0.004) Δh: 0.179 (s: ±0.006) ΔR: 6 (s: ±11) ΔO: 13 (s: ±5) ΔD: 5 (s: ±2)
19: Δra: 0.166 (s: ±0.006) Δh: 0.172 (s: ±0.008) ΔR: 23 (s: ±9) ΔO: 9 (s: ±5) ΔD: 5 (s: ±4)
20: Δra: 0.163 (s: ±0.005) Δh: 0.168 (s: ±0.013) ΔR: 0 (s: ±7) ΔO: 7 (s: ±5) ΔD: 8 (s: ±3)
21: Δra: 0.170 (s: ±0.004) Δh: 0.180 (s: ±0.014) ΔR: -2 (s: ±15) ΔO: 14 (s: ±3) ΔD: 6 (s: ±1)
22: Δra: 0.164 (s: ±0.003) Δh: 0.184 (s: ±0.006) ΔR: 2 (s: ±30) ΔO: 11 (s: ±6) ΔD: 6 (s: ±1)
23: Δra: 0.166 (s: ±0.006) Δh: 0.183 (s: ±0.009) ΔR: 8 (s: ±22) ΔO: 13 (s: ±4) ΔD: 6 (s: ±1)
24: Δra: 0.165 (s: ±0.001) Δh: 0.170 (s: ±0.003) ΔR: 12 (s: ±13) ΔO: 10 (s: ±5) ΔD: 6 (s: ±1)
25: Δra: 0.160 (s: ±0.002) Δh: 0.167 (s: ±0.008) ΔR: 51 (s: ±8) ΔO: 15 (s: ±5) ΔD: 23 (s: ±9)
26: Δra: 0.168 (s: ±0.003) Δh: 0.164 (s: ±0.009) ΔR: 51 (s: ±3) ΔO: 8 (s: ±4) ΔD: 22 (s: ±3)
27: Δra: 0.161 (s: ±0.002) Δh: 0.172 (s: ±0.01) ΔR: 45 (s: ±27) ΔO: 9 (s: ±4) ΔD: 20 (s: ±8)
28: Δra: 0.157 (s: ±0.007) Δh: 0.161 (s: ±0.005) ΔR: 50 (s: ±28) ΔO: 14 (s: ±4) ΔD: 18 (s: ±6)
29: Δra: 0.16 (s: ±0.003) Δh: 0.177 (s: ±0.008) ΔR: 65 (s: ±27) ΔO: 12 (s: ±7) ΔD: 23 (s: ±8)
30: Δra: 0.158 (s: ±0.004) Δh: 0.166 (s: ±0.004) ΔR: 53 (s: ±3) ΔO: 18 (s: ±8) ΔD: 16 (s: ±7)
31: Δra: 0.163 (s: ±0.001) Δh: 0.161 (s: ±0.006) ΔR: 57 (s: ±15) ΔO: 15 (s: ±4) ΔD: 17 (s: ±7)
32: Δra: 0.165 (s: ±0.004) Δh: 0.17 (s: ±0.01) ΔR: 46 (s: ±25) ΔO: 13 (s: ±5) ΔD: 21 (s: ±5)
ap,a = Schnitttiefe, außen
fa = Vorschub, außen
vc = Schnittgeschwindigkeit
Δra: Relative Maßänderung Radius außen [%] (Δra=(r1-r0)/r0. r0 nach Fertigung, R1 nach Wärmebehandlung)
Δh: Höhenänderung [%]
ΔR: Rundheitsänderung außen [µm]
ΔO: Ovalitätsänderung außen (FFT 2. Ordnung) [µm]
ΔD: Dreieckigkeitsänderung außen (FFT 3.Ordnung)
s: Standardabweichung
¹Umformgrad beimStauchen
²Abkühlung nach Walzen
³Kühlschmierstoff: (1=ein, 0=aus)
* Herstelldaten, die für alle Bauteile gleich waren.
** Zerspanparameter gelten für Innenlängsdrehen / Außenlängsdrehen im letzten Schnitt
Ersteller: Dieter Klein
Date: 28.03.13
Dateiname: Ring1_Poster_FINAL.ppt
Veröffentlichung, Ringnummer, Erklärung
Zuordnung der Ergebnisdaten (1-32) Zu den Ringnummern
1: 784 788 802 804 806
2: 703 705 710 751 728
3: 893 898 905 913 923
4: 853 855 863 868 877
5: 768 778 785 799 815
6: 713 723 730 750 759
7: 907 925 939 941 942
8: 835 837 874 880 881
9: 764 767 794 809 819
10: 701 712 725 726 744
11: 894 900 919 937 940
12: 831 861 864 865 875
13: 786 790 792 811 820
14: 708 732 738 756 761
15: 885 892 897 904 935
16: 845 847 849 856 870
17: 774 783 800
18: 731 739 749
19: 910 915 916
20: 833 857 859
21: 763 766 776
22: 719 720 721
23: 912 918 922
24: 828 829 838
25: 770 777 779
26: 704 707 716
27: 886 891 903
28: 825 834 839
29: 775 781 796
30: 711 715 722
31: 889 895 899
32: 841 844 852
Experiment 1 entlang einer gesamten Prozesskette, veröffentlicht in [Clausen et al. 2004]
Experiment 2 entlang einer gesamten Prozesskette veröffentlicht in [Clausen et al. 2006]

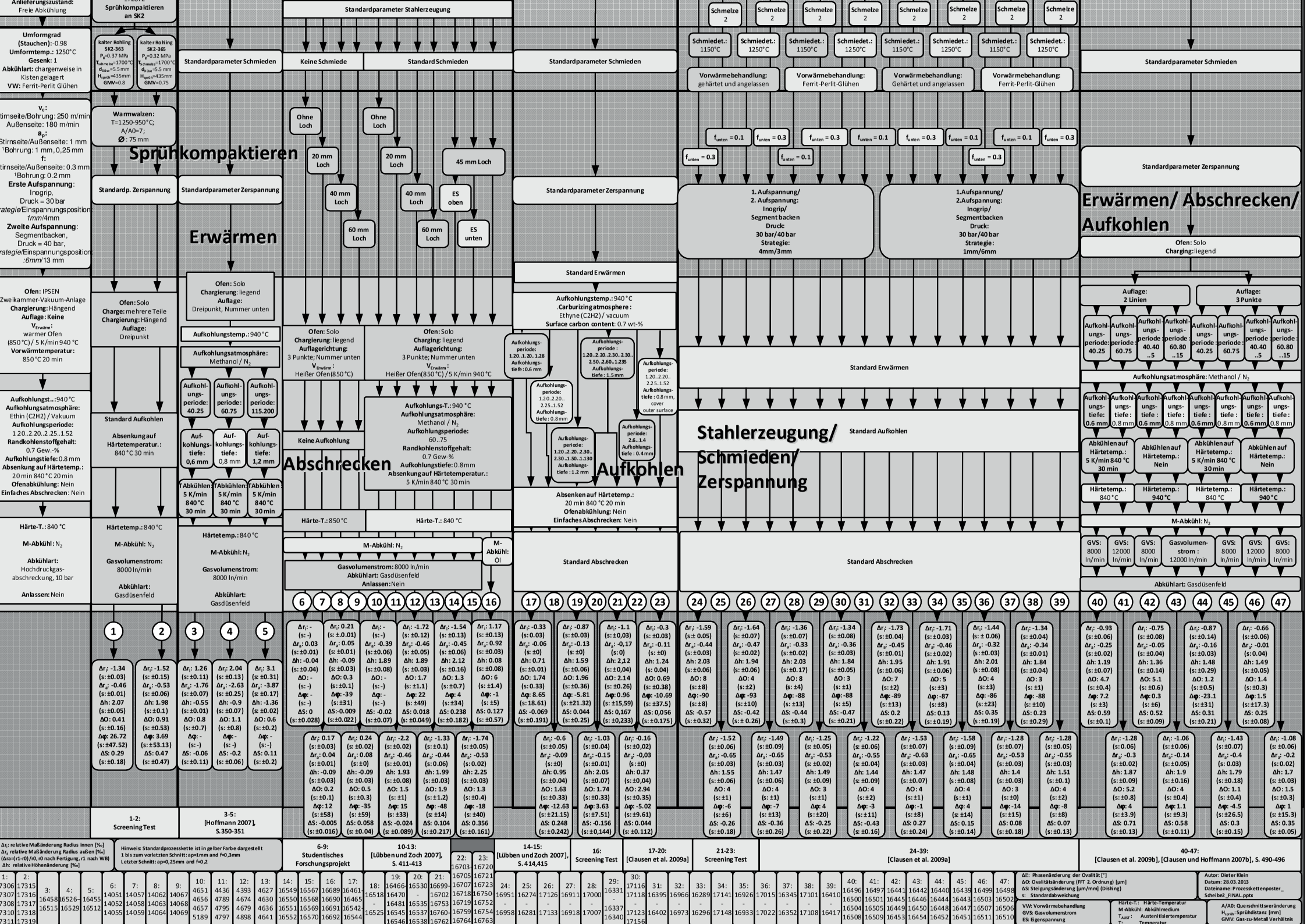

Herstelldaten
Maß- und Formänderungen
radnr., Erläuterung
Wärmebehandlungsdaten
Standardparameter Stahlerzeugung
Standardparameter Schmieden
Standardparameter Zerspanung
Standardparameter Erwärmen
Standardparameter Aufkohlen
Standardparameter Abschrecken
Gussformat: vierkant
Halbzeugformat: rund
Durchmesser: Ø 73 mm
Anlieferungszustand: Abgekühlt von der Walzhitze
Schmiede-Umformgrad (Stauchen): -0.98
Umformtemp.: 1250 °C
Scheibenhöhe: 22,4 mm
Gesenk: 1 (Unsymmetrisch)
Abkühlart: : Luft-Schüttgut
Vorwärmebehandlung: FP-Glühen
Grundkörper:
v_c: Stirnseite/Bohrung: 250 m/min
Außenseite: 180 m/min
a_p: Stirnseite/Außenseite: 1 mm
¹Bohrung: 1 mm, 0,25 mm
f: Stirnseite/Außenseite: 0.3 mm
¹Bohrung: 0.2 mm
1. Aufspannung: Inogrip, Druck = 30 bar
Zerspanstrategie: 1mm/4mm
2. Aufspannung : Segmentbacken, Druck = 40 bar,
Zerspanstrategie: 6mm/13 mm
Zahnrad:
v_c: 300 m/min
f: 1 mm
Schrägungswinkel: 23°
Ofen: IPSEN
Zweikammer-Vakuum-Anlage
Chargierung: Hängend
Auflage: Keine
v_Förderer: Warmer Ofen (650 °C) / 5 K/min 940 °C
Vorwärmtemperatur: 650 °C 20 min
Aufkohlung-T.: 940 °C
Aufkohlungsatmosphäre: Ethin (C2H2) / Vakuum
Aufkohlungsdauer: 1.20..1.20..1.22
Randkohlenstoffgehalt: 0,7 Gew.-%
Aufkohlungstiefe: 0.6 mm
Absenkung auf Härtetemperatur: 20 min 840 °C 20 min
Ofenabkühlung: nein
Einfachhärtung: nein
Härte-T.: 840 °C
Abkühlmedium: N2
Abkühlart: Hochdruck-gasabschreckung, 10 bar
Anlassen: nein
1-18: [Kohlhoff et al. 2011]
19-42: [Steinbacher et al. 2011]
ΔS: Steigungsänderung (Dishing) [µm/mm]
Δ B: Änderung Bohrungs-Durchmesser [‰]
Δf_pi: Teilungsabweichung links [µm] (1.Ordnung)
Δf_pr: Teilungsabweichung rechts [µm] (1.Ordnung)
Δf_hαi: Profil-Winkelabweichung links µm
Δ f_hαr: Profil-Winkelabweichung rechts µm
Δf_hβi: Flankenlinienabweichung links µm
Δ f_hβr: Flankenlinienabweichung rechts µm
*Herstelldaten für alle Versuche identisch
VWT: Vorwärmtemperatur
Ersteller: Dieter Klein
Stand: 25.10.2012
Dateiname: Prozesskettenposter_Zahnrad_FINAL.pptx


Durchmesser: Ø 60 mm
Anlieferungs-zustand: GKZ
Standardp. Schmieden
Standardparameter Schmieden
Standardparameter Schmieden
Standardparameter Schmieden
Standardparameter Schmieden
Standardp. Zerspannung
Standardparameter Zerspannung
Standardparameter Zerspannung
Standardparameter Zerspannung
Standardp. Erwärmen
Standardparameter Erwärmen
Standardp. Abschrecken
h1 = 26 mm
h2 = 0.62 mm
b1 = 3.5 mm
b2 = 7.5 mm
d1 = 148 mm
d2 = 133 mm
Izz = 468 mm4
Iyz = 610 mm4
α = 9°
h1 = 26 mm
h2 = 4 mm
b1 = 2.5 mm
b2 = 7.0 mm
d1 = 147 mm
d2 = 133 mm
Izz = 416 mm4
Iyz = 634 mm4
α = 12.3°
h1 = 26 mm
h2 = 5.4 mm
b1 = 3.5 mm
b2 = 7.5 mm
d1 = 148 mm
d2 = 133 mm
Izz = 572 mm4
Iyz = 680 mm4
α = 11°
h1 = 26 mm
h2 = 4.9 mm
b1 = 3 mm
b2 = 7.0 mm
d1 = 147 mm
d2 = 133 mm
Izz = 448 mm4
Iyz = 611 mm4
α = 11°
h1 = 26 mm
h2 = 0.62 mm
b1 = 3.5 mm
b2 = 7.5 mm
d1 = 148 mm
d2 = 133 mm
Izz = 468 mm4
Iyz = 610 mm4
α = 9°
h1 = 26 mm
h2 = 0.62 mm
b1 = 3.5 mm
b2 = 7.5 mm
d1 = 148 mm
d2 = 133 mm
Izz = 468 mm4
Iyz = 610 mm4
α = 9°
vc = 240 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.3 mm
KSS = 0
vc = 240 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vc = 600 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.3 mm
KSS = 0
vc = 600 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vc = 240 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.4 mm
KSS = 1
vc = 480 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vc = 240 m/min
ap = 1x1 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vc = 240 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.1 mm
KSS = 0
vc = 240 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.1 mm
KSS = 1
vc = 600 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.1 mm
KSS = 0
vc = 600 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.1 mm
KSS = 1
vc = 240 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.2 mm
KSS = 1
vc = 350 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vc = 240 m/min
ap = 3x0.33 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vc = 240 m/min
ap = 2x0.5 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vc = 240 m/min
ap = 1 mm
f = 0.3 mm
KSS = 1
vorverformt oval
VW Salzbad (unten)
VW Salt bath (oval)
VW Salzbad (oben)
Ofen: IPSEN (rot)
Ofen: Solo
Ofen: Solo
Auflage: Linie
Auflage: Stern
Auflagerichtung: dicke Seite unten
Auflagerichtung: dünne Seite unten
Auflagerichtung: dicke Seite unten
Auflage: Stern
Auflagerichtung: dicke Seite unten
Chargierung: liegend
Auflage: Linie
Auflage: Stern
Auflagerichtung: dicke Seite unten
Chargierung: liegend
vErwärm: warmer Ofen
Zerspanung
Auflage: Stern
Auflagerichtung: dicke Seite unten
Chargierung: liegend
vErwärm: 5K/min
T: 700 °C 120 min
Erwärmen
vErwärm: Kalter Ofen
vErwärm: Warmer Ofen
Abschrecken
Erwärmen/ Abschrecken
TAUST: 850 °C 25 min
TAUST: 850 °C 25 min
T: 300 °C 5 min
T: 400 °C 5 min
T: 500 °C 5 min
T: 600 °C 5 min
T: 700 °C 5 min
TAUST: 850 °C 25 min
TAUST: 900 °C 3 min
TAUST: 850 °C 25 min
TAUST: 900 °C 3 min
TAUST: 850 °C 25 min
TAUST: 900 °C 3 min
Härte-T.: 850 °C
T.: 300 °C
T.: 400 °C
T.: 500 °C
T.: 600 °C
T.: 700 °C
Härte-T.: 850 °C
Härte-T.: 900 °C
Härte-T.: 850 °C
Härte-T.: 900 °C
Härte-T.: 850 °C
Härte-T.: 900 °C
M-Abkühl: N2
M-Abkühl: Vakuum
Abkühlart: Ofenabkühlung
M-Abkühl: Öl
M-Abkühl: Salz
M-Abkühl: N2
M-Abkühl: N2
Gas-volumen-strom: 5330 ln/min
Gas-volumen-strom: 8000 ln/min
Gasvolumenstrom: 1600 ln/min
U-Wälz: ja
U-Wälz: nein
Gasvolumenstrom: 5330 ln/min
Gasvolumen-strom: 5330 ln/min
Gasvolumen-strom: 8000 ln/min
Gasvolumen-strom: 5330 ln/min
Abkühlart: Gasdüsenfeld
Abkühlart: Ölbad
Abkühlart: Salzbad
Abkühlart: Gasdüsenfeld
Abkühlart: Gasdüsenfeld
Stahlerzeugung
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
Δra: 0.17 (s: ±0.007) Δh: 0.202 (s: ±0.03) ΔK: -0.18 (s: ±0.01) ΔR: 40 (s: ±23) ΔO: 15 (s: ±10)
Δra: 0.002 (s: ±0.001) Δh: 0.01 (s: ±0.016) ΔK: 0.007 (s: ±0.002) ΔO: 5 (s: ±2)
Δra: 0.002 (s: ±0.001) Δh: 0.007 (s: ±0.015) ΔK: 0.007 (s: ±0.003) ΔO: 4 (s: ±2)
Δra: 0.001 (s: ±0.001) Δh: 0.017 (s: ±0.019) ΔK: 0.007 (s: ±0.001) ΔO: 4 (s: ±1)
Δra: 0.002 (s: ±0.001) Δh: 0.015 (s: ±0.019) ΔK: 0.005 (s: ±0.001) ΔO: 4 (s: ±3)
Δra: 0.001 (s: ±0.001) Δh: 0.01 (s: ±0.021) ΔK: 0.009 (s: ±0.002) ΔO: 5 (s: ±1)
Δra: 0.001 (s: ±0.002) Δh: 0.006 (s: ±0.016) ΔK: 0.009 (s: ±0.002) ΔO: 4 (s: ±2)
Δra: 0.002 (s: ±0.001) Δh: 0.007 (s: ±0.016) ΔK: 0.012 (s: ±0.001) ΔO: 6 (s: ±3)
Δra: 0 (s: ±0.001) Δh: 0.012 (s: ±0.014) ΔK: 0.011 (s: ±0.001) ΔO: 3 (s: ±2)
Δra: 0.002 (s: ±0.001) Δh: 0.013 (s: ±0.016) ΔK: 0.009 (s: ±0.002) ΔO: 3 (s: ±1)
Δra: 0.002 (s: ±0.001) Δh: 0.017 (s: ±0.014) ΔK: 0.011 (s: ±0.003) ΔO: 4 (s: ±2)
Δra: 0.002 (s: ±0.001) Δh: 0.023 (s: ±0.019) ΔK: 0.006 (s: ±0.001) ΔO: 4 (s: ±3)
Δra: 0.003 (s: ±0.001) Δh: 0.021 (s: ±0.016) ΔK: 0.009 (s: ±0.001) ΔO: 6 (s: ±3)
Δra: -0.001 (s: ±0.001) Δh: 0.02 (s: ±0.018) ΔK: -0.005 (s: ±0.001) ΔO: 18 (s: ±13)
ra: 112 (s: ±16) h: 76 (s: ±3) K: 0.093 (s: ±0.003) O: 17 (s: ±4)
ri: -290 (s: ±1) h: 76 (s: ±3) K: 8.372 (s: ±0.005) O: 5 (s: ±3)
Δra: 0.001 (s: ±0.001) Δh: 0.018 (s: ±0.015) ΔK: 0.006 (s: ±0.001) ΔO: 4 (s: ±1)
Δra: 0 (s: ±0.002) Δh: 0.006 (s: ±0.014) ΔK: 0.007 (s: ±0.002) ΔO: 4 (s: ±1)
Δra: 0.171 (s: ±0.006) Δh: 0.218 (s: ±0.007) ΔK:0.186 (s: ±0.026) ΔR: 25 (s: ±28) ΔO: 15(s: ±13)
Δra: 0.001 (s: ±0.002) Δh: 0 (s: ±0.002) ΔK:0 (s: ±0) ΔR: 4 (s: ±3) ΔO: 2 (s: ±1)
Δra: 0.004 (s: ±0.001) Δh: -0.001 (s: ±0.002) ΔK:0.003 (s: ±0.001) ΔR: 13 (s: ±2) ΔO: 6 (s: ±2)
Δra: 0.171 (s: ±0.004) Δh: 0.206 (s: ±0.017) ΔK:-0.150 (s: ±0.004) ΔR: 25 (s: ±41) ΔO: 26 (s: ±13)
Δra: 0.001 (s: ±0.001) Δh: -0.003 (s: ±0.004) ΔK:0.001 (s: ±0.002) ΔR: 2 (s: ±2) ΔO: 2 (s: ±1)
Δra: -0.001 (s: ±0.001) Δh: 0.001 (s: ±0) ΔK:-0.002 (s: ±0.001) ΔR: 5 (s: ±15) ΔO: 5 (s: ±1)
Δra: 0.003 (s: ±0.001) Δh: -0.004 (s: ±0.003) ΔK: 0.002 (s: ±0.002) ΔR: 3 (s: ±2) ΔO: 3 (s: ±1)
Δra: 0.080 (s: ±0.028) Δh: 0.242 (s: ±0.016) ΔK: 0.115 (s: ±0.135) ΔO: 65 (s: ± 37)
Δra: 0.188 (s: ±0.014) Δh: 0.166 (s: ±0.011) ΔK:-0.073 (s: ±0.047) ΔO: 38 (s: ± 17)
Δra: 0.145 (s: ±0.001) Δh: 0.181 (s: ±0.008) ΔK: 0.156 (s: ±0.007) ΔO: 12 (s: ±2)
Δra: 0.139 (s: ±0.002) Δh: 0.175 (s: ±0.008) ΔK: 0.182 (s: ±0.003) ΔO: 22 (s: ±8)
Δra: 0.162 (s: ±0.004) Δh: 0.215 (s: ±0.004) ΔK: -0.262 (s: ±0.006) ΔO: 21 (s: ± 10)
Δra: 0.173 (s: ±0.003) Δh: 0.215 (s: ±0.004) ΔK: -0.213 (s: ±0.015) ΔO: 19 (s: ± 12)
Δra: 0.146 (s: ±0.014) Δh: 0.201 (s: ±0.021) ΔK: 0.073 (s: ±0.054) ΔO: 28 (s: ± 20)
Δra: 0.169 (s: ±0.002) Δh: 0.208 (s: ±0) ΔK: 0.142 (s: ±0.002) ΔO: 36 (s: ± 8)
Δra: 0.141 (s: ±0.009) Δh: 0.160 (s: ±0.008) ΔK: 0.115 (s: ±0.008) ΔO: 12 (s: ±11)
Δra: 0.155 (s: ±0.003) Δh: 0.219 (s: ±0.005) ΔK: -0.330 (s: ±0.017) ΔO: 22 (s: ± 15)
Δra: 0.166 (s: ±0.003) Δh: 0.212 (s: ±0.004) ΔK: -0.222 (s: ±0.010) ΔO: 15 (s: ± 6)
Δra:0.169 (s:±0.002) Δh:0.207 (s:±0.011) ΔK:-0.181 (s:±0.004) ΔR:24 (s:±31) ΔO:25 (s:±15)
Δra:0.166 (s:±0.001) Δh:0.210 (s:±0.007) ΔK:-0.213 (s:±0.004) ΔR:14 (s:±3) ΔO:13 (s: ±7)
Δra:0.172 (s:±0.001) Δh:0.213 (s:±0.006) ΔK:-0.176 (s:±0.006) ΔR:47 (s:±27) ΔO:24 (s: ±9)
Δra:0.182 (s:±0.003) Δh:0.203 (s:±0.018) ΔK:-0.184 (s:±0.004) ΔR:12 (s:±13) ΔO:10 (s:±5)
Δra:0.172 (s:±0.007) Δh:0.210 (s:±0.016) ΔK:-0.183 (s:±0.007) ΔR:23 (s:±7) ΔO:11 (s:±5)
Δra:0.177 (s:±0.003) Δh:0.218 (s:±0.017) ΔK:-0.223 (s:±0.004) ΔR:21 (s:±27) ΔO:21 (s:±5)
202: Stichversuch
203-217: Stichversuch - Mündliche Aussage Herr Sölter vom 16.12.10: Fertigungseigenspannungen haben keinen technologisch relevanten Einfluss.
218-224: [Hoffmann 2007]
225-227: Lübben und Zoch 2007], S. 415-421
228-231 Stichversuch
232-235 [Frerichs et al. 2009]
236-243 [Lübben und Zoch 2007]
201: 12374-12388, 12338, 12346, 12354, 12362, 12370
202: 12129, -12148
203: 12001, 12003, 12004, 12005, 12006, 12007
204: 12008, 12009, 12010, 12011, 12012, 12013
205: 12014, 12015, 12016, 12017, 12018, 12019
206: 12020, 12021, 12022, 12023, 12024, 12025
207: 12026, 12027, 12028, 12029, 12030, 12031
208: 12032, 12033, 12034, 12035, 12036, 12037
209: 12038, 12039, 12040, 12041, 12042, 12043
210: 12044, 12045, 12046, 12047, 12048, 12049
211: 12050, 12051, 12052, 12053, 12054, 12055
212: 12056, 12057, 12058, 12059, 12060, 12061
213: 12062, 12063, 12064, 12065, 12066, 12067
214: 12068, 12069, 12070, 12071, 12072, 12073
215: 12082, 12083, 12084, 12085, 12086, 12087
216: 12088, 12089, 12090, 12091, 12092, 12093
217: 12076, 12077, 12078, 12079, 12080, 12081
218: 12389, 12390, 12391, 12392, 12393
219: 12394, 12395, 12396, 12397, 12398
220: 12170, 12171, 12174
221: 12159, 12160, 12169
222: 12157, 12158, 12168
223: 12156, 12163, 12167
224: 12155, 12162, 12166
225: 12244, 12243, 12172, 12242, 12241
226: 12323, 12322, 12321, 12320, 12319
227: 12314, 12315, 12316, 12317, 12318
228: 12216, 12217, 12219, 12220
229: 12226, 12227, 12228, 12229, 12230
230: 12236, 12237, 12239, 12240
231: 12231, 12232, 12233, 12235
232: -, 14301, -, 14310
233: -, 14311, -, 14320
234: -, 14321, -, 14330
235: -, 14331, -, 14340
236: 12334, 12342, 12350, 12358, 12366
237: 12335, 12343, 12351, 12359, 12367
238: 12344, 12352, 12360, 12368, 12404
239: 12337, 12345, 12353, 12361, 12369
240: 12338, 12346, 12354, 12362, 12370
241: 12339, 12347, 12355, 12363, 12371
Versuch 216: Abweichung: ISTWERT – SOLLWERT
Istwert gemessen nach WB (Wärmebehandlung)
Sollwert laut Konstruktionszeichnung
Absolutwert laut Konstruktionszeichnung: Konuswinkel außen 0°, innen 9° Ovalität nach Vorgabe 0µm
Absolutwerte gemessen nach WB
Absolutwert (gemmesen nach Fertigung): ra: Maßabweichung Radius außen [µm] ri: Maßabweichung Radius innen [µm] h: Höhenabweichung [µm]
Konuswinkel und Ovalität sind Absolutwerte K: Konuswinkel [°] O: Ovalität (FFT 2. Ordnung) [µm] Izz , Iyz: Flächenträgheitsmomente
Δra: relative Maßänderung Radius außen [%] (Δra=(ri-r0)/r0, r0 nach Fertigung, ri nach WB) Δh: relative Höhenänderung [%]
ΔK: Konuswinkeländerung [°] ΔR: Rundheitsänderung [µm] ΔO: Ovalitätsänderung (FFT 2. Ordnung) [µm] s: Standardabweichung
GKZ: Weichglühen VW: Vorwärmebehandlung KSS: Kühlschmierstoff (1 = eingeschaltet, 0 = ausgeschaltet)
Härte-T.: Härte-Temperatur TAUST: Austenitisiertemperatur T: Temperatur
*) Variation beim letzten Schnitt **) dieser eine Schnitt mit diesen Parametern ***) alle beide Schnitte mit diesen Parametern ****) alle drei Schnitte mit diesen Parametern
Hinweis: Standardprozesskette ist in gelber Farbe dargestellt
Ersteller: Dieter Klein
Stand: 28.03.2013
Datei: Ring2_Poster_Deutsch.ppt



Stahlerzeugung
Zerspanung
Erwärmen
Abschrecken
Aufkohlung
VB (Vorwärmebehandlung): WW (Aus der Walzwärme abgekühlt)
Durchmesser: Ø 25 mm Entnahmeort: zentrisch
Durchmesser: 73 Entnahmeort: exzentrisch
Schmelzennr: 156944 Spray forming on SK1
Schmelzennr: 172872 Spray forming on SK2
Anlieferungszustand: FP
Standard A4
Standard A5
Standard A6
A4: Variation 1 Vc = 70 m/min ap = 0,1 mm f = 0,165 mm
A4: Variation 2 Vc = 80 m/min ap = 0,1 mm f = 0,165 mm
A4: Variation 3 Vc = 90 m/min ap = 0,1 mm f = 0,165 mm
A4: Variation 4 Vc = 100 m/min ap = 0,1 mm f = 0,165 mm
A4: Variation 5 Vc = 100 m/min ap = 0,2 mm f = 0,165 mm
A4: Variation 6 Vc = 100 m/min ap = 0,4 mm f = 0,165 mm
A4: Variation 7 Vc = 100 m/min ap = 0,8 mm f = 0,165 mm
A4: Variation 8 Vc = 100 m/min ap = 0,1 mm f = 0,1 mm
A4: Variation 9 Vc = 100 m/min ap = 0,1 mm f = 0,125 mm
A4: Variation 10 Vc = 100 m/min ap = 0,1 mm f = 0,15 mm
Hot rolling: T=1250-920 °C; A/A0=9; Ø: 33 mm
Hot forging: T=1250-950 °C; A/A0=50-65; Ø:25 mm
Ofen: Solo
Chargierung: Charge
Lagerung: Stehend
V-Erwärm: Warmer Ofen
M-Abkühl: Ofen Atmosphäre
V-Abkühl: Ofen Abkühlung
401 = 447 [Lübben und Mayr 2003b], S. 274-278
402-406: [Prinz et al. 2005]
407-412: [Cui et al. 2006a], [Cui et al. 2006b]
413-432: Stichversuch - Mündliche Aussage Herr Sölter vom 16.12.10: Ergebnis - Eigenspannungen sind nicht signifikant.
433-440: [Surm et al. 2006], S. 1-26
441, 442, 445,446 Stichversuch
443, 444, 447, 448: [Lübben und Mayr 2003b], S. 274-278
449, 450: [Frerichs et al. 2005]
451-454 [Surm et al. 2006], S. 1-26
455,456: [Frerichs et al. 2005]
457-460: [Hunkel et al. 2007a], [Hunkel et al. 2007b], [Hunkel et al. 2008a], [Hunkel 2008b], [Hunkel 2011],
VB: Vorwärmebehandlung
BG: BG-geglüht
VV: Vorvergütet
WW: Aus der Walzwärme abgekühlt
V-Erwärm: Erwärmgeschwindigkeit
Härte.-T.: Härte-Temperatur
M-Abkühl: Abkühlmedium
T_AUST: Austenitisiertemperatur
V-Abkühl: Abkühlgeschwindigkeit
ΔK: Krümmungsänderung
ΔL: Längenänderung
RT: Raumtemperatur
TSP: Spannungsarmgeglüht
s: Standardabweichung
Hinweise: 1) Die Ergebnisse sind in Mikrometer (µm) und die Standardprozesskette ist in gelber Farbe dargestellt
2) Bei A5 sind auch Ergebnisse bezüglich der Durchmesseränderung vorhanden.
ΔL: relative Längenänderung [‰]
(ΔL=(L1-L0)/L0, L0 nach Fertigung, L1 nach WB), L0 ~ 200 mm
Ersteller: Dieter Klein
Stand: 28.03.2013
Datei: Welle1_Poster_FINAL.pptx


Quadrat
er: ∅25
eort :
ch
zustand:
t von
hitze
spanung
v_c = 220 m/min
a_p = 1.5 mm
f = 0.2 mm
r = 1 mm
v_c = 220 m/min
a_p = 1.5 mm
f = 0.1 mm
r = 1 mm
v_c = 220 m/min
a_p = 0.5 mm
f = 0.2 mm
r = 2 mm
v_c = 220 m/min
a_p = 0.5 mm
f = 0.2 mm
r = 1 mm
v_c = 220 m/min
a_p = 0.5 mm
f = 0.1 mm
r = 1 mm
v_c = 220 m/min
a_p = 0.5 mm
f = 0.2 mm
r = 3 mm
Standardparameter A4
Standardparameter A4
Ø14 wurde 1 mm axial gegen Ø20 versetzt
Ø14 wurde 2 mm axial gege Ø20 versetzt
Erwärmen
Ofen: IPSEN (rot)
Charge: Mehrere Teile
Lagerung: stehend
Ausrichtung : ø20 mm oben
V-Erwärm: warmer Ofen
T: 5 K/min 650 °C 120 min
Ofen: Solo
Charge: Einzelteil
Lagerung: stehend
Lagerung: hängend
Ausrichtung : ø14 mm oben
Ausrichtung : ø20 mm oben
Ausrichtung : ø14 mm oben
Ausrichtung : ø20 mm oben
V-Erwärm: kalter Ofen
T_{AUST} : 940 °C 135 min
T_{AUST} : 970 °C 75 min
T_{AUST} : 940 °C 135 min
T_{AUST} : 970 °C 75 min
T_{AUST} : 940 °C 135 min
T_{AUST} : 970 °C 75 min
T_{AUST} : 940 °C 135 min
T_{AUST} : 970 °C 75 min
Ofen: Rohrofen
Charge: Einzelteil
Ofen: Solo
Charge: 5
Charge: 4
Lagerung: hängend
Ausrichtung: ø20 mm oben
V-Erwärm: warmer Ofen
TAUST: Blind
TAUST: Fünftel in Solo
TAUST: Drittel in Solo
TAUST: Halb in Solo
TAUST: 940 °C 135 min Endogas (Ziel Rand 0.7 AT* 0.8)
TAUST: Blind
Abschrecken
M-Abkühl: Ofenatmosphäre
Abkühlart: Ofenabkühlung
M-Abkühl: N_2
Abkühlart: Ofenabkühlung
Härte-T.: 880 °C
M-Abkühl: N_2
Härte-T.: 840 °C
M-Abkühl: N_2
Härte-T.: 880 °C
$v_{Abkühl}$: D20:150 m/s D14:150 m/s
$v_{Abkühl}$: D20:150 m/s D14:85 m/s
$v_{Abkühl}$: D20:150 m/s D14:284 m/s
$v_{Abkühl}$: D20:150 m/s D14:150 m/s
$v_{Abkühl}$: D20:150 m/s D14:150 m/s
$v_{Abkühl}$: D20:150 m/s D14:284 m/s
$v_{Abkühl}$: D20:150 m/s D14:85 m/s
M-Abkühl Öl
M-Abkühl: Öl
Abkühlart: symmetrisch
Abkühlart: symmetrisch
Ölzirkulation: Ja
601 602 603 604 605 606
607 608 609 610 611 612 613 614
615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627
ΔK20: 2.29 (s: ±1.18) ΔK14: 4.34 (s: ±2.1) ΔL20: -0.052 (s: ±0.01) ΔL14: -0.067 (s: ±0.017)
ΔK20: 1.34 (s: ±0.96) ΔK14: 3.11 (s: ±1.49) ΔL20: -0.056 (s: ±0.009) ΔL14: -0.082 (s: ±0.021)
ΔK20: 1.94 (s: ±0.6) ΔK14: 2.69 (s: ±1.49) ΔL20: -0.158 (s: ±0.011) ΔL14: -0.175 (s: ± 0.035)
ΔK20: 1.61 (s: ±0.37) ΔK14: 2.68 (s: ± 0.71) ΔL20: -0.156 (s: ± 0.015) ΔL14: -0.17 (s: ±0.025)
ΔK20: 1.22 (s: ±1.07) ΔK14: 1.61 (s: ±0.78) ΔL20: - (s: -) ΔL14: - (s: -)
ΔK20: 1.81 (s: ±0.83) ΔK14: 3.82 (s: ±2.55) ΔL20: - (s: -) ΔL14: - (s: -)
ΔK20: 4.3 (s: ±2.1) ΔK14: 11.5 (s: ±3) ΔL20: 0.22 (s: ±0.04) ΔL14: 0.25 (s: ±0.03)
ΔK20: 3.5 (s: ±1) ΔK14: 4.5 (s: ±2.4) ΔL20: 0.33 (s: ±0.03) ΔL14: 0.49 (s: ±0.03)
ΔK20: 7.7 (s: ±3.8) ΔK14: 11.3 (s: ±4.2) ΔL20: 0.25 (s: ±0.05) ΔL14: 0.35 (s: ±0.05)
ΔK20: 5.6 (s: ±0.9) ΔK14: 8.1 (s: ±2.9) ΔL20: 0.37 (s: ±0.01) ΔL14: 0.48 (s: ±0.04)
ΔK20: 7.5 (s: ±1.8) ΔK14: 14.7 (s: ±4.4) ΔL20: 0.31 (s: ±0.03) ΔL14: 0.37 (s: ±0.1)
ΔK20: 6.3 (s: ±1.9) ΔK14: 8.1 (s: ±3.6) ΔL20: 0.34 (s: ±0.03) ΔL14: 0.51 (s: ±0.06)
ΔK20: 7.1 (s: ±1.7) ΔK14: 10.2 (s: ±5) ΔL20: 0.26 (s: ±0.06) ΔL14: 0.37 (s: ±0.09)
ΔK20: 4.8 (s: ±1) ΔK14: 8.5 (s: ±4.7) ΔL20: 0.33 (s: ±0.03) ΔL14: 0.52 (s: ±0.06)
ΔK20: 8.7 (s: ±0.6) ΔK14: 5.3 (s: ±2.1) ΔL20: 0.3 (s: ±0.01) ΔL14: 0.44 (s: ±0.01)
ΔK20: 7.3 (s: ±1.1) ΔK14: 4.2 (s: ±2.2) ΔL20: 0.27 (s: ±0.01) ΔL14: 0.18 (s: ±0.02)
ΔK20: 6.8 (s: ±1.6) ΔK14: 5.0 (s: ±2.6) ΔL20: 0.28 (s: ±0.02) ΔL14: 0.52 (s: ±0.01)
ΔK20: 15.5 (s: ±2.3) ΔK14: 22.5 (s: ±5.8) ΔL20: 0.51 (s: ±0.03) ΔL14: 0.72 (s: ±0.02)
ΔK20: 76 (s: ±2.8) ΔK14:118.8 (s: ±14) ΔL20: 0.43 (s: ±0.04) ΔL14: 0.46 (s: ±0.04)
ΔK20: 104 (s: ±6.4) ΔK14:200.7 (s: ±16.3) ΔL20: 0.31 (s: ±0.03) ΔL14: 0.19 (s: ±0.09)
ΔK20: 5.6 (s: ±0.9) ΔK14: 11.3 (s: ±3.6) ΔL20: 0.03 (s: ±0.02) ΔL14: -0.16 (s: ±0.03)
ΔK20: 3.6 (s: ±1.2) ΔK14: 8 (s: ±0.9) ΔL20: 0.04 (s: ±0.01) ΔL14: 0.11 (s: ±0.01)
ΔK20: 5.4 (s: ±1.4) ΔK14: 5.0 (s: ±0.7) ΔL20: -0.05 (s: ±0.01) ΔL14: -0.04 (s: ±0.02)
ΔK20: 14 (s: ±6.1) ΔK14: 21.5 (s: ±8.7) ΔL20: 0.82 (s: ±0.04) ΔL14: 0.64 (s: ±0.04)
ΔK20: 9.9 (s: ±2.4) ΔK14: 10.3 (s: ±6.2) ΔL20: 1.17 (s: ±0.03) ΔL14: 1.37 (s: ±0.02)
ΔK20: 3.7 (s: ±1.7) ΔK14: 7 (s: ±1.0) ΔL20: 0.40 (s: ±0.02) ΔL14: 0.49 (s: ±0.03)
606: versuch
607-614: [Hoffmann 2007], S. 349, Abb. 29
615-628: [Lübben und Zoch 2007] S. 389-411
603: 7223- 7227
604: 7228 7229 7233- 7235
605: 7260- 7262 7264
606: 7245- 7249
607: 6654- 6656 6092 6093
608: 6504- 6506 6447 6448
609: 6579- 6581 6669 6670
610: 6692- 6694 6519 6520
611: 6507- 6509 6449 6450
612: 6657- 6659 6094 6095
613: 6695- 6697 6458 6459
614: 6582- 6584 6103 6104
615: 6287 6289 6291 6288 6292
616: 6181 6182 6183 6184 6185
617: 6186 6187 6189 6190 6191
618: 6498 6499 6500 6501 6502
619: 6490 6491 6492 6494
620: 6338 6339 6485 6486 6489
621: 6283 6284 6285 6286 6297
622: 6195 6293 6294 6295 6296
623: 6192 6240 6241 6242
624: 6523 6524 6225 6226 6527
625: 6528 6529 6233 6234
626: 14022 14023 14024 14025 14021
627: 14026 14027 14028 14029
628: 14030 14031 14032 14033
Krümmungsänderung [µm]
Längenänderung ø20 mm
Längenänderung ø14 mm
ndardparameterabweichung
ΔL1420: Längenänderung [‰] (ΔL=(L1-L0)/L0, L0 nach Fertigung, L1 nach WB), L0: 100 mm
*AT: Aufkohlungstiefe
Hinweis: Standardparameterprozesskette ist in gelber Farbe dargestellt
Ersteller: Dieter Klein
Datum: 28.03.13
Datei : Welle2_Poster_Deutsch.ppt


Anlieferungszustand: Freie Abkühlung
Umformgrad (Stauchen): -0.98
Umformtemp.: 1250°C
Gesenk: 1
Abkühlart: chargenweise in Kisten gelagert
VW: Ferrit-Perlit Glühen
Sprühkompaktieren an SK2
kalter Rohling SK2-363
kalter Rohling SK2-365
Standardparameter Schmieden
Standardparameter Stahlerzeugung
Keine Schmiede
Standard Schmieden
Standardparameter Schmieden
Schmelze 2
Schmiedet.: 1150°C
Schmiedet.: 1250°C
Vorwärmebehandlung: gehärtet und angelassen
Vorwärmebehandlung: Ferrit-Perlit-Glühen
Vorwärmebehandlung: Gehärtet und angelassen
Vorwärmebehandlung: Ferrit-Perlit-Glühen
Standardparameter Schmieden
Sprühkompaktieren
Warmwalzen: T=1250-950°C; A/A0=7; Ø: 75 mm
Ohne Loch
20 mm Loch
40 mm Loch
60 mm Loch
45 mm Loch
ES oben
ES unten
f unten = 0.1
f unten = 0.3
Standardp. Zerspannung
Standardparameter Zerspannung
1. Aufspannung/ 2. Aufspannung: Inogrip/ Segment backen Druck: 30 bar/40 bar Strategie: 4mm/3mm
1.Aufspannung/ 2.Aufspannung: Inogrip/ Segmentbacken Druck: 30 bar/40 bar Strategie: 1mm/6mm
Standardparameter Zerspannung
Erwärmen/ Abschrecken/ Aufkohlen
Ofen: Solo Charging: liegend
Ofen: IPSEN Zweikammer-Vakuum-Anlage Chargierung: Hängend Auflage: Keine
Ofen: Solo Charge: mehrere Teile Chargierung: Hängend Auflage: Dreipunkt
Ofen: Solo Chargierung: liegend Auflage: Dreipunkt, Nummer unten
Ofen: Solo Chargierung: liegend Auflagerichtung: 3 Punkte; Nummer unten
Ofen: Solo Charging: liegend Auflagerichtung: 3 Punkte; Nummer unten
Auflage: 2 Linien
Auflage: 3 Punkte
Aufkohlungsperiode: 40.25
Aufkohlungsperiode: 60.75
Aufkohlungsperiode: 115.200
Aufkohlungsperiode: 40.40 ..5
Aufkohlungsperiode: 60.80 ..15
Aufkohlungsatmosphäre: Methanol / N2
Aufkohlungstiefe: 0,6 mm
Aufkohlungstiefe: 0,8 mm
Aufkohlungstiefe: 1,2 mm
Standard Aufkohlen
Absenkung auf Härtetemperatur.: 840 °C 30 min
Aufkohlungst..: 940 °C
Aufkohlungsatmosphäre: Ethin (C2H2) / Vakuum
Aufkohlungsperiode: 1.20..2.20..2.25..1.52
Randkohlenstoffgehalt: 0.7 Gew.-%
Aufkohlungstiefe: 0.8 mm
Absenkung auf Härtetemp.: 20 min 840 °C 20 min
Ofenabkühlung: Nein
Einfaches Abschrecken: Nein
Keine Aufkohlung
Standard Erwärmen
Aufkohlungstemp.: 940 °C
.Carburizing atmosphere: Ethyne (C2H2) / vacuum
Surface carbon content: 0.7 wt-%
Aufkohlungsperiode: 1.20..1.20..1.28
Aufkohlungstiefe: 0.6 mm
Aufkohlungsperiode: 1.20..2.20.. 2.25..1.52
Aufkohlungstiefe: 0.8mm
Aufkohlungsperiode: 1.20..2.20..2.30.. 2.30..1.50..1.130
Aufkohlungstiefe: 1.2 mm
Aufkohlungsperiode: 1.20..2.20.. 2.50..2.60..1.235
Aufkohlungstiefe: 1.5 mm
Aufkohlungsperiode: 2.6..1.4
Aufkohlungstiefe: 0.4 mm
Aufkohlungsperiode: 1.20..2.20.. 2.25..1.52
Aufkohlungstiefe: 0.8mm, cover outer surface
Aufkohlungs-T.: 940 °C
Aufkohlungsatmosphäre: Methanol / N2
Aufkohlungsperiode: 60..75
Randkohlenstoffgehalt: 0.7 Gew-%
Aufkohlungstiefe: 0.8mm
Absenkung auf Härtetemperatur.: 5 K/min 840 °C 30 min
Absenken auf Härtetemp.: 20 min 840 °C 20 min
Ofenabkühlung: Nein
Einfaches Abschrecken: Nein
Abschrecken
Aufkohlen
Stahlerzeugung/ Schmieden/ Zerspannung
Standard Aufkohlen
Standard Erwärmen
Standard Abschrecken
Abkühlen auf Härtetemp.: 5 K/min 840 °C 30 min
Abkühlen auf Härtetemp.: Nein
Härtetemp.: 840 °C
Härtetemp.: 940 °C
M-Abkühl: N2
GVS: 8000 ln/min
GVS: 12000 ln/min
Gasvolumenstrom: 12000 ln/min
Abkühlart: Gasdüsenfeld
Härte-T.: 840 °C
M-Abkühl: N2
Abkühlart: Hochdruckgas-abschreckung, 10 bar
Anlassen: Nein
Härtetemp.: 840 °C
M-Abkühl: N2
Gasvolumenstrom: 8000 ln/min
Abkühlart: Gasdüsenfeld
Härte-T.: 850 °C
Härte-T.: 840 °C
M-Abkühl: N2
M-Abkühl: Öl
Gasvolumenstrom: 8000 ln/min
Abkühlart: Gasdüsenfeld
Anlassen: Nein
1-2: Screening Test
3-5: [Hoffmann 2007], S.350-351
6-9: Studentisches Forschungsprojekt
10-13: [Lübben und Zoch 2007], S. 411-413
14-15: [Lübben und Zoch 2007], S. 414,415
16: Screening Test
17-20: [Clausen et al. 2009a]
21-23: Screening Test
24-39: [Clausen et al. 2009a]
40-47: [Clausen et al. 2009b], [Clausen und Hoffmann 2007b], S. 490-496
Δr_i: relative Maßänderung Radius innen [‰]
Δr_a relative Maßänderung Radius außen [‰]
(Δra=(r1-r0)/r0, r0 nach Fertigung, r1 nach WB)
Δh: relative Höhenänderung [‰]
Hinweis: Standardprozesskette ist in gelber Farbe dargestellt
1 bis zum vorletzten Schnitt: ap=1mm and f=0,3mm
Letzter Schnitt: ap=0,25mm and f=0,2
Δ⊡: Phasenänderung der Ovalität [°]
ΔO: Ovalitätsänderung (FFT 2. Ordnung) [µm]
ΔS: Steigungsänderung [µm/mm] (Dishing)
s: Standardabweichung
VW: Vorwärmebehandlung
GVS: Gasvolumenstrom
ES: Eigenspannung
Härte-T.: Härte-Temperatur
M-Abkühl: Abkühlmedium
T_AUST: Austenitisiertemperatur
T: Temperatur
A/A0: Querschnittsveränderung
H_Sprüh: Sprühdistanz [mm]
GMV: Gas-zu-Metall Verhältnis
Autor: Dieter Klein
Datum: 28.03.2013
Dateiname: Prozesskettenposter_Scheibe2_FINAL.pptx