Ressourceneffizienz in Haupt-, Neben- und Endformgebungsprozessen für Präzisionskomponenten in Antrieben

Neugebauer, R.; Schubert, A.; Bräunlich, H.; Dix, M.; Rennau, A.; Reichmann, B.

Abstract

Das Ziel einer ressourceneffizienten Produktion ist es, mit einem Minimum an Ressourcen ein Maximum an Wertschöpfung zu erzielen. Dabei übernehmen die Produktionsprozesse, als die Wirkstelle zwischen den zu erreichenden Produkteigenschaften und den eingesetzten Mitteln, die zentrale Schlüsselfunktion. So ist die Auswahl des Prozesses und der bestimmenden Prozessparameter das Hauptkriterium, um unter gegebenen Funktionsanforderungen und der konstruktiven Konzeption des Produkts ökologisch und ökonomisch produzieren zu können.

Dabei muss die Einzelprozessgestaltung immer im Kontext zur übergeordneten Prozesskette durchgeführt werden. Wechselbeziehungen, die sich bereits durch die Zustände am Werkstück, wie beispielsweise thermische und mechanische Eigenschaften, ergeben, müssen mit in die Betrachtung einbezogen werden, um deren energetische Potenziale ganzheitlich zu bewerten und auszuschöpfen. Die klassische Prozesskette für Antriebskomponenten setzt sich vielfach aus einer umformenden Hauptformgebung sowie einer spanenden Neben- und Endformgebung zusammen. Im Rahmen der hier aufgeführten Untersuchungen werden die Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz in einer derartigen klassischen Prozesskette anhand von konkreten Prozessbetrachtungen und anhand von numerischen Analysen beispielhaft aufgezeigt.

1 Einleitung

Aufgrund steigender Energiepreise, zunehmendem Wettbewerbsdruck sowie der verstärkt wahrgenommenen Begrenztheit von fossilen Energieträgern ist auch die Industrie zunehmend mit dem Thema Energieeffizienz konfrontiert. Mit der Progno-

se, dass der Primärenergiebedarf bis zum Jahre 2030 um 45 % zunehmen wird, müssen vor allem Branchen mit energieintensiven Prozessen die Umsetzung von Maßnahmen für mehr Energieeffizienz forcieren [1]. Der Grundstein für energieund ressourceneffizientes Handeln ist durch politisch gesteuerte Maßnahmen, wie zum Beispiel die Energieeinsparverordnung oder die Förderung von Energiesparberatungen, gelegt. Letztlich wird jedoch der Weg durch Wissenschaftler und Technologen mit der Entwicklung von energie- und ressourceneffizienten - und damit kostenreduzierten - Produkten und Technologien aufgezeigt. Das Potenzial zur Erhöhung der Ressourceneffizienz, das in den Produktionsprozessen enthalten ist, wird allein schon deutlich, wenn der Energiebedarf eines Unternehmens betrachtet wird. Statistische Analysen zum Energiekonsum in Deutschland zeigen auf, dass rund 66 % des Endenergieverbrauchs in der Industrie auf die Prozesswärme entfällt. Weitere 23 % werden für mechanische Energie aufgewendet [2]. Die Zahlen legen dar, dass der Schlüssel für Energieeinsparungen in Unternehmen bei der Analyse der Prozessketten liegt. Experten im Bereich der Produktionstechnik erachten eine Steigerung der Energieeffizienz in der Gesamtprozesskette um rund 30 % als realistisch [3].

Im Rahmen des Spitzentechnologieclusters "Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovation in der Produktionstechnik (eniPROD)" entwickelt eine interdisziplinär arbeitende Forschergruppe schwerpunktmäßig mit Lösungsansätzen für ressourceneffiziente Prozessketten. Anhand eines Funktionsdemonstrators werden sowohl einzelne Fertigungsverfahren untersucht als auch eine gesamtheitliche Analyse der Fertigungsprozesskette durchgeführt. Dabei steht nicht die Verbesserung Gesamtbauteils im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten, sondern die ressourcenoptimale Realisierung der Funktionen des Demonstrators. Dabei vereint der Demonstrator Baugruppen aus dem verbrennungsmotorischen und dem elektromotorischen Antriebskonzept. Die Forschungsaktivitäten beinhalten Untersuchungen sowohl zur Haupt- und Nebenformgebung als auch zur Endformgebung. Nachfolgend werden aus diesem Bereich forschungsrelevante Aspekte aufgezeigt und zentrale Ansatzpunkte verdeutlicht.

2 Prozessanalyse als Basis für Ressourceneffizienz

Wird im Rahmen von Verbesserungsaktivitäten die Ressourceneffizienz fokussiert, so ergibt sich die Besonderheit, dass es nicht ausreicht, einen einzelnen Prozessschritt der Prozesskette herauszugreifen. Zur wirkungsvollen Ableitung und Umsetzung von zielgerichteten Maßnahmen ist es vielmehr notwendig, den einzelnen Prozess im Zusammenhang der gesamten Prozesskette zu untersuchen. Dies setzt voraus, dass die betrachtete Prozesskette zunächst abgebildet und anschließend systematisch analysiert wird. Ein zentrales Thema des Forschungsprojektes eniPROD ist die ressourceneffiziente Fertigung von Präzisionskomponenten, wie Zahnrädern, Kurbelwellen oder Gleitlagerflächen. Für die Prozesskettenanalyse dieser Komponenten wurden Prozessablaufpläne erstellt und den Untersuchungen zugrunde gelegt. Die Visualisierung der Prozessabläufe erfolgte in Anlehnung an einen Metroplan, der den Weg der Herstellung eines Produktes mit seinen Bearbeitungsstationen vom Halbzeug bis zum Fertigteil aufzeigt. In Bild 1 ist ein Ausschnitt aus einem derartigen Metro-Plan für die Komponente Zahnrad dargestellt.



Bild 1: Ausschnitt aus dem Prozessablaufplan für die Herstellung eines Zahnrades

Der Nutzen der Prozesskettendarstellung als Metro-Plan liegt vor allem in der übersichtlichen Darstellung der Prozesskette in Form eines Ablaufplanes mit den alternativen Bearbeitungsschritten. Über die reine Abbildung der Prozessabfolge hinaus können im fortgeschrittenen Untersuchungsstadium ergänzende Informationen, beispielsweise zum Energie- und Materialfluss, eingefügt werden, ohne dabei die Übersichtlichkeit zu vermindern. Dies kann durch die definierte Zuordnung von Informationen über die Prozessparameter zu den grafischen Elementen der Stationen und Verbindungen (Farbe, Form, Linienstärke, …) erfolgen. Farbe, Form und Umrandung können dann wesentliche Daten zu einer Prozessstation beinhalten. Ebenso vergrößert die farbliche Gestaltung sowie die Art und Stärke der Verbindungslinien zwischen den Prozessstationen den Informationsgehalt der Prozesskettenpläne. Mit dieser Erweiterung der Informationsdichte in den Prozessketten gelingt es, von der Stufe der reinen Darstellung der Prozesskette auf die Stufe der Prozessanalyse aufzusteigen: Das Visualisierungswerkzeug wird zum Analysewerkzeug.

Der Prozesskettenplan in Form des Metro-Planes sichert mit seiner Darstellungsweise ab, dass entsprechende vor- und nachgelagerte Bearbeitungsschritte offen gelegt werden. Dies ist vor allem dann von Bedeutung, wenn mehrere Prozessschritte analysiert werden. Trotz der detaillierten Auseinandersetzung mit einem Prozessschritt bleibt durch den Prozessplan der Blick für benachbarte Prozessschritte oder sogar zur Prozessperipherie erhalten. Das Projekt eniPROD setzt an diversen Prozessabschnitten an, wobei die entsprechenden Einzelanalysen mit zunehmendem Projektfortschritt mehr und mehr zusammengeführt werden. Die Verwendung eines Prozessplanes vereinfacht demzufolge die dafür notwendige Vernetzung der Teilprojekte und unterstützt sowohl die deduktive als auch die induktive Vorgehensweise in den verschiedenen Stadien der Prozesskettenanalyse.

3 Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung am Beispiel des Gesenkschmiedens

Innerhalb der Verfahren zur Hauptformgebung besitzen die umformenden Fertigungsverfahren, insbesondere in der Bearbeitung massiver Teile, einen hohen Stellenwert. Dies ist vor allem durch die Festigkeitseigenschaften und angesichts des im Vergleich zum Spanen größeren Materialausnutzungsgrades begründet. Dem Schmieden, als eine der ältesten Arbeitstechniken der Menschheit, kommt dabei besondere Bedeutung zu. Allein der Anteil der durch Gesenkschmieden hergestellten Bauteile betrug im Jahr 2007 rund 62 % am gesamten Produktionsvolumen der Massivumformung [4]. Mit den Verfahrensvarianten Kalt-, Halbwarmund Warmumformung, dem Gesenkschmieden mit und ohne Grat sowie dem Präzisionsschmieden und weiteren Verfahrensvarianten eröffnet sich dabei ein weites Gebiet für Ansätze zur Verbesserung der Ressourceneffizienz.

Ressourcen sind im Allgemeinen Ausgangsstoffe beziehungsweise Hilfsmittel, um ein bestimmtes Ziel, etwa ein Produkt oder eine Dienstleistung, zu erreichen. Derartige Ausgangsstoffe sind im Wesentlichen Material, Energie, Geldmittel, Arbeitskraft, Informationen und Zeit [5]. Bezogen auf technische Formgebungsprozesse besitzen vor allem die Materialien eine besondere Bedeutung. In der Produktion begegnen sie einem in Form von Rohstoffen (Halbzeuge), Hilfsstoffen (Schweißdrähte, Schrauben,...), Betriebsstoffen (Kühlmittel, Schmiermittel, Druckluft, Putzmittel, ...) und Betriebsmitteln (Maschinen, Anlagen, Werkzeuge). Hilfs- und Rohstoffe gehen dabei direkt ins Produkt ein, wobei die Hilfsstoffe für das Endprodukt gegenüber den Rohstoffen von untergeordneter Bedeutung sind. Bild 2 zeigt die Einflussgrößen, die den Gesenkschmiedeprozess maßgeblich beeinflussen können, geordnet nach der entsprechenden Art der Ressource. Ausgehend von der Übersicht der am Prozess beteiligten Ressourcen sowie der Prozessmerkmale können die Ansatzpunkte zur Analyse und Verbesserung der Ressourceneffizienz im Gesenkschmiedeprozess systematisch abgeleitet werden.



Bild 2: Ressourcen und Einflussgrößen beim Gesenkschmiedeprozess

Analog konventioneller technologischer Optimierungsuntersuchungen können zur Verbesserung der Ressourceneffizienz das Produkt, das Verfahren oder die maschinelle Anlage inklusive der Werkzeuge im Mittelpunkt der Aktivitäten stehen. Im Fall von Bestrebungen zur Ressourceneffizienz sind die zu optimierenden Zielgrößen keine typisch technologischen Parameter, sondern Flussparameter, wie beispielsweise die Energie oder das Material. Aus diesem Grund kann auch an technologische Untersuchungen, beispielsweise zu Werkstoffeinsparungen, zu Einsparungen von Verfahrensschritten, zu den Möglichkeiten von Near-Net-Shape Verfahren sowie die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, angeknüpft werden. Diese genannten Maßnahmen richten sich auf die Reduzierung der Ressourcen Material und Zeit.

Wird der Fokus auf die Einsparung von Energie gerichtet, liegt das Potenzial beim Gesenkschmieden vorwiegend bei den thermischen Prozessen. Sowohl der Erwärmungsprozess als auch der Wärmebehandlungsprozess rücken dazu in den Mittelpunkt. Ansätze, die Prozesse der Warmumformung in den Bereich der Halbwarmumformung oder sogar der Kaltumformung überführen, sind dabei ebenso von Bedeutung wie die Untersuchungen beispielsweise zum Vergüten aus der Schmiedewärme.

Auch die Werkzeugtechnologie, als ein Baustein im Gesenkschmiedeprozess, bietet verschiedenste Anknüpfungspunkte für ressourcenschonende Maßnahmen. Beispielsweise führt eine höhere Genauigkeit der Werkzeuge zu Genauigkeitssteigerungen am Werkstück und damit zur Möglichkeit, den Gesenkschmiedeprozess ressourcenwirksam zu verbessern. Zum einen kann Material am Werkstück eingespart werden, zum anderen können auch notwendige Nachfolgeoperationen reduziert werden. Genauigkeitssteigerungen am Werkzeug lassen sich beispielsweise durch die Reduzierung der thermischen Belastung der Werkzeuge erreichen. Die Temperatur des Halbzeuges, die Temperaturdifferenz zwischen Werkstück und Werkzeug sowie die Dauer der Temperatureinwirkung entscheiden maßgeblich darüber, wie stark sich die Gesenke durch die thermischen Einflüsse verformen. Die Dauer der Temperatureinwirkung resultiert dabei aus der Dauer des Umformvorganges, ausgedrückt durch die Druckberührzeit. Kürzere Umformzeiten senken nicht nur die thermische Belastung der Werkzeuge, sondern verringern auch die Energieverluste aufgrund des Wärmeübergangs ins Werkzeug. Gleichzeitig wird die Produktivität des Umformvorganges erhöht. Im Bezug auf die Verringerung der Belastung der Werkzeuge und der Verkürzung der Umformdauer ist die statische und dynamische Steifigkeit der Gesenke ein zentraler Aspekt. Wird beispielsweise der Umformprozess in den Bereich der Hochgeschwindigkeitsumformung verlagert, so kann die Auf- bzw. Rückfederung der Gesenke positiv beeinflusst werden. Eine reduzierte Auffederung des Gesenks erhöht die Genauigkeit des Bauteils und verringert somit den Nacharbeitsaufwand. Im Bezug auf die Rückfederung ergibt sich

der Vorteil, dass die Werkstücke kraftärmer und schneller entnommen werden können und sich damit die Produktivität des Prozesses erhöht.

Die Analyse und Senkung des Verschleißes der Werkzeuge stellt einen weiteren Untersuchungsansatz dar. Der Verschleiß bzw. die Standzeit der Werkzeuge wird maßgeblich durch das Zusammenspiel zwischen den mechanischen, thermischen und tribologischen Prozessbedingungen sowie das Werkstoffverhalten des Werkzeugmaterials bestimmt. Eine Erhöhung der Standzeit steigert gleichzeitig die Produktivität der Werkzeuge, denn es werden weniger benötigt und der Aufwand zur Reparatur der Werkzeuge nimmt ab. Demzufolge wird in ähnlicher Weise wie bei der Material-, Zeit- bzw. Prozessschrittreduzierung der Ressourceneinsatz im Gesenkschmiedeprozess positiv beeinflusst.

Anhand der Ausführungen wird deutlich, dass die ressourceneffiziente Gestaltung von Gesenkschmiedeprozessen mit den technologischen Optimierungsansätzen einhergeht. Allerdings liegt die Besonderheit bei den entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen darin, dass Flussgrößen wie Energie oder Masse ganzheitlich betrachtet werden und somit die Vernetzung der Prozessparameter stärker in den Vordergrund rückt.

4 Ressourceneffizienz in spanenden Formgebungsprozessen

4.1 Einordnung und energetische Aspekte

Das Gebiet der spanenden Bearbeitung setzt sich aus einer Vielzahl von Verfahren zusammen, wobei es deutliche Unterschiede in der Prozesscharakteristik gibt. Diese wiederum führen zu großen Unterschieden in der prozessbezogen Energiebilanz. So wurden beim jeweiligen Energieverbrauch der Verfahrensgruppen zwischen Spanen mit unbestimmter Schneide und Spanen mit bestimmter Schneide Differenzen mit einem Faktor von 10:1 von Degner [6] beschrieben, die auf die geringe Schnitttiefe und den verfahrensbedingt stark negativen Spanwinkel beim Spanen mit unbestimmter Schneide zurückzuführen sind. Dieses Verhältnis macht deutlich, dass eine Substitution von spanenden Verfahren mit unbestimmter Schneide durch Verfahren mit bestimmter Scheide zu großen Energieeinsparungen führen kann. Voraussetzung dafür ist die Absicherung einer gleich- bzw. höherwertigen Produktqualität und Prozesssicherheit.

Neben diesen Unterschieden zwischen den spanenden Verfahren ergeben sich auch Einsparpotenziale durch eine ressourceneffiziente Prozessgestaltung, welche im Abschnitt 4.2 am Modellversuch des orthogonalen Schnittes allgemeingültig verdeutlicht wird.

4.2 Numerische Analyse des Einflusses von Zerspanparametern auf die Energiebilanz

4.2.1 Ansatz und Modellbildung

Die Methode der Finiten Elemente FEM hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einem bedeutenden Werkzeug für die Analyse und planerische Auslegung von Zerspanprozessen entwickelt. In den hier aufgeführten Untersuchungen wurde die Simulation als Werkzeug für die energie- und ressourceneffiziente Gestaltung sowie Bilanzierung genutzt. Dabei wurde der Einfluss der Zerspanparameter auf die Energie im Prozess sowie auf die Nebenprodukte Span und Grat, welche ein hohes Maß an Energie und Ressourcen durch ihren Nachbearbeitungs- bzw. Reinigungsaufwand binden, ermittelt.

Beim angewandten Modellversuch des orthogonalen Schnittes sind die charakterisierenden Zerspanparameter die Schnittgeschwindigkeit v_c sowie die Schnitttiefe a_p. Diese Parameter wurden als variable Eingangsgrößen gesetzt. Ergänzend dazu wurde die Möglichkeit der Einstellbarkeit des Reibkoeffizienten im numerischen Modell dazu genutzt, den Einfluss des Reibwertes in der Kontaktpaarung Schneide/Werkstück bzw. Schneide/Span auf die Zerspanenergie und die ressourcenbindenden Nebenprodukte zu untersuchen.

Zur methodischen Systemanalyse wurde die Methode der statistischen Versuchsplanung (DoE) angewandt, welche einen Überbegriff für eine Vielzahl von Vorgehen darstellt. Bezogenen auf die Versuchscharakteristik werden Verfahren beispielsweise zur Reduzierung von Versuchsaufwand oder zur Ermittlung von detaillierten Zusammenhängen ausgewählt [6]. Im Gegensatz zu den üblich aufgeführten Vorgehensweisen, bei denen experimentelle Versuche und deren Messgrößen ausgewertet werden, wurden bei der hier aufgeführten Analyse numerische Zerspansimulationen als Versuche verwendet. Dabei wurde ein vollständiger 3ⁿ- Faktorenversuchsplan [8] mit FE-Zerspansimulationen – als Ersatz für den experimentellen Versuch – kombiniert.

Die untersuchten Parameter sind in Bild 3 aufgeführt. Die Wahl der Schnittparameter (Schnittgeschwindigkeit v_c = 300 m/min, Schnitttiefe a_p = 0,5 mm) orientierte sich an den üblichen Zerspanparametern für die Bearbeitung des normalisierten Vergütungsstahls 42CrMo4 mit unbeschichtetem Vollhartmetallwerkzeugen.



Bild 3: Kombination von statistischer Versuchplanung und FE-Simulationen

Aus dem Versuchplan ergaben sich für die vollfaktorielle Methode 3³ = 27 Versuche. Diese hohe Anzahl von Versuchen ist damit zu begründen, dass der Schwerpunkt auf möglichst detaillierten Aussagen über die Zusammenhänge zwischen den Eingangsparameter, im untersuchten Fall Zerspanparameter und Reibwert, und den Ausgabeparameter, hier Schnittkraft und Nebenprodukte, lag. Mit Hilfe des umfangreichen vollfaktoriellen Versuchsplans lassen sich diese Zusammenhänge präzise, wertebezogenen ermitteln, wodurch der Aufwand gerechtfertigt ist. Sollte diese Methode auf Experimente oder Simulationen übertragen werden, welche einen verhältnismäßig hohen Zeit- oder Kostenaufwand benötigen, so sollte dieser Punkt erneut diskutiert und abgewogen werden.

Zur Berechnung der numerischen Simulationen wurde das Programm DEFORM 3D V9.1 verwendet. Das Modell wurde dabei wie folgt aufgebaut:

- Werkstück: Werkstoffparameter 42CrMo4 (AISI4140), plastischer Verformungscharakter, Risskriterium nach Normalized Cockcroft & Latham, 5000 Finite Elemente (Verteilung adaptiv bestimmt durch Netzfenster, Dehnrate und Dehnung), Länge 15mm
- Werkzeug: Unbeschichtetes VHM, als starr angenommen, Wärmeübergang, Spanwinkel 0°, Freiwinkel 3°, 900 Finite Elmente (Verteilung adaptiv bestimmt durch lokale Temperaturen und Netzfenster)
- Umgebungsbedingungen für Trockenbearbeitung

Wie eingangs beschrieben, wurden mittels der numerischen Berechnungen die spezifische Schnittkraft sowie die Form der Nebenprodukte Span und Grat bestimmt. Dazu wurde die Kraftkomponente in Vorschubrichtung am Werkzeug ausgelesen. Diese (Bild 4, links) zeigte den typischen Verlauf für den Anschnitt (Schnittkraftanstieg), den konstanten Bereich (Einpegeln des Momentanwertes auf ein konstantes Niveau) sowie den Schneidenaustritt mit Gratbildung (Schnittkraftabfall). Für die Auswertung wurde der Durchschnittswert zwischen der Spanlänge 8 mm und 9 mm ermittelt, da für diesen Bereich davon ausgegangen werden konnte, dass sich ein quasistatisches Temperatur- und Kräfteverhältnis in der Spanzone gebildet hatte.

Als Messgröße für die Spanform wurde der Spankrümmungsradius durch Auslesen der äußeren Knotenkoordinaten des Spanmodells und der Drei-Punkt-Kreisberechnung bestimmt. Der Spankrümmungsradius gibt Aufschluss darüber, wie groß die Späne tendenziell im realen Experiment würden und kann als Vergleichsgröße für die Spanform herangezogen werden. Wobei für die automatisierte Fertigung gilt, dass kleine, kompakte Späne (kleine Spankrümmungsradien) sich besser vom Bauteil und aus der Maschine abführen lassen.

Bezüglich des Nebenproduktes Grat wurden verschiedene Grattypen und deren Größen dokumentiert und ausgewertet. So wurden, bevorzugt bei geringen Schnitttiefen, sogenannte Severt-Grate [9], bei welchem deformiertes Werkstückmaterial an der Werkstückkante haften bleibt, gebildet. Als zweite Gratform traten Pekelharing-Grate [10], oder auch als negativer Grat bezeichnet, auf. Bei diesem Grat kommt es zum Abreißen der Werkstückkante und eine Art Fase im Größenbereich von 0,5 bis 1 mm entsteht. Dies ist meist mit der Bildung eines Sekundärgrates am Abrissort verbunden. Beide Gratformen wurden nach einer angepassten Formel des Gratwertes nach Link [11] bewertet, in welcher die Grathöhe und Gratbreite gewichtet einfließen. Dabei gilt, dass ein niedriger Gratwert direkt mit geringerem Materialüberhang verbunden ist, wodurch weniger Gratentfernungsaufwand notwendig ist.



Bild 4: Messgrößen bei der Auswertung der FE-Zerspansimulationen

4.2.2 Energieoptimale Prozessparameterwahl

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte zum einen durch eine grafische Wiedergabe der Ergebnisse sowie durch die Interpretation des mittels der statistischen Versuchsplanung erstellten Regressionspolynoms zweiter Ordnung.

Als Hauptenergie im Spanprozess ist die Schnittkraft von zentraler Bedeutung. Zur Auswertung wird die spezifische Schnittkraft k_c bezogenen auf die Schnitttiefe aufgeführt und im folgenden Bild 5 vergleichend dargestellt.



Bild 5: Einfluss von Schnittgeschwindigkeit v_c , Schnitttiefe a_p und Reibwert μ auf die spezifische Schnittkraft k_c

Dabei zeigte sich, dass die Schnitttiefe die dominante Einflussgröße darstellt. Die Schnittgeschwindigkeit weist in diesem Parameterbereich von 100 bis 500 m/min keinen bis geringen Einfluss auf die Schnittkraft auf. Für den Reibwert wurde eine Abhängigkeit, in Zusammenhang mit der Schnittliefe nachgewiesen. Wird eine relativ niedrige Schnittliefe von 0,1 mm gewählt, so steigt die spezifische Schnittkraft mit steigendem Reibwert an. Bei hohen Spantiefen kommt es wiederum zu einem leichten Absinken der Schnittkraft mit steigendem Reibwert. Die grafisch gewonnenen Erkenntnisse spiegeln sich im Regressionspolynom wieder.

$$y_{kc} = 292x_{ab}^{2} - 449x_{ab} + 3x_{vc}^{2} + 4x_{vc} - 109x_{u}^{2} + 86x_{u} - 30x_{ab}x_{vc} - 110x_{ab}x_{u} - 50x_{vc}x_{u} + 2635 (1)$$

Zur Darstellung der verschiedenen Größenbereiche von Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Reibwert wurden diese auf -1...0...+1 normiert:

$$y_{ap} = (a_p - 0.5) / 0.4$$
; $x_{vc} = (v_c - 300) / 200$; $x_{\mu} = (\mu - 0.25) / 0.15$ (2)

An Hand des Multiplikators der normierten Faktoren im Regressionspolynom in Formel (1) lässt sich die Wichtung des Faktors ablesen. So zeigte die Schnitttiefe einen sehr hohen quadratischen und linearen Anteil im Vergleich zur Schnittgeschwindigkeit und zum Reibwert. Wie schon bei der grafischen Auswertung erkannt wurde, ist der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit unbedeutend. Die in Kombination wirkenden Eingangsgrößen Reibwert und Schnittliefe wurde durch einen hohen Multiplikator von $x_{ap}x_{\mu}$ bestätigt. Identisch zur Vorgehensweise bei der Untersuchung zur spezifischen Schnittkraft wurden die Ergebnisse zum Spankrümmungsradius ausgewertet (Bild 6 und Formel 3).



Bild 6: Einfluss von Schnittgeschwindigkeit v_c , Schnitttiefe a_p und Reibwert μ auf den Spankrümmungsradius r_c

Ähnlich wie bei der spezifischen Schnittkraft dominierte der Einfluss der Schnitttiefe auch beim Spankrümmungsradius. Jedoch zeigte sich hier ein Anstieg des Spankrümmungsradius mit steigender Schnitttiefe, was tendenziell zu größeren Spänen führt, welche schwieriger zu handhaben sind. Im Gegensatz zur Schnittkraft ist beim Spankrümmungsradius ein Einfluss der Schnittgeschwindigkeit vorhanden. So kam es mit steigender Schnittgeschwindigkeit zum Absinken des Spankrümmungsradius. Das Polynom der statistischen Versuchsplanung bestätigte und präzisierte diese Angaben.

$$y_{rc} = -0.1x_{ap}^{2} + 1.5x_{ap} + 0.24x_{vc}^{2} - 0.35x_{vc} - 0.13x_{\mu}^{2} - 0.08x_{\mu} - 0.18x_{ap}x_{vc} - 0.19x_{ap}x_{\mu} - 0.07x_{vc}x_{\mu} + 2.15$$
(3)



Bild 7: Einfluss von Schnittgeschwindigkeit vc, Schnitttiefe ap und Reibwert µ auf den Gratwert G

Der Gratwert (Bild 7) wies ähnlich wie der Spankrümmungsradius energetisch gesehen ein gegenläufiges Bild zur spezifischen Schnittkraft auf. Die Schnitttiefe dominierte auch hier und es kommt zum Anstieg des Gratwertes mit steigender Schnitttiefe. Der Einfluss von Schnittgeschwindigkeit und Reibwert war hierbei nicht signifikant, was durch das Regressionspolynom bestätigt wurde.

$$y_{G} = 1,33x_{ap}^{2} + 2,55x_{ap} - 0,11x_{vc}^{2} + 0,11x_{vc} - 0,55x_{\mu}^{2} + 0,22x_{\mu}^{-} + 0,22x_{ap}x_{vc} + 0,16x_{ap}x_{\mu} + 0,17x_{vc}x_{\mu} + 3,21$$

Die Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt, dass für die energetische Gestaltung des Zerspanprozesses die Schnitttiefe von zentraler Bedeutung ist, da Sie die Schnittkraft und die Nebenprodukte Span und Grat entscheidend beeinflusste. Dabei führte eine Erhöhung der Schnitttiefe zum Absinken der spezifischen Schnittkraft und tendenziell zu einer Steigerung des Reinigungs- und Nachbearbeitungsaufwandes basierend auf den Nebenprodukten. Die Schnittgeschwindigkeit wies nur im Fall des Spankrümmungsradius einen signifikanten Einfluss auf. So sank der Spankrümmungsradius mit steigenden Schnittgeschwindigkeiten.

Eine reiboptimierte Schneide zur Senkung der Bearbeitungskräfte ist nur bei geringen Schnitttiefen zielführend. So nahm bei Schnitttiefen in Bereich von 0,1 mm die spezifische Schnittkraft mit sinkendem Reibwert ab. Bei höheren Schnitttiefen war dieser Effekt gar nicht bis umgekehrt zu beobachten. Ursache dafür ist, dass bei geringen Schnitttiefen der Reibanteil bei der Energiebilanz im Prozess entscheidend ist und dieser direkt vom Reibwert beeinflusst wird. Bei höheren Schnitttiefen wird der Anteil der Umformenergie in der Spanbildungszone vorherrschend und die Reibenergie weist nur einen geringen Anteil auf [13]. Dabei wurde bei sinkendem Reibwert ein Absinken der Temperaturen im Bereich der primären Scherebene detektiert, was den Schnittkraftanstieg erklären kann. Aus vorangegangen Erkenntnissen ist abzuleiten, dass die Schnitttiefe und teilweise die Schnittgeschwindigkeit für die Energie im Zerspanprozess entscheidend sind. Werden die Grenzen der Betrachtung auf die spanende Werkzeugmaschine erweitert, so wird deutlich, dass durch die hohen Energieaufwendungen für Nebenaggregate und Steuerung [6] nur durch kurze Prozesszeiten ein hohes Maß an Energieeffizienz erreicht werden kann. Basierend auf diesem Zusammenhang sollte mit einer zweiten numerischen Versuchreihe abgewogen werden, wie sich die spezifische Schnittkraft, der Werkzeugverschleiß, der Gratwert und der Spankrümmungsradius bei steigenden Schnittparametern (a_p und v_c) entwickeln. Dazu wurde eine zweites Modell mit längeren Schnittweg und Verschleißberechnung (Materialabtrag) nach Usui entwickelt. Die Konstanten für die Reibpaarung für das Verschleißmodell wurden von Attanasio [12] übernommen. Der Reibwert wurde mit $\mu = 0,25$ angenommen.



Bild 8: Einfluss der Schnittliefe und der Schnittgeschwindigkeit auf die spezifische Schnittkraft, den Werkzeugverschleiß, den Gratwert und den Spankrümmungsradius

Das Verhalten der Ergebnisgrößen bei steigender Schnitttiefe in Bild 8 zeigte ein gegenläufiges Verhalten. So nahm die spezifische Schnittkraft mit steigender Schnitttiefe ab, wohingegen der Werkzeugverschleiß und der Spankrümmungsradius anstiegen. Für den Gratwert wurde ein lokales Minimum bei zirka $a_p = 0,95$ mm dokumentiert.

Für die Schnittgeschwindigkeit zeigte sich ein ähnliches Bild. So erreichte der Gratwert ein lokales Minimum bei zirka v_c = 320 m/min. Der Spankrümmungsradius sank mit steigender Schnittgeschwindigkeit, wobei der Werkzeugverschleiß, basierend auf steigenden Temperaturen und Reibgeschwindigkeiten, logarithmisch anstieg. Die spezifische Schnittkraft weist ein annähernd konstantes Verhalten in dem aufgeführten Schnittgeschwindigkeitsbereich auf.

4.2.3 Schlussfolgerung zur numerischen energetischen Analyse

Aus den Diagrammen leitet sich die Frage nach der Bestimmung des energetischen Optimums für die spanende Bearbeitung ab. Dazu ist es notwendig, jede Ergebnisgröße in eine Energiegröße umzurechnen. Dabei sollte die Primärenergie pro Spanvolumen als übergeordnet vergleichbare Größe herangezogen werden [6]. Im Fall der spezifischen Schnittkraft kann diese Umrechnung bei Kenntnis des Maschinenwirkungsgrades erfolgen. Jedoch ist dieser Wirkungsgrad heute noch nicht für einen Großteil der Maschinen verfügbar, wodurch sich dort eine Notwendigkeit für zukünftige Maschinenentwicklungen ergibt. Ein ähnliches Problem tritt beim Werkzeugverschleiß auf. So ist heute die Standzeit teilweise für Werkzeuge bekannt, jedoch kann nur der Preis und nicht die notwendige Primärenergie zur Werkzeugherstellung zur Energie- und Ressourcenbilanz beim Anwender herangezogen werden. Auch für die Nachbearbeitung und Reinigung von Bauteilen sind nur überschlägige Kostengrößen bekannt.

4.3 Endbearbeitung von rotatorischen Powertrain-Komponenten

4.3.1 Verfahren zur Endbearbeitung

An die Funktionsoberflächen von Powertrain-Komponenten wird die Forderung nach einer hohen Oberflächenhärte bei gleichzeitig ausreichender Kernzähigkeit gestellt. Daher werden zirka 50 % aller gefertigten Kurbelwellen im Bereich der Lagersitze gehärtet. Weitere 25 % werden dabei auch im Übergang zwischen Lagersitz und Kurbelwange gehärtet [14]. Zusätzlich werden hohe Ansprüche bezüglich der Form- und Lagetoleranzen sowie der Oberflächenrauheitsparameter an die spanende Endbearbeitung gestellt. Als Hauptziele der Endbearbeitung sind die Beseitigung der Aufmaße wegen des Bauteilsverzuges nach dem Härten, die Herstellung der Endgeometrie und die Realisierung von Vorrausetzungen, wie zum Beispiel die Oberflächenrauheit, für die Erzeugung funktionaler Oberflächen zu nennen.

Die rotatorischen Bauteile können durch spanende Verfahren mit bestimmter und unbestimmter Schneide erzeugt werden. Das Schleifen als Vertreter der Bearbeitung mit unbestimmter Schneide steht dem Drehen, Drehräumen und dem Drehfräsen als Verfahren mit bestimmter Schneide gegenüber. Spanende Verfahren mit bestimmter Schneide, beispielsweise das Drehen, zeichnen sich durch ein höheres Zerspanvolumen bei geringerem Leistungsbedarf gegenüber dem Schleifen aus [6].

4.3.2 Anforderungsgerechte Prozessparameterwahl

Der Bearbeitung liegt zunächst der Werkstoff des Werkstückes mit seinen mechanischen und thermischen Eigenschaften zu Grunde. Der Zerspanprozess wird dabei durch das Werkzeug und die Verfahrensparameter, wie Schnittgeschwindigkeit v_c, Vorschub f und Schnitttiefe a_p, im Zusammenspiel mit dem Werkstückwerkstoff, bestimmt.

Wobker führt in [15] die Anforderungen der Werkzeugschneide bei der Zerspanung von gehärteten Stahlwerkstoffen auf. Demnach muss der Schneidstoff aufgrund der Härte des vergüteten Werkstückwerkstoffes sowohl eine hohe Härte und Wärmefestigkeit als auch eine hohe der Zähigkeit aufweisen. In der Hartbearbeitung wird daher Hartmetall (HM) in überwiegender Form als Feinstkornhartmetall und Ultrafeinstkornhartmetall eingesetzt. Weitere angewandte Schneidstoffe sind Keramiken auf Basis von Aluminiumoxid und polykristallines kubisches Bornitrid (PCBN). Auf die geringere Wärmehärte von HM gegenüber PCBN verweist [16] und empfiehlt dieses daher nur für Hartzerspanung mit geringeren Schnittzeitanteilen wie beispielsweise Hartfräsen oder Räumen. Für das Drehen kommt dagegen ausschließlich der Einsatz von PCBN aufgrund der extrem hohen Anforderung an die Wärmhärte und die Diffusionsbeständigkeit des Schneidstoffes in Frage. Jedoch weist der Schneidstoff HM für die genannten Anwendungen aufgrund seiner höheren Zähigkeit gegenüber PCBN ein sehr gutes Einsatzverhalten auf. Mit dem Einsatz von geeigneten Beschichtungssystemen kann eine deutliche Leistungssteigerung im Bezug zu der Wärmehärte erzielt werden [16].

In der Hartbearbeitung wird in der Regel zur Stabilisierung der Schneide eine Schneidengeometrie mit einem negativen Spanwinkel genutzt [16]. Durch diese Geometrie entstehen größere Bearbeitungskräfte als bei einem Einsatz von Schneiden mit positivem Spanwinkel. Die auftretenden Kräfte bei der Verwendung von Schneidengeometrien mit negativen Spanwinkel untersuchte [15] und fand heraus, dass günstige Kraftverteilungen für unterschiedliche Schneidstoffe bei einen Spanwinkel γ = -20° erzielt werden. Aufgrund dieser günstigen Kraftverteilungen kann der Freiflächenverschleiß an der Schneide reduziert werden.

Die Zunahme der Schnittgeschwindigkeit v_c als Prozessgröße führt zunächst durch die hohen Temperaturen in der Kontaktzone zu einem Anstieg des Verschleißes an der Schneide. Bedingt durch die höheren Schnittgeschwindigkeiten treten jedoch

geringere Schnittkräfte auf, die sich positiv auf die erzeugte Oberflächenrauheit auswirken. Bei Schnittgeschwindigkeiten v_c \ge 40 m/min stellte Jochmann fest, dass sich die Schneidflächenrauheit arbeitsscharfer Werkzeuge nicht mehr auf der Oberflächenrauheit des Werkstückes widerspiegelt. Die Verschlechterung der Werkstückoberflächenrauheit im Bereich 40 bis 120 m/min gehend mit der Verschlechterung der Schneidenkantenrauheit einher. Mit dem Einsatz der optimalen Schnittgeschwindigkeiten für PCBN von v_c = 150 m/min fällt dieser Verschleiß geringer aus, sodass mit dieser Schnittgeschwindigkeit eine bessere Oberflächenrauheit erzeugt werden kann [16].

Die durch den negativen Spanwinkel verursachten großen Bearbeitungskräfte werden mit der Verminderung der Schnitttiefe a_p und des Vorschubes f reduziert. Typische Bereiche der Schnitttiefe liegen für die Vorbearbeitung bei $a_p = 1,5$ bis 2 mm und für das Schlichten bei $a_p = 0,1$ bis 0,3 mm [15].

Aufgrund der verhältnismäßig geringen Schnitttiefe gegenüber dem Eckenradius befindet sich in der Endbearbeitung die eingreifende Schneidkante hauptsächlich im Bereich der Eckenrundung. Dies führt zu einem gegenüber dem Einstellwinkel κ_w entlang des Schneidbogens in einen Bereich von $0 < \kappa_w < \kappa$. Für Berechnungen sollte daher der effektive Einstellwinkel κ_{eff} zu Hilfe gezogen werden (Bild 9). Aufgrund des veränderlichen Einstellwinkels und der somit variierenden Zerspanungsdicke kommt es zur Zunahme der dynamischen Kraftanteile. Daher sollte zur Vermeidung von Schwingungen mit angepassten Schnittparametern gearbeitet werden [17].

In einer Untersuchung über den Einfluss des Vorschubes beim Hartdrehen wird in [16] beschrieben, dass bei einem Vorschub f \leq 0,02 mm die Maschineneigenschaften die Bauteiloberfläche bestimmen. Im Bereich 0,02 \leq f \leq 0,2 mm bildet sich die Mikrogeometrie der Schneide auf der Werkstückoberfläche ab und oberhalb die Makrogeometrie.

Wie die geringe Schnitttiefe hat auch der geringe Vorschub Auswirkungen auf den Zerspanungsprozess. Als direkte Folge kann sich eine gegenüber dem Schneidkantenradius geringere Spanungsdicke in Abhängigkeit des wahren Einstellwinkels κ_w ausbilden, sodass sich der effektive Spanwinkel γ_{eff} gegenüber dem Spanwinkel γ deutlich verkleinert. Aufgrund der Abhängigkeit der Spanungsdicke von dem Einstellwinkel ergeben sich entlang des Schneidenbogens unterschiedliche Spanwinkel.



Bild 9: Kontaktbedingungen beim Hartdrehen

In Abhängigkeit des Werkstückwerkstoffes und der Schneidengeometrie kann es im Bereich von kleinen Vorschüben zur Unterschreitung der minimalen Spanungsdicke h_{min} kommen. Wird wegen des zu geringen Vorschubes die minimale Spanungsdicke unterschritten, kommt es zu einem Quetschen bzw. Reißen der Werkstückoberfläche. Hommel ordnet in [17] das Unterschreiten der minimalen Spanungsdicke bei einem tatsächlichen Spanwinkel von $\gamma \le -50^{\circ}$ ein. Dagegen wird in [16] für den Übergang ein Bereich zwischen $\gamma \le -65^{\circ} \dots -75^{\circ}$ genannt. Aufgrund der Abhängigkeit der minimalen Spanungsdicke von verschiedenen komplexen Einflussgrößen beschreibt [17] die minimale Spanungsdicke in einem weiten Bereich von h_{min} \approx (0,2 bis 0,5)·r_s. Eine direkte Bestimmung ist jedoch nur empirisch über das plötzliche Ansteigen der Kraftverhältnisse bei abnehmender Spanungsdicke möglich.

Das Verhältnis des Schneidkantenradius r_s zu der mittleren Spanungsdicke h_m ist weiterhin ein wichtiges Beurteilungskriterium für die Aussage der Prozessstabilität. Bei einem Verhältnis r_s/h_m ≥ 1 ist der effektive Spanwinkel _{γeff} entscheidend; es gilt dabei _{γeff} < γ (Bild 9). Aufgrund des kleineren Spanwinkels steigen die Zerspankräfte an. Bei einem Verhältnis r_s/h_m ≈ 1 kann es aufgrund geringer Oberflächenunebenheiten zu unterschiedlichen Spanungsdicken kommen, die zu einem variierenden Spanwinkel führen. Als weitere Folge zeichnen sich stark schwankende Zerspankräfte ab, so dass zu Gunsten der Prozesssicherheit dieser Bereich unbedingt vermieden werden muss [17].

4.3.3 Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften

Aufgrund der Abbildung der Schneidenkante auf die Oberfläche ist es wichtig, dass sich die Schneide über die Bearbeitungszeit nicht verändert. Jeder Verschleiß an der Schneide führt zu einer größeren Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück. Vor allem der Freiflächenverschleiß bringt einen größeren Wärmeeintrag in die Oberfläche ein. Dadurch kann es zu einer ausgeprägten Randzonenbeeinflussung kommen, die bei gehärteten Werkstücken zu einer Neuhärtung der Oberfläche sowie zu einem Anlassen des darunterliegenden Gefügebereiches führen kann. Um ein Anlassen zu verhindern, ist in der Entscheidung über die einzusetzende Schneidengeometrie deren Verschleißverhalten mit zu berücksichtigen [15].

In den Untersuchungen über die Oberflächenausbildung in Abhängigkeit der Schneidenkantengeometrie [16] konnte festgestellt werden, dass für leicht verrundete und gefaste Werkzeuge keine direkte Abhängigkeit von der Kantengeometrie vorliegt. Jedoch gilt dies nicht für verschlissene bzw. stark verrundete Schneidkanten mit einem Schneidkantenradius von $r_s \ge 40 \ \mu\text{m}$. Daher wird für die Hochpräzisionshartdrehen empfohlen eine Begrenzung des Freiflächenverschleißes auf eine Verschleißmarkenbreite VB = 0,1 mm anzuwenden.

Neben der anwendungsgerechten Schneide kann das ultraschallunterstützte Spanen zu einer Verbesserung der Oberflächenrauheit führen. Bei dem ultraschallunterstützten Spanen wird eine hochfrequente, sinusförmige Schwingung dem Spanprozess überlagert. Mit dieser Überlagerung wird die Zerspankraft aufgrund eines aerodynamischen Schmiereffektes reduziert. Die verminderten Prozesskräfte führen zu einer geringeren elastischen und plastischen Verformung des Bearbeitungssystems, zu einer Reduzierung des Verschleißes am Werkzeug und somit zu einer verbesserten Oberflächengüte gegenüber der Nichtverwendung der Ultraschalltechnik [18].

Unter Beachtung der hier aufgeführten Problematiken und unter Nutzung geeigneter Maschinentechnik soll eine Verfahrenssubstitution spanender Verfahren mit geometrisch unbestimmter durch Verfahren mit bestimmter Schneide die geforderten Oberflächenrauheiten erreicht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die nachhaltige Verbesserung von Prozessen verlangt die Auseinandersetzung mit den Prozessschritten, die dem betrachteten Prozess vor- und nachgelagert sind bzw. sogar mit der gesamten Prozesskette. Um dies sicherzustellen, ist es zweckmäßig, zu Beginn der Untersuchungen Prozesskettenpläne zu erstellen und diese den Analysen zugrunde zu legen. Im Rahmen des Spitzentechnologieclusters "Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovation in der Produktionstechnik (eniPROD)" der TU Chemnitz und des Fraunhofer IWU Chemnitz wurden die Ablaufpläne in Form von "Metro"-Plänen erarbeitet. Diese Art der Darstellung erlaubt nicht nur die übersichtliche Darstellung der einzelnen Prozessschritte, sondern ermöglicht zusätzlich die Integration von Verfahrens- bzw. Prozessdaten. Die entwickelten Prozessablaufpläne dienen als Basis für die technologischen Untersuchungen und unterstützen im fortgeschrittenen Projektstadium die Zusammenführung der Untersuchungsergebnisse. Es ist angedacht, die Ablaufpläne weiter auszubauen, mit Daten zu füllen und in eine Software zu überführen.

Das Potenzial zur Verbesserung der Ressourceneffizienz in Umformprozessen wird exemplarisch am Gesenkschmiedeprozess dargestellt und entsprechende Untersuchungsansätze erläutert. Hinsichtlich der Ressourceneffizienz sind die zu untersuchenden Parameter keine typisch technischen Größen, sondern Flussparameter, wie beispielsweise Energie und Material. Nichtsdestotrotz sind technologische Verbesserungsansätze für den Gesenkschmiedeprozess auch für die Flussparameter gültig und werden in den geplanten Untersuchungen einen zentralen Aspekt darstellen

Die numerischen Untersuchungen zur Zerspansimulation haben gezeigt, dass durch die Prozessparameterwahl die Ressourcenbilanz des Zerspanprozesses entscheidend beeinflusst werden kann. So zeigte die Schnitttiefe einen dominanten Einfluss auf die Schnittkraft sowie auf die Nebenprodukte Span und Grat, welche den Nachbearbeitungsaufwand bestimmen. Bezüglich der Ressource Werkzeug (Standzeit) wurde die Schnittgeschwindigkeit als Haupteinflussparameter detektiert. Es zeigt sich, dass zur umfassenden numerischen energetischen Gestaltung noch Randparameter, wie beispielsweise Maschinenwirkungsgrade sowie energetische Größen zur Zerspanwerkzeugherstellung benötigt werden, um genaue Energie- und Ressourcenbilanzen zu erstellen. Diese Punkte sollen in kommenden Untersuchungen zur Zerspanung anhand des Verfahrens Bohren geklärt werden.

In der Endbearbeitung muss die geforderte Werkstückgeometrie bei einer Verfahrenssubstitution prozesssicher erzeugt werden. Das Verfahren Hartdrehen kann das Schleifen rotatorischer Powertrain-Komponenten unter Beachtung verfahrenstechnischer Bedingungen ersetzen. In Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter bildet sich dabei die Makro- bzw. die Mikrogeometrie der Werkzeugschneide auf der Werkstückoberfläche ab. Wegen der direkten Abbildung des Werkzeuges muss ein frühzeitiger Schneidenverschleiß verhindert werden. Daher werden verschiedene Beschichtungssysteme auf der Werkzeugschneide verwendet, sodass die geforderte Werkstückgeometrie erreicht wird. In weitergehenden Untersuchungen soll daher die gezielte Beeinflussung der Werkstückgeometrie mit einer ausgewählten Variation von Verfahrensparametern und Werkzeugschneiden analysiert werden.

6 Danksagung

Die Autoren danken dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) für die finanzielle Förderung der Arbeiten, die aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaates Sachsen erfolgte.

Quellen

- [1] International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook 2008. Paris, 2008
- [2] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft - Projektgruppe Nutzenergiebilanzen: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen –Deutschland, 2008
- [3] Neugebauer, R.: Ressourceneffizienz in der Produktion-JETZT! In: 9. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2008, Karlsruhe, 11./12. März 2008
- [4] Industrieverband Massivumformung: Branchenpräsentation der Massivumformung, 2008
- [5] VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH: Begriffsdefinition Ressourcen, www.vdi-zre.de/ressourceneffizienz-2.html, 01.04.2010
- [6] Degner, W.: Rationeller Energieeinsatz in der Teilefertigung, VEB Verlag, Berlin, 1986, ISBN 3-341-00039-9

- [7] Gundlach,C.: Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung, Dissertation, Universität Kassel, D, 2004, ISBN 3-89958-068-0
- [8] Klein, B.: Versuchsplanung DoE Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik, Oldenbourg Verlag München Wien, 2. Auflage, 2007, ISBN 978-3-486-58352-6
- [9] Schäfer, W.: Gratminimale Auslegung von zerspanprozessen auf Basis rechnergestützter Datenauswertung und FEM-Simulation, Dissertation, RTWH Aachen, 1998, ISBN 3-8265-4341-6
- [10] Pekelharing, A. J.: The Exit Failure in Interrupted Cutting, Annals of the CIRP, Vol.27/1 (1978); S.5-10
- [11] Link, R.: Gratbildung und Strategien zur Gratreduzierung bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, Dissertation, RTWH Aachen, Peter List Verlag, 1992
- [12] Attanasio, A., Fiorentino, A., Ceretti, E., Giardini, C.: Simulation of Abrasive and Diffuse Tool Wear in Oblique Cutting: Tool Geometry Updating and Experimanetal Validation, 12th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, May 7-8, Donstia San Sebastian, Spain, ISBN 978-84-608-0864-0
- [13] Vieregge, G., 1970, Zerspanung der Eisenwerkstoffe, 2.Auflage, Verlag Stahleisen
- [14] DE 102006024715 B4: Verfahren zum Bearbeiten der Lagersitze der Hauptund Hublager von Kurbelwellen sowie Werkzeugmaschinen zur Durchführung des Verfahrens / NILES-SIMMONS Industrieanlagen GmbH, . Naumann, Hans J. (24.07.2008)
- [15] Wobker, H.-G.: Hartbearbeitung, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 420, Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997, ISBN 3-18-342002-3
- [16] Jochmann, S: Untersuchungen zur Prozess- und Werkzeugauslegung beim Hochpräzisionshartdrehen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 19, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2001, ISBN 3-8265-9244-1
- [17] Hommel, B: Spanungsverhältnisse im Bereich der spanenden Endbearbeitung und deren Einfluss auf Kräfte, Rauheit und Standzeit, Dissertation, Karl-Marx-Stadt, 1982
- [18] Brecher, C., Klocke, F., Winterschladen, M., Heselhaus, M.: Ultraschallunterstütztes Hartdrehen für die Fertigung von gehärteten Präzisionsstahlbauteilen, Werkstatttechnik online, Jahrgang 96 (2006), Heft 6, S. 396- 401