



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMIERUNG DES DREHPROZESSES UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MECHANISCHEN UND ENERGETISCHEN MASCHINENEIGENSCHAFTEN

OPTIMIZATION OF TURNING REGARDING MECHANICAL AND POWER MACHINE
CHARACTERISTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. DAVID HOLÍK

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. MIROSLAV PÍŠKA

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. David Holík

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace procesu soustružení zohledňující mechanické a výkonové vlastnosti stroje

v anglickém jazyce:

Optimization of turning regarding mechanical and power machine characteristics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úvos a teoretický rozbor problému, literární rešerše.

Stanovení omezujících technologických podmínek z hlediska řezivosti nástroje, jeho zatěžování a dosahovaných kvantitativních a kvalitativních parametrů obrábění.

Stanovení technických podmínek realizace na daném obráběcím stroji (tuhost, stabilita)

Matematické řešení daného problému (analytické, grafické)

Technologická interpretace navrženého řešení.

Cíle diplomové práce:

Teoretický rozbor problému.

Stanovení omezujících technologických a technických podmínek.

Matematické řešení daného problému (analytické, grafické)

Technologická interpretace navrženého řešení.

Seznam odborné literatury:

TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno : CERM, 2006. s. 230. 1. vyd.. ISBN 80-214-2374-9.

SARDINAS, R.Q., SANTANA, M.R., BRINDIS, E.A. Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes. Journal Engineering Applications of Artificial Intelligence. Volume 19 Issue 2, March, 2006 Pergamon Press.

Dostupné na: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.81.7282>, dne 10.9.2010

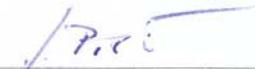
SRIKANTH, T. A KAMALA V. Optimization of Cutting Parameters in Turning. International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Volume 3, Number 5 (2008), pp. 725–73

EYNIYAN, M., ALTINTAS, Y. Chatter Stability of General Turning Operations with Process Damping”, Trans. ASME, J. Manufac. Sc. and Eng. , Volume 131:4, 2009, pp.1-10.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.


Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.1.2011



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu





prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

KURZFASSUNG

Die Industriebetriebe sind immer stärker gezwungen, die durchzuführenden Prozesse zu optimieren. Durch die stetig steigenden Energiekosten rücken die Reduktion des Energieverbrauchs und die damit verbundenen Senkungen der Produktionskosten immer mehr in den Fokus der Unternehmen. Diese Arbeit behandelt unterschiedliche Optimierungsansätze bezüglich des Energiebedarfs eines bestimmten Zerspanungsprozesses unter der Berücksichtigung der Werkzeugkosten und der Fertigungszeit. Der betrachtete Drehprozess ist eine Teiloperation zur Herstellung eines Kegelrollenlagers. Das Hauptziel dieser Arbeit ist die detaillierte Untersuchung des Energieverbrauchs der Drehmaschine. Anschließend werden aus den Detailanalysen Optimierungsansätze abgeleitet.

Schlüsselwörter

Energieeffizienz der Drehmaschine, Grundlast, Energie im Leerlauf, Gesamtenergieverbrauch der Drehmaschine, Schnittenergie, Fertigungskosten.

ABSTRACT

Manufacturing companies are increasingly compelled to optimize their machining processes for various reasons, such as improved cost effectiveness, tighter regulations and marketing advantages. Increasing energy costs in particular shift the reduction of energy consumption and the cost effectiveness of the production method more into the focus of corporate strategy. This is done by using the example of a turning process for the production of a tapered roller bearing. The main goal of this thesis can be identified as a detailed investigation of the energy consumption of certain turning machine. Further, different optimization approaches regarding energy efficiency are introduced taking under consideration tooling costs and machining time.

Key words

Energy efficiency of turning machines, basic load, energy in idle process, total energy consumption of turning machines, cutting energy, production costs.

ABSTRAKT

Průmyslové podniky jsou stále více nuceny optimalizovat stávající výrobní procesy. Vzhledem k neustále rostoucí ceně energií roste zájem výrobních podniků snižovat spotřebu energie a s tím souvisejících výrobních nákladů. Tato práce hodnotí různé přístupy k optimalizaci energetické spotřeby konkrétního procesu obrábění a zohledňuje náklady na nástroj a výrobní čas. Zkoumaný proces soustružení představuje dílčí operaci pro výrobu kuželíkového ložiska. Cílem této práce je detailní analýza spotřeby energie soustruhu. V této analýze jsou rozděleny a zohledněny veškeré části procesu jednoho výrobního cyklu v hlavním a vedlejším výrobním čase. Následně bude z této analýzy odvozena optimalizace zkoumaného procesu.

Klíčová slova

Energetická účinnost soustruhu, základní zatížení stroje, energie při běhu naprázdno, celková energetická spotřeba soustruhu, řezná energie, výrobní náklady.

BIBLIOGRAFISCHE ZITATION

HOLÍK, David. Optimierung des Drehprozesses unter Berücksichtigung der mechanischen und energetischen Eigenschaften: *Diplomarbeit*. Brno: VUT v Brně, Fakultät für Maschinenwesen, 2011. Leiter *Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.*

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Datum

.....
David Holík

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Univ. Prof. DI Dr. tech Friedrich Bleicher und bei Univ. Prof. DI. Miroslav. Píška bedanken, die es mir ermöglicht haben, dieses interessante Thema im Rahmen einer Diplomarbeit zu bearbeiten.

Ganz besonders möchte ich mich bei DI Christoph Dorn und DI Georg Geiger für die großzügige Unterstützung bei der Durchführung der Diplomarbeit bedanken.

Weiters sei auch allen anderen Mitarbeitern des Instituts für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik an TU Wien, die mich durch ihre Hilfe- und Einsatzbereitschaft unterstützt haben, gedankt.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	3
Eidesstattliche Erklärung.....	5
Danksagung	6
Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
2 Werkzeugmaschine	11
2.1 Allgemeine konstruktive Anforderungen an WZM	12
2.2 Eigenschaften von Werkzeugmaschinen	12
2.2.1 <i>Energetisches Verhalten</i>	13
2.3 Einzelwerkzeugmaschinen	18
2.4 Drehmaschinen	19
2.4.1 <i>Drehmaschinen mit vertikaler Spindel</i>	21
3 Bearbeitungsprozess	24
3.1 Grundlagen der Zerspanung	24
3.1.1 <i>Zerspanungstheorie</i>	24
3.1.2 <i>Spanbildungsarten und Spanklassen</i>	27
3.1.3 <i>Verschleiß</i>	29
3.1.4 <i>Kräfte und Leistung</i>	31
3.2 Drehen	33
3.2.1 <i>Drehverfahren</i>	34
3.2.2 <i>Drehwerkzeuge</i>	35
3.2.3 <i>Zeitberechnung</i>	36
4 Ist-stand des Drehprozesses	38
4.1 Beschreibung der Drehmaschine	38
4.2 Beschreibung des Drehprozesses	39
4.2.1 <i>Rohteil</i>	39
4.2.2 <i>Drehprozess</i>	39
4.2.3 <i>Werkzeuge</i>	39
4.3 Zusammenfassung des IST-Bestands	39
5 Messtechnische Beschreibung des bestehenden Drehprozesses	40
5.1 Spezifische Schnittkraftermittlung	40
5.2 Untersuchung der Werkzeuggeometrie.....	46
5.2.1 <i>Berechnung der Schnittleistung</i>	46
5.3 Messung der Leistungsaufnahme	48
5.3.1 <i>Messung der Leistungsaufnahme (Maschine 1)</i>	49
5.3.2 <i>Messung der Leistungsaufnahme (Maschine 2)</i>	50
5.4 Ermittlung der Standzeitkurve	51
6 Modifikation des Prozesses unter berücksichtigung der Ziele	53
6.1 Modifikation der Maschinendynamik.....	53
6.1.1 <i>Änderung der Fertigungsfolge</i>	54
6.1.2 <i>Einsatz von unterbrochenem Vorschub</i>	54
6.1.1 <i>Einsatz der Kreisinterpolation beim Span-zu-Span Vorgang</i>	54
6.2 Optimierung der Schnittparameter	55
7 Zusammenfassung und Ausblick	58
Quellenverzeichnis	60
Abbildungsverzeichnis	62
Tabellenverzeichnis	64

Abkürzung- und Symbolverzeichnis65

1 EINLEITUNG

In den letzten Jahrzehnten verzeichnete die Fertigungstechnik eine hochdynamische Entwicklung. Die Wirtschaftskrise der letzten Jahre und die zunehmende weltweite Konkurrenz haben diese Entwicklung noch verstärkt. Produzierende Unternehmen stehen aus diesem Grund vor der Herausforderung, ihre Bearbeitungsprozesse kontinuierlich hinsichtlich Qualität und Kosten zu optimieren. Der technische Direktor von SEW Eurodrive Johann Soder definiert die Innovationsnotwendigkeit folgendermaßen: „Für mich ist der heutige Zustand immer der Schlechteste. Ohne radikale Veränderungen entsteht keine Kreativität für eine erfolgreiche Zukunft.“ [1] Durch die stetig steigenden Energiekosten rücken die Reduktion des Energieverbrauchs und die damit verbundenen Senkungen der Produktionskosten immer mehr in den Fokus der Unternehmen. Entscheidend für einen effizienten Energieeinsatz ist hierbei in erster Linie die Kombination der Werkzeugmaschine und des durchgeführten Prozesses. Die effiziente Nutzung von Energie trägt nicht nur zur Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens bei, sondern erhöht auch den Klimaschutz.

Die Energieaufnahme eines Herstellungsprozesses lässt sich oftmals mittels einer Reduzierung der Fertigungszeit oder mittels einer Steigerung der Energieeffizienz einer Werkzeugmaschine bei sinkender Leistungsaufnahme realisieren. Eine zeitoptimale Bearbeitung von Werkstücken wird zum Beispiel durch kürzere Bearbeitungszeiten, durch höhere Standzeiten des Werkzeugs beziehungsweise durch Verkürzung der Nebenzeiten erzielt. Eine Optimierung der Leistungsaufnahme lässt sich mittels Änderung der Prozessparameter, wie zum Beispiel die Änderung des Schnittparameters, oder durch die Reduzierung der Grundlast der Werkzeugmaschine (WZM), zum Beispiel durch Deaktivierung von nicht verwendeten Nebenaggregaten und Spindeln, erzielen. Beide erwähnten Methoden erfordern eine detaillierte Kenntnis des Maschinenverhaltens. Die Werkzeugmaschine wird dabei als geschlossenes System angesehen, in welchem Material (in Form von Rohteilen und Werkzeugen) unter Einsatz von Energie und Bearbeitungsinformationen eine Wertschöpfung in Form der Fertigteile und Nebenprodukte, wie Späne und Abwärme, erfährt (Abbildung 1.1).

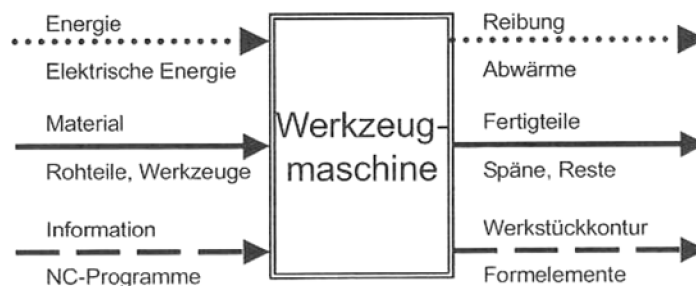


Abbildung 1.1 Werkzeugmaschinen als technisches System [5].

Diese Arbeit behandelt unterschiedliche Optimierungsansätze bezüglich des Energiebedarfs eines bestimmten Zerspanungsprozesses unter der Berücksichtigung der Werkzeugkosten und der Fertigungszeit. Der betrachtete Drehprozess ist eine Teiloperation zur Herstellung eines Kegelrollenlagers. Ein Kegelrollenlager, welches aus einem Außen- und einem Innenring sowie

aus Rollen besteht. Die Rohteile, die eingesetzten Werkzeuge, die Schnittparameter und das Endprodukt sind auf allen in dieser Arbeit betrachteten Drehmaschinen annähernd gleich. Daher werden die Drehmaschinen und der darauf durchgeführte Drehprozess untersucht.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die detaillierte Untersuchung des Energieverhaltens der WZM entlang des gesamten Drehprozesses unter Berücksichtigung des Belade- und Entladeprozesses des Werkstücks. Dabei wird mittels messtechnischer Analysen der Ist-Stand erfasst. Anschließend werden die ausgewerteten Daten in einer Bewertungsmatrix verglichen und die Optimierungsansätze definiert. Die durchgeführte Modifikation des Drehprozesses soll nicht nur zur Reduzierung der Energiekosten, sondern auch zur Senkung der Fertigungskosten bei gleicher bzw. besserer Qualität des Fertigteils führen.

2 WERKZEUGMASCHINE

Die Werkzeugmaschinen werden definiert als „mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen“. Sie werden als Elemente von Fertigungsanlagen verstanden [8].

Die Abbildung 2.1 zeigt verschiedene Fertigungssysteme nach dem Automatisierungsgrad. Den Kern bildet die Maschine mit ihrer Mechanik und den Antrieben zur Erzeugung der verfahrensbedingten Arbeits- (Hauptspindel) und Vorschubbewegung (Vorschubachsen). In der nächsten Schale findet man die für den automatischen und programmierbaren Ablauf erforderliche NC-Steuerung. Damit wird die Maschine zur NC-Maschine. Besitzt die Maschine eine automatische Werkzeugwechseleinrichtung und einen Werkzeugspeicher, so spricht man von einem Bearbeitungszentrum. In einer flexiblen Fertigungszelle werden ein oder mehrere Bearbeitungszentren über ein Handlingsystem (z.B. Roboter) aus einem Werkstückspeicher bestückt. Größere Anlagen, bei denen mehrere Bearbeitungszentren über ein flexibles Transportsystem mit einem Materiallager und teilweise auch mit einem Werkzeuglager verkettet werden, bezeichnet man als flexible Fertigungssysteme (FFS). In der Großserienfertigung kommen häufig weniger flexibel automatisierte Mehrmaschinensysteme zum Einsatz, wie z.B. Rundtaktmaschinen oder Transferstraßen. Letztere bestehen aus Einzelbearbeitungssystemen, die zunehmend aus miteinander verketteten NC-gesteuerten Maschineneinheiten oder Bearbeitungszentren bestehen [8].

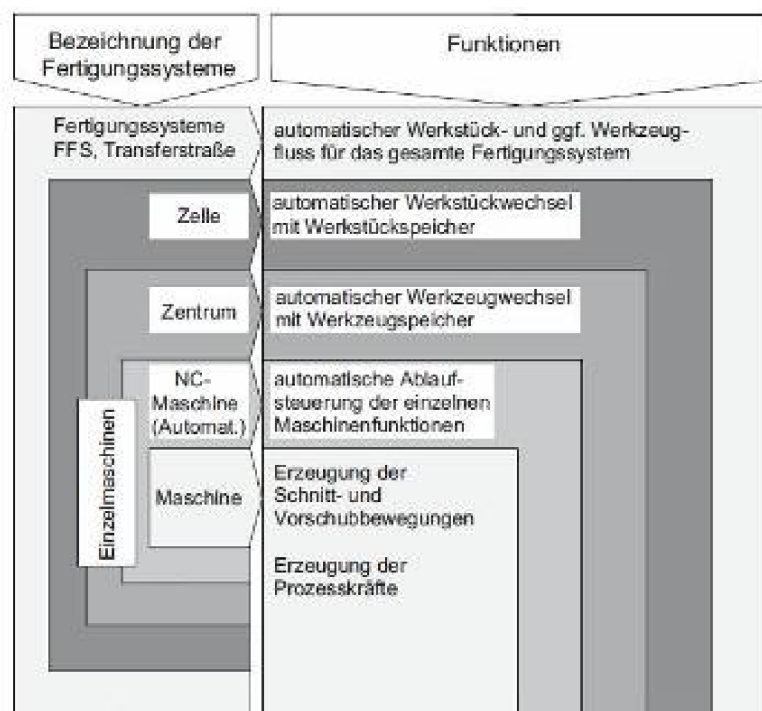


Abbildung 2.1 Bezeichnung der Fertigungssysteme nach dem Automatisierungsgrad [8].

2.1 Allgemeine konstruktive Anforderungen an WZM

An Werkzeugmaschinen werden nicht nur höchste Anforderungen bezüglich der Durchführung des technologischen Verfahrensablaufs gestellt. Es ist, zusätzlich zu ihrem rationellen Einsatz, die wirtschaftliche Arbeitsweise (Anforderungen an Steuerung und Organisation) sicherzustellen. Die Maschinen müssen darüber hinaus allen behördlichen Vorschriften, besonders den Sicherheitsvorschriften, entsprechen. Wie in Abbildung 2.2 gezeigt, haben diese Anforderungen und Restriktionen Einfluss auf die konstruktive Gestaltung der Maschine, wie:

- Genauigkeit (geometrisch, kinematisch) bei statischer, dynamischer und thermischer Belastung,
- Festigkeitsverhalten stark belasteter Maschinenteile (insbesondere bei Umformmaschinen),
- Automatisierung der Maschinenfunktionen einschließlich des Materialflusses,
- Sicherheit der Gesamtanlage (CE - Zeichen),
- Umweltverhalten (Geräusche, Staub, aggressive Medien) [8].

Die an der Bearbeitungsstelle der Maschine auftretenden genauigkeitsbeeinflussenden Verformungen werden durch das statische, dynamische und thermische Verhalten sämtlicher im Kraftfluss liegender Baugruppen beeinflusst. Die Fertigungsgenauigkeit, die Oberflächengüte der Werkstücke sowie die ausnutzbare Maschinenleistung und die daraus resultierende Produktivität hängen von diesen Maschineneigenschaften ab. Darüber hinaus wird der wirtschaftliche Einsatz durch den Automatisierungsgrad bestimmt. Die Automatisierung beschränkt sich nicht nur auf den Ablauf des eigentlichen Bearbeitungsprozesses, sondern auch auf die Beschickung der Maschinen, d. h. auf die Ver- und Entsorgung mit Werkstücken, Werkzeugen und Spänen [8].

Die durch die behördlichen Vorschriften bestimmten Vorgaben für die Sicherheit und das Umweltverhalten der Maschinen spielen eine zunehmend größere Rolle. Ihr Ziel liegt darin, die Unfallhäufigkeiten zu senken und die Arbeitsplätze menschenwürdiger zu gestalten. Weiterhin ist der ökologische Aspekt von zunehmender Relevanz. Diese Bemühungen beeinträchtigen z. T. die Produktivität und die Wirtschaftlichkeit der Maschinen, so dass hier Kompromisse zu schließen sind bzw. besondere Weiterentwicklungen notwendig werden [8].

2.2 Eigenschaften von Werkzeugmaschinen

Die Maschineneigenschaften wie Arbeitsgenauigkeit, Leistungsvermögen, Umweltverhalten und Zuverlässigkeit beeinflussen wesentlich die Qualität der gefertigten Produkte und die Wirtschaftlichkeit der Fertigung. Die Abbildung 2.2 zeigt, dass diese Faktoren vor allem von den geometrischen, als auch von den kinematischen, statischen, thermischen und dem Geräuschverhalten abhängig sind [9].

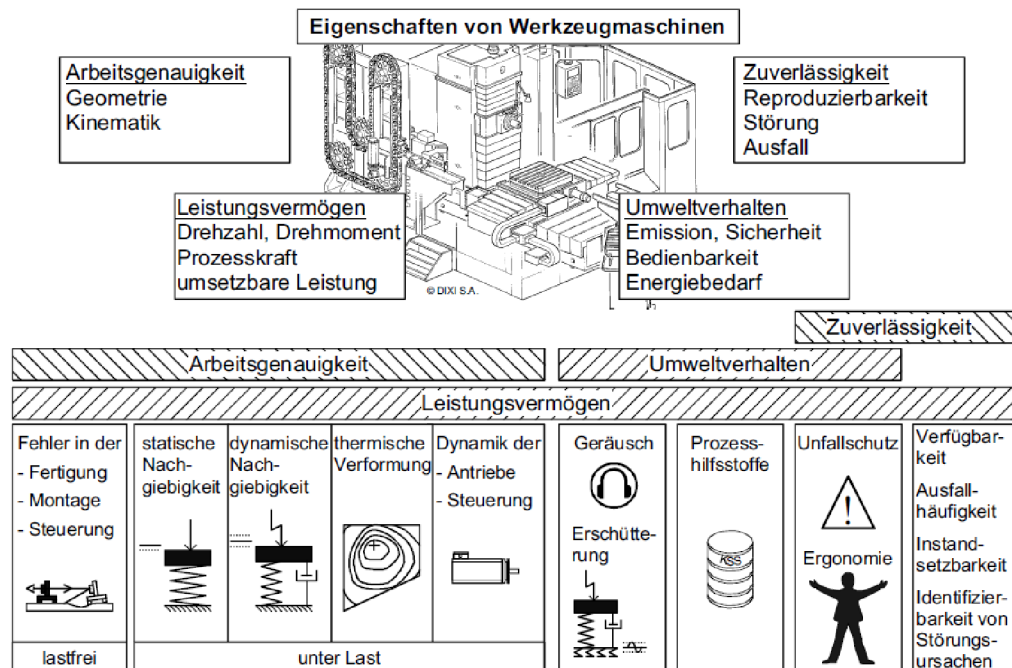


Abbildung 2.2 Zu beurteilende Eigenschaften von Werkzeugmaschinen [9].

Eine vollständige Beschreibung der Maschineneigenschaften im Zuge der Arbeit setzt jedoch die Kenntnis energetischen Verhaltens voraus.

2.2.1 Energetisches Verhalten

Neben dem bisher betrachteten statischen und dynamischen Verhalten von Werkzeugmaschinen rückt das energetische Verhalten immer mehr in den Vordergrund. Natürlicherweise müssen die statischen und dynamischen Anforderungen an Werkzeugmaschinen weiterhin vom Hersteller erfüllt werden. Es ist aber Tatsache, dass sich die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen immer mehr zu einem Kaufargument entwickelt und es somit auch im Interesse der Hersteller liegt, Werkzeugmaschinen energetisch verstehen zu lernen und zu untersuchen.

Das energetische Verhalten eines Bearbeitungsprozesses lässt sich durch den Energieerhaltungssatz beschreiben: „Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems ändert sich nicht über die Zeit und bleibt somit konstant. Zwar kann die Energie in verschiedenen Energieformen umgewandelt werden, es ist jedoch nicht möglich, innerhalb eines abgeschlossenen Systems Energie zu erzeugen oder zu vernichten.“ Die Abbildung 2.3 zeigt ein Energiemodell der Bearbeitung in einem abgeschlossenen System der WZM. Diese Untersuchung wird in der Literatur oftmals als energetischer „Footprint“ bezeichnet, welcher in einer angedachten Norm (ISO 14955 series, environmental evaluation of machine tools) seinen besonderen Nutzen finden wird.

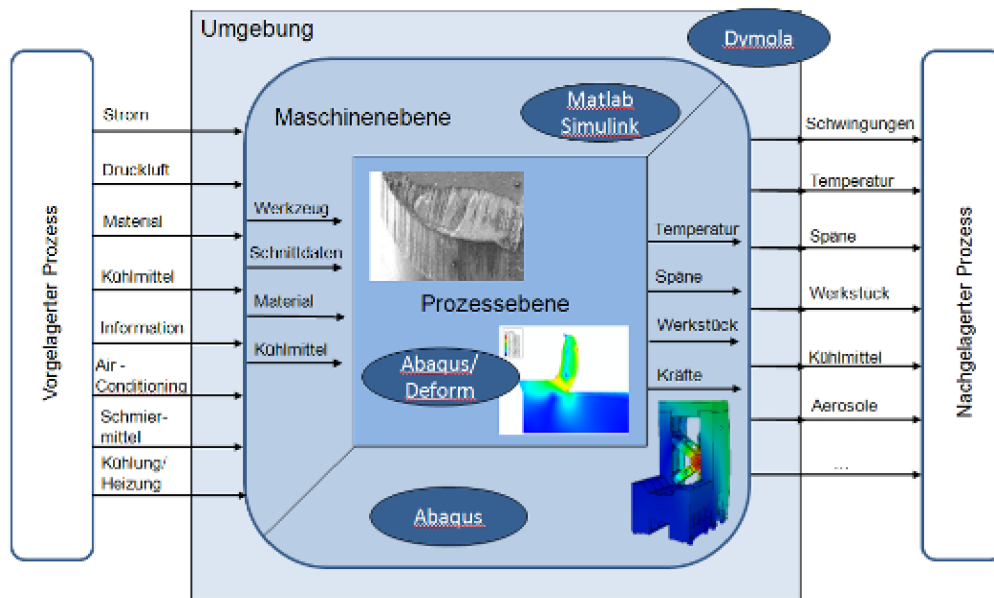


Abbildung 2.3 Energieflüsse entlang der Fertigungskette. [2]

Die Eintrittsenergie E_e (Energie elektrischer Leistung, Druckluft und Hydraulik) wird in mechanische Energie der Werkzeugmaschine und in Verlustenergie in Form von Abwärme und Reibung umgewandelt. Die mechanische Energie der Werkzeugmaschine umfasst die Maschinenbewegungen (Arbeitsgänge, Eilgang, Spindeldrehen usw.) und die dazugehörigen Funktionen wie z.B. die Kühlschmierstoffzulieferung. Die Summe dieser Energien wird als gesamte Energie der WZM E_m bezeichnet, und es gilt, dass die Gesamtenergie der WZM E_m und die Eintrittsenergie E_e gleich sind ($E_m \approx E_e$). Anschließend wird der Energiebedarf eines Bearbeitungsprozesses auf folgende Verbrauchergruppen verteilt:

- mechanische Energie des CNC-Steuerungspakets mit Hauptspindel E_{vc} und Vorschubantrieb E_{vf} ,
- Energie der Kühlschmierstoffaufbereitung E_{KSS} ,
- Energie der Druckluftherzeugung E_{AIR} ,
- Nebenenergie E_{NE} wie z.B. die Energie der elektrisch gespeisten Nebenaggregate der Maschine, sowie die anteilig einzurechnende Energie zur Beleuchtung, Lüftung und Klimatisierung der Fertigungshalle.

In Gleichung 2.1 werden alle Energieeinflüsse am Bearbeitungsprozess zusammengefasst.

Energieerhaltungssatz bei spanender Bearbeitung:

$$E_e \approx E_m = \sum_1^i E_i = E_{vc} + E_{vf} + E_{KSS} + E_{AIR} + E_{NE} \quad (2.1)$$

Da eine direkte Energiemessung aller Einflüsse in der Praxis aufwendig wäre, wird die Gesamtanschlussleistung der WZM P_m während der Zerspanung gemessen. Eine solche Leistungskurve lässt sich, wie Abbildung 2.4 zeigt, analysieren und die Teilleistungen kategorisieren. Die Leistung einer WZM wird durch eine Vielzahl an eingeschalteten Komponenten beeinflusst.

Nachfolgend wird die entsprechende Energie mittels des Integrals über die jeweilige Zeitdauer bestimmt.

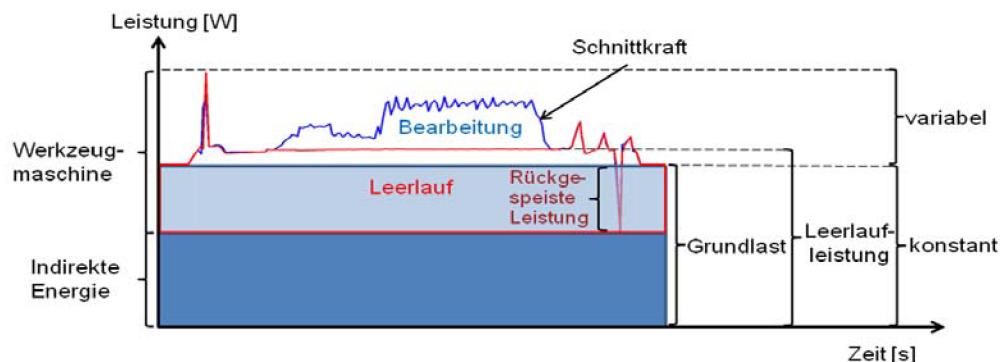


Abbildung 2.4 Aufteilung der gesamten Leistung der WZM, bearbeitet nach [2].

Nach der Aufteilung in Abbildung 2.8 werden die folgenden Leistungen gemessen:

a) Grundlast P_b

Die Grundlast P_b stellt die niedrigste Leistungsaufnahme einer WZM während der Stillstandzeit dar. Als Grundlast der WZM wird die kumulierte Leistung aller im Stillstand eingeschalteten Aggregate verstanden. Dies sind vor allem der Einfluss aller eingeschalteten Antriebe der WZM und der Einfluss der Peripherie, wie z.B. die Beleuchtung und die Raumluftechnik. Bei einem abgeschlossenen System ist der Einfluss der Beleuchtung und der Raumluftechnik vernachlässigbar, so dass die Grundlast P_b lediglich der Leistung von allen eingeschalteten Antrieben während der Stillstandzeit entspricht.

b) Leistung im Leerlauf P_{nol}

Die Leistung im Leerlauf P_{nol} entspricht dem Wert der Gesamtleistung der WZM P_m während eines Leerlaufs. Bei den Bewegungen bzw. der Rotation der Spindel oder Achsen der WZM wird zur konstanten Grundlast P_b die Leistung der Spindel und der Achsen addiert. Wenn diese summierte Leistung im Leerlauf bei einer Schnitttiefe von $a_p=0$ entsteht, d.h. es entsteht kein Span, spricht man über die sog. variable Leistung im Leerlauf P_{nol} .

c) Gesamtleistung der WZM P_m

Die Gesamtleistung der WZM P_m stellt die größte Leistungsaufnahme während der Bearbeitung bei einer Schnitttiefe von $a_p>0$.

d) Differenzleistung P_d

Die Differenzleistung stellt die nötige Leistung für die Spanbildung dar und wird als Differenz der Gesamtleistung P_m ($a_p>0$) und der Leistung im Leerlauf P_{nol} ($a_p=0$) bestimmt.

e) Wirkleistung P_e

Die nötige Leistung für die Spanbildung kann auch theoretisch als Wirkleistung P_e bestimmt werden. Dann gilt, dass diese aus der Literatur errechnete Wirkleistung P_e der aus den Leistungsmessungen resultierenden

Differenzleistung P_d entspricht. Da beim Drehen der Einfluss der Vorschubleistung P_f vernachlässigbar ist, wird anstatt der Wirkleistung P_e die Schnittleistung P_c verwendet.

Die Abbildung 2.5 stellt die gemessenen Leistungen und Energien bei einem Drehprozess dar.

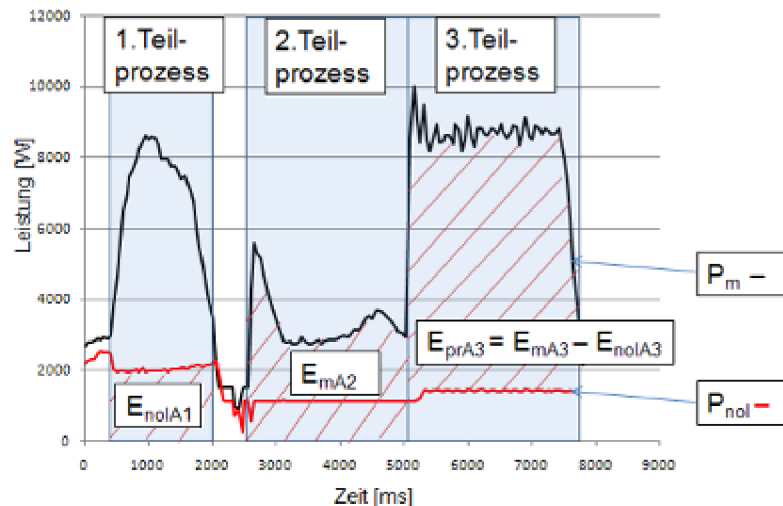


Abbildung 2.5 Leistungsverlauf und Energieparameter während des Außendrehens.

Eine effektive Ausnutzung der Werkzeugmaschine während des Bearbeitungsprozesses wird mittels des Maschinenfaktors, des sogenannten Energieeffizienzfaktors η_E , bewertet. Dieser beschreibt das Verhältnis der nötigen Energie für die Spanbildung E_d bzw. E_c zur gesamten Energie der Werkzeugmaschine E_m . Wird für die Berechnung des Energieeffizienzfaktors die gemessene Differenzenergie E_d verwendet (Gleichung 2.2), so spricht man vom sogenannten Energieeffizienzfaktor des Bearbeitungsprozesses η_{Ed} . Wird dieser Faktor mittels der theoretisch berechneten Spanbildungsenergie (Gleichung 2.3) berechnet, so spricht man von der Energieeffizienz der Schnittenergie η_{Ec} .

Berechnung der Energieeffizienz des Bearbeitungsprozesses:

$$\eta_E = \frac{E_d}{E_m} = \frac{E_m - E_{nol}}{E_m} \quad (2.2)$$

Berechnung der Energieeffizienz der Schnittenergie:

$$\eta_E = \frac{E_c}{E_m} = \frac{\int P_c dt}{E_m} \quad (2.3)$$

Die Bewertung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Kosten zeigt, dass letztlich die größten Einsparpotenziale aller an einem Bearbeitungsprozess beteiligten Verbräuche bei der elektrischen Energie zu erzielen sind (Abbildung 2.6). Für die am IFT analysierten Maschinen, bei denen Messungen im Leerlauf und während des Zerspanungsprozesses erstellt wurden, gilt, dass die Differenzleistung P_d bzw. Schnittleistung P_c in

Abhängigkeit des zu zerspanenden Materials gerade einmal 5% bis 25% der Gesamtleistung P_m ausmacht [2].

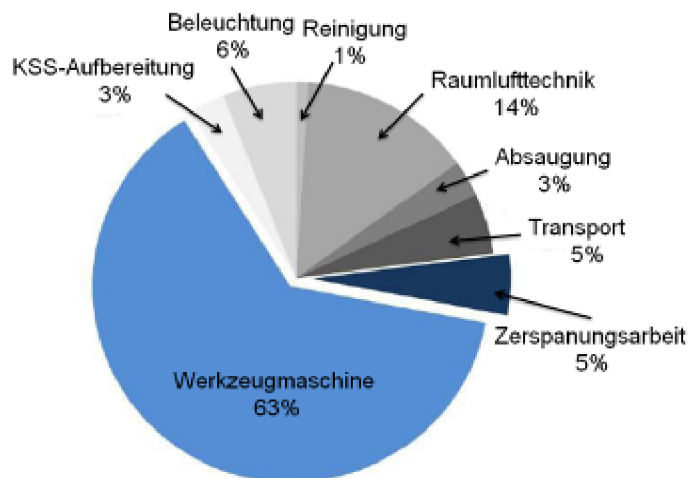


Abbildung 2.6 Exemplarische energetische Kostenverteilung eines Bearbeitungszentrums. [4]

Werkzeugmaschinen weisen zahlreiche Antriebe und Hilfsaggregate auf (Abbildung 2.7), deren Energieaufnahme während einer Bearbeitung stark schwanken kann. Die Verflechtung der Einzelkomponenten und Aggregate einer Werkzeugmaschine mit den Aspekten der Produktivität und Qualität ist eng. Die Grundlast wird maßgeblich von den Nebenaggregaten einer Maschine bestimmt. Die Energieeffizienz einer Antriebskomponente ist abhängig vom Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Leistung und spiegelt sich somit im Wirkungsgrad wieder. Die Komponenten des Antriebs einer Werkzeugmaschine setzt elektrisch aufgenommene in abgegebene mechanische Leistung um. Zu den Komponenten des Antriebsverbands zählen ein Versorgungsmodul, die Antriebsmodule, die Motoren und natürlich die zugehörigen mechanischen Komponenten. Die Vorschubantriebe gehen nur mit einem geringen Anteil in die Gesamtleistung der CNC ein und können daher die Energieeffizienz nur geringfügig steigern. Im Gegensatz dazu kann sich die Wahl der Hauptspindel spürbar auf die Energiebilanz auswirken. Arbeitet ein Hauptspindeltrieb weit unterhalb vom Nennbetriebspunkt, so erhöhen sich anteilig die Eigenverluste des Antriebs mit negativen Folgen auf die Energieeffizienz. Ein Potential zur effizienteren Gestaltung liegt auch in der Berücksichtigung des Wirkungsgrades von Spindelmotoren. [3]

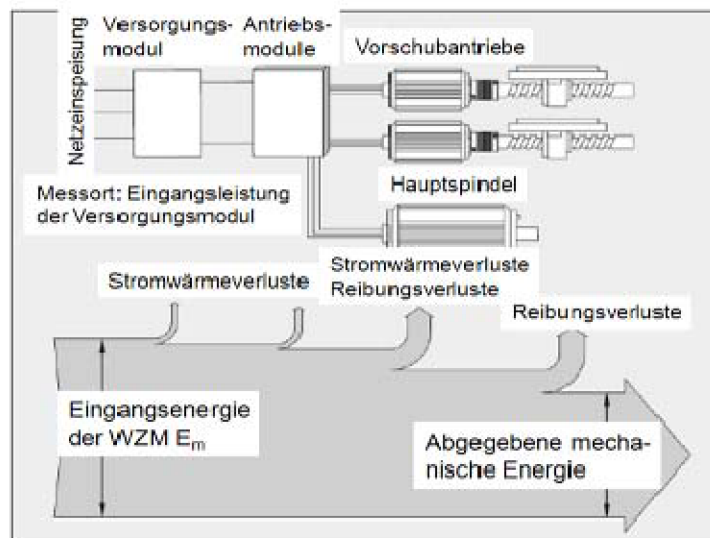


Abbildung 2.7 Graphische Darstellung der Energieeffizienz der Antriebskomponenten [3].

Die Erhöhung der Energieeffizienz η_E wird mittels folgender Ansätze ermöglicht:

- Deaktivierung von nicht verwendeten Nebenaggregaten und Spindeln,
- trockene Bearbeitung,
- Technologieänderung,
- Einsatz von rückspeisefähigen Versorgungsmodulen,
- Reduzierung der Nebenzeiten (Rüst- und Einrichtzeiten),
- Einsatz von energieeffizienten Motoren als Nebenaggregate,
- Reduktion der Grundlast über ein Energiemanagement. (Dabei werden Verbraucher in nichtproduktiven Phasen gezielt von der Maschinensteuerung deaktiviert),
- Effizienz von rückspeisefähigen Versorgungsmodulen,
- usw.

Die Optimierung des Energieeinsatzes geschieht stets im Spannungsfeld der Werkzeugmaschinen. Zu diesen Eigenschaften zählen die mechanischen Struktureigenschaften, insbesondere das Leistungsvermögen, die Arbeitsgenauigkeit, die Zuverlässigkeit sowie das Umweltverhalten [2].

2.3 Einzelwerkzeugmaschinen

Nach DIN 69651 wird bei Werkzeugmaschinen zwischen solchen für die Holz-, Metall- und die Bearbeitung anderer Stoffe unterschieden. Fertigungsverfahren werden nach DIN 8580 unterteilt, wie es in Abbildung 2.8 ersichtlich ist [8]. In dieser Arbeit wird hauptsächlich das Drehen als Trennverfahren behandelt.

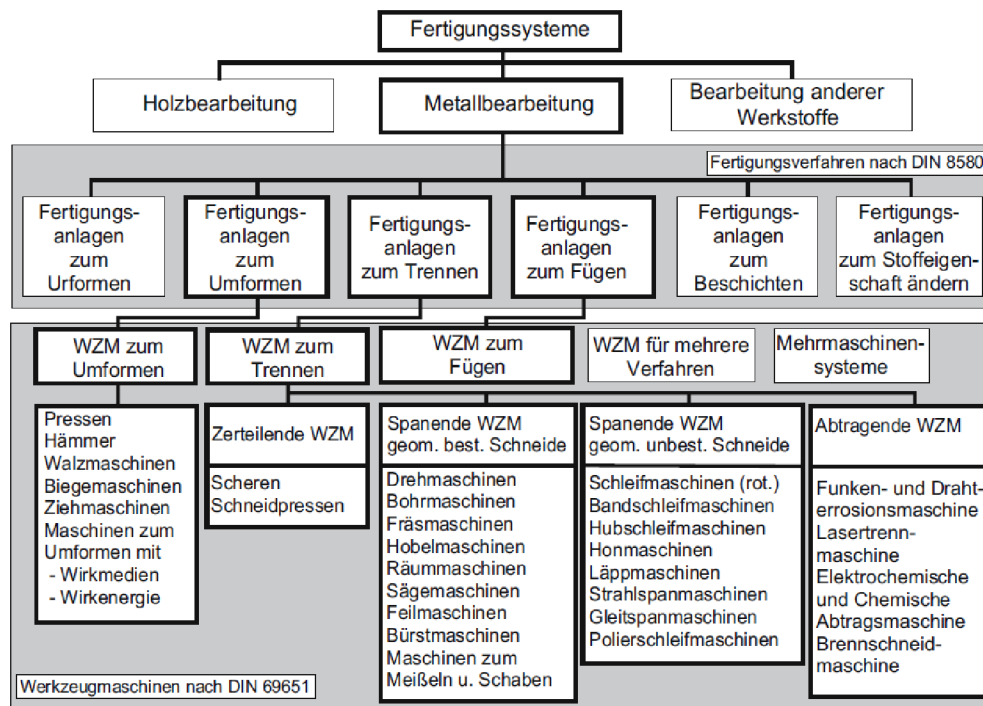


Abbildung 2.8 Gliederung der Werkzeugmaschinen [8].

2.4 Drehmaschinen

Drehmaschinen sind Werkzeugmaschinen, auf denen hauptsächlich rotationssymmetrische Werkstücke hergestellt werden. Die Schnittbewegung wird dabei hauptsächlich durch die Rotation des Werkstücks erzeugt. Drehmaschinen sind heutzutage vielfach mit Zusatzfunktionen ausgerüstet, mit denen auch fräsende und bohrende Bearbeitungsoperationen parallel, senkrecht oder sogar in beliebigen Winkeln zur Werkstückachse sowie eine Rückseitenbearbeitung durchgeführt werden können. Die wichtigsten konstruktiven Komponenten und Bauformen von Drehmaschinen sind in Abbildung 2.9 zusammengefasst [8].

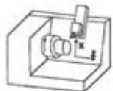

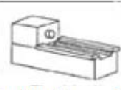













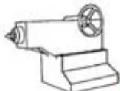





Bettformen	 Spindel parallel zum Fundament	 Spindel senkrecht zum Fundament			
relative Lage zwischen Werkzeug und Werkstück	 Flachbett	 Schrägbett	 Frontbett	 Ständer	 Vertikalspindelbett
Kreuzschlittenbauformen für	 Flachbett	 Schrägbett	 Frontbett	 Vertikalspindel	
Werkzeugträger	 Meisselhalter	 Flachtischrevolver	 Sternrevolver	 Kronenrevolver	 Trommelrevolver
Hilfseinrichtungen	 Reitstock	 Lünette	 Werkstückspannung		
Beschickungsmöglichkeiten	 Belader	 Handhabungsroboter			

Abbildung 2.9 Konstruktive Komponenten und Bauformen von Drehmaschinen [8].

Arten von Drehmaschinen:

- *Horizontale Flachbettdrehmaschinen* werden immer dort eingesetzt, wo hohe Maschinensteifigkeiten benötigt werden.
- Die *Schrägbettbauweise* ermöglicht einen schnellen Abtransport der heißen Späne und des Kühlschmiermittels, so dass hier die Gefahr einer thermischen Verformung des Maschinenbettes gegenüber anderen Bauformen geringer ist. Lange Werkstücke werden von einem Reitstock mit einer Körnerspitze abgestützt.
- *Frontbettdrehmaschinen* eignen sich besonders gut für die Bearbeitung von Futterteilen mit automatisiertem Werkstückwechsel. Eine Bauform mit vertikal angeordneter hängender Spindel bietet sowohl den Vorteil eines günstigen Werkstückwechsels (das Futter kann die Werkstücke direkt von einer Palette greifen und nach der Bearbeitung auf diese zurücklegen) als auch eines günstigen Späneabtransports.
- *Senkrechtdrehmaschinen* in Ständerbauweise können auf ihrem rotierenden Werkstücktisch (Planscheibe) große dünnwandige Bauteile aufnehmen (Abbildung 2.10) [8].

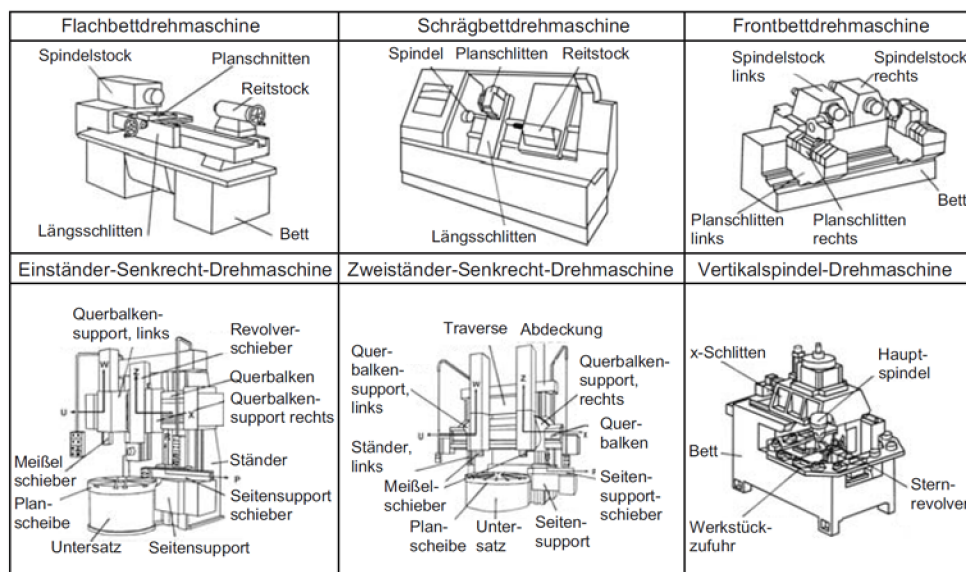


Abbildung 2.10 Systematik der Drehmaschinen-Bauformen. [8]

Die wichtigsten Arten von Drehmaschinen sind die Universaldrehmaschine (bzw. Werkstattmaschine), Drehautomaten (Mehrschlitten-Einstechautomaten, Mehrspindel-Drehautomaten), Drehmaschinen mit vertikaler Spindel, waagrechte Großmaschinen, Senkrechtdrehmaschinen, Ultrapräzisionsdrehmaschinen und Kombinationsdrehmaschinen (Dreh-Fräs Zentrum, Dreh-Schleif Zentrum). Die Werkzeugmaschinen für die zu untersuchende Bearbeitung werden in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

2.4.1 Drehmaschinen mit vertikaler Spindel

Gegenüber den Drehmaschinen mit horizontaler Spindel fallen die Späne bei Drehmaschinen mit vertikal hängend angeordneter Spindel durch die Schwerkraft ungehindert in die Entsorgungseinrichtungen und verbleiben dadurch nur kurz im Bearbeitungsraum. Der thermische Einfluss der oft heißen Späne auf die Maschinenstruktur kann so weitgehend vermieden werden. Ein weiteres Kriterium bei den in Serienfertigung eingesetzten Maschinen ist die Be- und Entladung der Werkstücke. Häufig werden dabei zusätzliche Handhabungsgeräte in Form von Robotern oder Portalladern erforderlich, die die Werkstücke zur bzw. von der Bearbeitungsposition befördern oder zwischen den Bearbeitungsgängen oder -stationen bewegen. Bei Senkrechtdrehmaschinen nutzt man aber in der Regel die Achsbewegung der Hauptspindel für die Werkstückhandhabung [8].

Abbildung 2.11 zeigt den Arbeitsraum der Maschine. Zur Drehbearbeitung wird das Werkstück an den ortsfest auf dem Tisch befestigten Werkzeugen vorbeigeführt. Es können auch angetriebene Werkzeuge zum Bohren und Fräsen auf der Tischplatte angebracht werden. Durch die große Bewegungsfreiheit in der X-Y-Ebene kann die Maschine die Futterteile, die mit einem Förderband am Arbeitsraum vorbeigeführt werden, aufnehmen und nach der Bearbeitung wieder ablegen. Ein zusätzliches Werkstückhandhabungssystem ist nicht erforderlich [8].

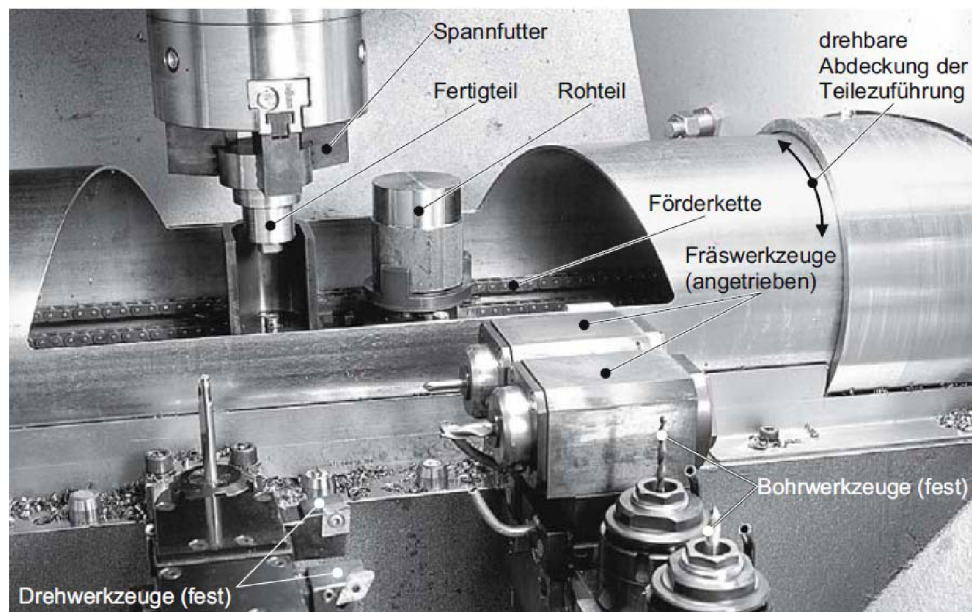


Abbildung 2.11 Werkstückwechsel mit Pick-Up-Spindel [8].

Häufig werden Drehmaschinen mit vertikalen Spindeln zur beidseitigen Bearbeitung von Werkstücken genutzt. Solche Maschinen haben zwei Spindeln, die jeweils ein Werkstück an der Frontseite und ein Werkstück an der Rückseite bearbeiten (Abbildung 2.12) [8].

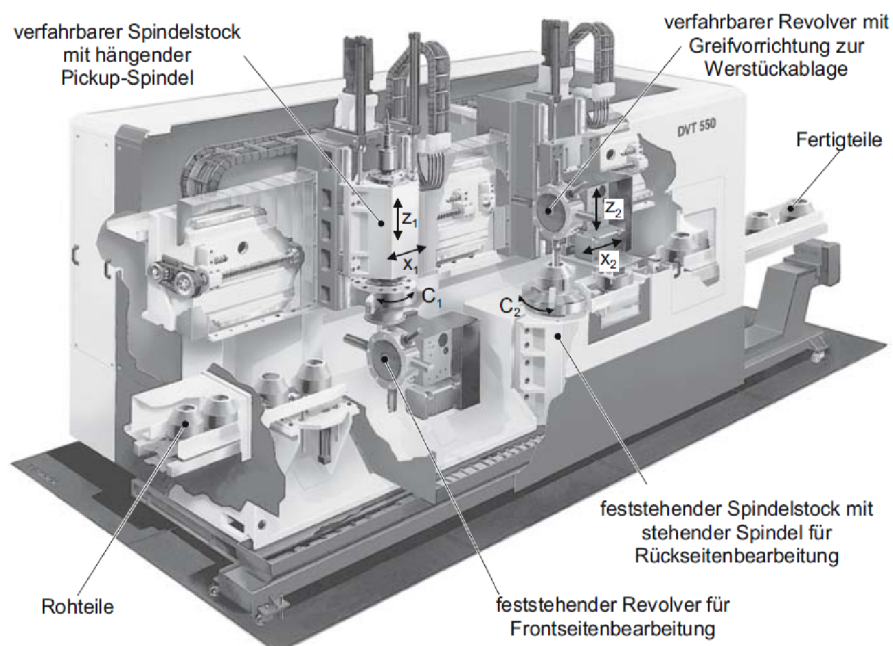


Abbildung 2.12 Zwischenspindel-Senkrechtdrehmaschine [8].

Die in Abbildung 2.16 gezeigte Maschine hat zwei gegenüberliegende Spindeln. Das Futter der in X- und Z-Achsrichtung beweglichen hängend angeordneten Spindel (links) greift das Werkstück von einem Transportband. Nach der Bearbeitung des Werkstücks am feststehenden Werkzeugrevolver wird dieses an die steuerungstechnisch gekoppelte zweite stehende Spindel übergeben. Dabei wird die erste Spindel so verfahren, dass sie dem Futter der

zweiten Spindel gegenübersteht und das Werkstück übergibt. Im Futter der feststehenden Spindel wird die Bearbeitung des Werkstückes vom in X- und Z-Richtung bewegten Werkzeugschlitten durchgeführt (rechts in Abbildung 2.12). Ein am zweiten Revolverschlitten befestigter Greifer nimmt das fertig bearbeitete Teil aus dem Spindelfutter und legt es auf das rechte Transportband ab. Durch die Anordnung der beiden Spindeln lassen sich beide Seiten des Werkstücks bearbeiten, ohne dass es gewendet werden muss. In den Revolvern der beiden Bearbeitungspositionen können jeweils bis zu zwölf angetriebene Werkzeuge eingesetzt werden [8].

3 BEARBEITUNGSPROZESS

In diesem Kapitel werden die Zerspanungstheorie, unterschiedliche Spanarten und der Verschleiß erläutert, die in dieser Arbeit optimiert werden sollen.

3.1 Grundlagen der Zerspanung

Unter Zerspanung versteht man die Formänderung durch Verminderung des Materialzusammenhalts. Die Formänderung wird durch eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück realisiert, bei der eine Energieübertragung stattfindet [DIN8580] [10].

3.1.1 Zerspanungstheorie

Beim Spanen dringt die keilförmige Schneide des Zerspanwerkzeugs unter Aufwand von Energie in die Werkstückoberfläche ein. Sobald die im Werkstückmaterial auftretende Scherspannung hierbei die zugehörige Fließgrenze überschreitet, bildet sich infolge der Relativbewegung zwischen dem Werkstück und Werkzeug ein Span, der oberhalb des Berührungspunkts über die Spanfläche des Schneidkeils abläuft [12].

Bei der kontinuierlichen Spanbildung, d.h. bei Fließspanbildung, lässt sich der Prozess durch fünf Verformungszonen beschreiben (Abbildung 3.1). Die hauptsächliche plastische Verformung findet in der primären Scherzone durch Schubverformung (Scherung) statt. In den sekundären Scherzonen vor der Span- und der Freifläche wird der Werkstoff zusätzlich unter dem Einfluss hoher Reibung verformt. Vor der Schneide bildet sich eine Stauzone (Zone mit einem hohen allseitigen Druck), die gleichzeitig die Zone ist, in der der Werkstoff getrennt wird. Schließlich lässt sich noch eine Verformungsvorlaufzone beobachten, in der geringe, aber bleibende, Verformungen auftreten. Diese Zone ist bestimmend für die Eindringtiefe plastischer Verformungen in das Werkstück, also für die Randzonenbeeinflussung [11].

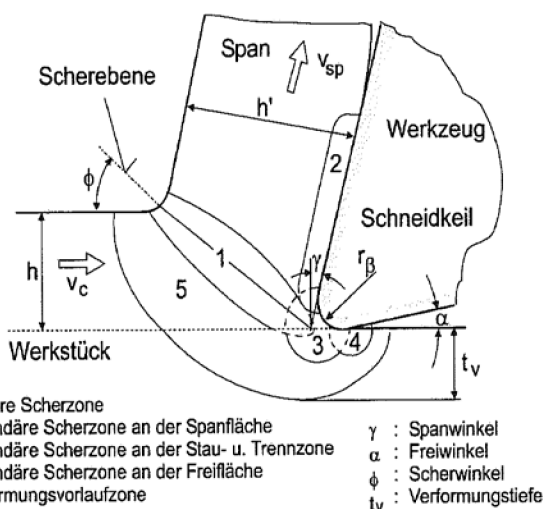


Abbildung 3.1 Zonen der Spanentstehung [11]

Nachfolgend werden die gängigsten Begriffe und Größen bei der spanenden Bearbeitung erläutert:

a) Bewegungen:

- *Schnittbewegung* würde ohne Vorschubbewegung nur eine einmalige Spanabnahme während einer Umdrehung, oder eines Hubes, bewirken.
- *Vorschubbewegung* ermöglicht zusammen mit der Schnittbewegung eine mehrmalige Bewegung, auch Hübe genannt. Sie kann schrittweise oder stetig erfolgen.
- *Wirkbewegung* ist die resultierende Bewegung aus der Schnittbewegung und der gleichzeitig ausgeführten Vorschubbewegung [12].

b) Geschwindigkeiten:

- *Schnittgeschwindigkeit* v_c ist die Geschwindigkeit der Schnittbewegung.

Berechnung der Schnittgeschwindigkeit:

$$v_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

- *Vorschubgeschwindigkeit* v_f ist die Geschwindigkeit der Vorschubbewegung.

Berechnung der Vorschubgeschwindigkeit:

$$v_f = n \cdot f \quad (3.2)$$

- *Wirkgeschwindigkeit* v_e ist die Geschwindigkeit der Wirkbewegung [12].

Berechnung der Wirkgeschwindigkeit:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (3.3)$$

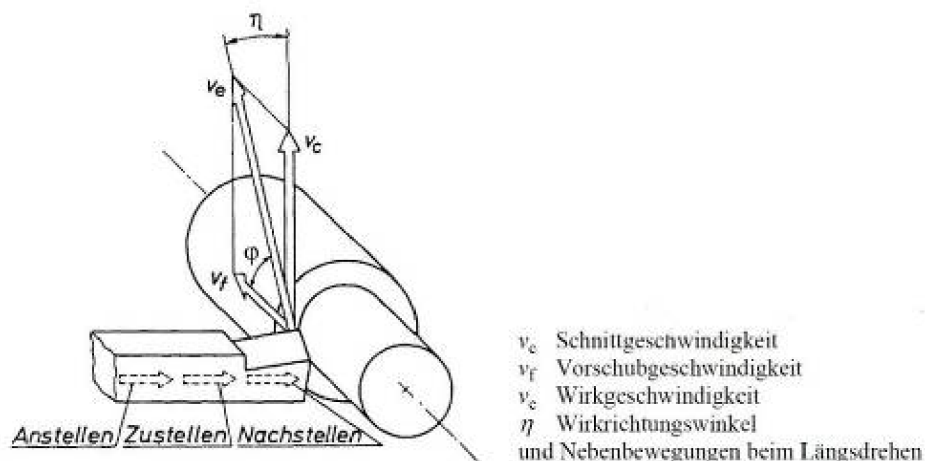


Abbildung 3.2 Geschwindigkeit der Hauptbewegungen [12].

c) Weitere Begriffe zur Kennzeichnung des Spanwerkzeugs sind:

- *Vorschub* f bezeichnet den Vorschub je Umdrehung oder je Hub.

- *Schnitttiefe bzw. -breite* a_p bezeichnen jeweils die Tiefe des Schneideneingriffs bzw. die Breite des Schneideneingriffs, gemessen senkrecht zur Arbeitsebene.
- *Spanungsbreite* b ist die Breite des abzunehmenden Spans senkrecht zur Schnittrichtung, gemessen in der Schnittfläche.

Spanungsbreiteberechnung:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} \quad (3.4)$$

- *Spanungsdicke* h ist die Dicke des abzunehmenden Spanes zur Schnittrichtung, gemessen senkrecht zur Schnittfläche [12].

Spanungsdickeberechnung:

$$h = f \cdot \sin \kappa \quad (3.5)$$

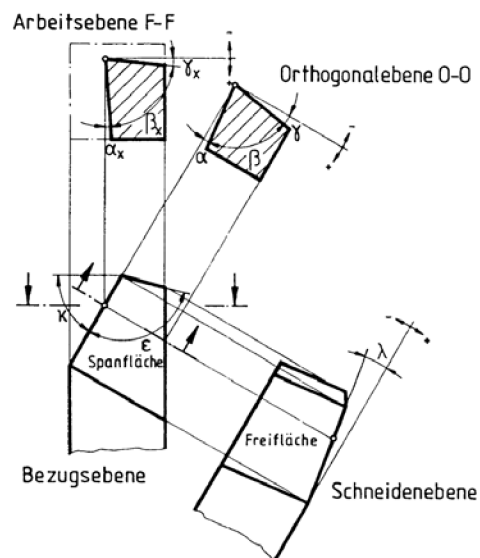
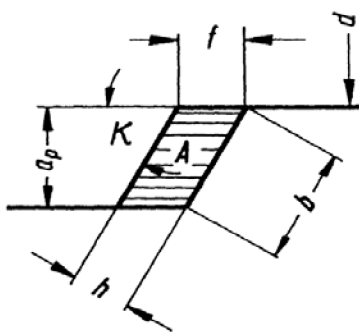


Abbildung 3.4 Schnittgrößen und Spanungsgrößen bei Werkzeugen mit gerader Schneide ohne Eckenrundung [12].

Abbildung 3.3 Drehwerkzeug in verschiedenen Schnittebenen

d) Werkzeugwinkel, die in Abbildung dargestellt sind:

- *Einstellwinkel* κ ist immer positiv und liegt außerhalb des Schneidkeils, und zwar so, dass seine Spitze zur Schneidenecke hinweist.
- *Eckenwinkel* ε ist der Winkel zwischen der Haupt- und Nebenschneide.
- *Neigungswinkel* λ liegt immer so, dass seine Spitze zur Schneidenecke hinweist, und ist positiv, wenn die in den betrachteten Schneidenpunkt gelegte Bezugsebene außerhalb des Schneidkeils liegt.

- *Freiwinkel* α ist der Winkel zwischen der Freifläche und der Schneideebene und ist positiv.
 - *Keilwinkel* β ist der Winkel zwischen der Freifläche und der Spanfläche.
 - *Spanwinkel* γ ist positiv, wenn die in den betrachteten Schneidenpunkt gelegte Bezugsebene in der Keilmessebene außerhalb des Schneidkeils liegt [12].
- e) Abbildung 3.5 zeigt die Schneidfläche eines Drehwerkzeugs.

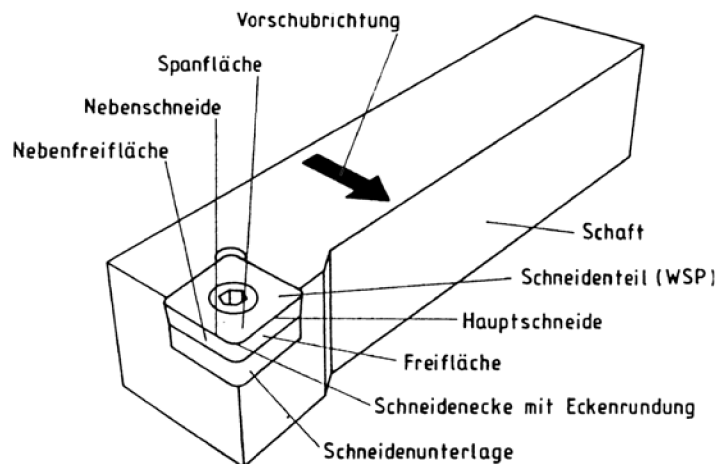


Abbildung 3.5 Flächen, Schneiden und Schneidenecke am Drehwerkzeug [12].

- *Spanfläche* bezeichnet die Fläche, über die der Span abläuft.
- *Freiflächen* bezeichnen die Flächen, die den Schnittflächen am Werkstück zugekehrt sind.
- *Hauptschneide* bezeichnet die Schneide, deren Schneidkeil innerhalb der Arbeitsebene in die Vorschubrichtung weist.
- *Nebenschneide* bezeichnet die Schneide, deren Schneidkeil innerhalb der Arbeitsebene nicht in die Vorschubrichtung weist, d. h. die Schneide, die der erzeugten Oberfläche zugewandt ist [12].

3.1.2 Spanbildungsarten und Spanklassen

Je nach Werkstoff und Zerspanungsbedingungen lassen sich folgende Spanbildungsarten unterscheiden (Abbildung 3.6):

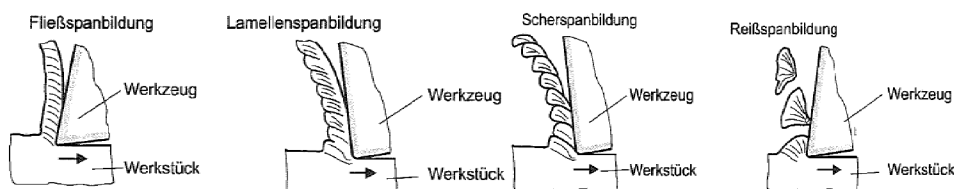


Abbildung 3.6 Spanbildungsarten [11].

- *Fließspanbildung* ist das kontinuierliche Spanentstehen. Der Span gleitet mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in stationärem Fluss über die Spanfläche ab. Eine Begünstigung der Fließspanbildung erfolgt durch gleichmäßiges feinkörniges Gefüge des Werkstoffs, hohe Schnittgeschwindigkeit, geringe

Reibung auf der Spanfläche, positiven Spanwinkel und geringe Spanungsdicke. Bei einer Fließspanbildung kann es zu Aufbauschneiden kommen (Abbildung 3.7).

- *Lamellenspanbildung* ist ein gleichmäßiger periodischer Spanbildungsvorgang. Der Span weist durch thermische oder elastomechanische Vorgänge gebildete Lamellen mit hoher Bildungsfrequenz im kHz-Bereich auf. Solche Lamellenspäne entstehen bei gut verformbaren Werkstoffen und hohen Schnittgeschwindigkeiten (Hochgeschwindigkeitszerspannung).
- *Scherspanbildung* ist die diskontinuierliche Entstehung eines noch zusammenhängenden Spanes, der jedoch deutliche Unterschiede im Verformungsgrad entlang der Fließrichtung erkennen lässt. Zur Scherspanbildung kommt es vorzugsweise bei negativen Spanwinkeln, geringeren Schnittgeschwindigkeiten v_c und größeren Spanungsdicken h .
- *Reißspanbildung* tritt auf, wenn der Werkstoff wenig plastisch verformbar ist oder aufgrund von starken Inhomogenitäten (z.B. Gusseisen mit Lamellengraphit) vorgegebene Gleitsysteme bildet [11].

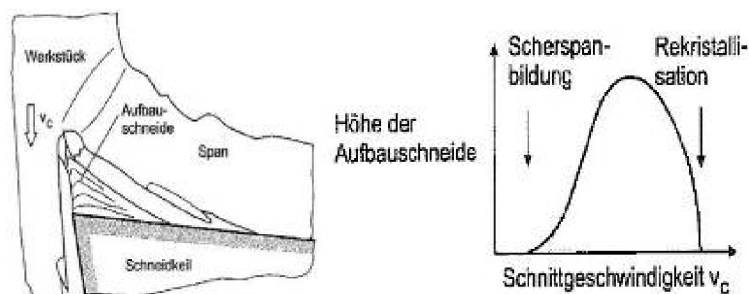


Abbildung 3.7 Aufbauschneidenbildung [11].

Je nach Spanform nimmt das Spanvolumen (Schüttvolumen der Späne) einen weit größeren Raum als der massive Werkstoff ein. Das Verhältnis der beiden Volumina oder Volumenströme ist die Spanraumzahl RZ [11].

Spanraumzahlberechnung:

$$RZ = \frac{Q_{span}}{Q_w} \quad (3.6)$$

Je nach Spanform kann die Spanraumzahl sehr unterschiedliche Werte annehmen (Abbildung 3.8). Zur Charakterisierung der Spanformen wurden acht Spanformklassen eingeführt, siehe Abbildung 3.8, denen sich Spanraumzahlen zuordnen lassen. Lange Späne, wie Bandspäne und Spiralspanstücke, können Schwierigkeiten beim Abtransport aus der Wirkstelle (z.B. beim Bohren) machen oder bei ungenügendem Schutz im Werk Augenverletzungen verursachen. Wendelspanstücke und Spiralspanstücke sind in ihrem Verhalten günstiger [11].

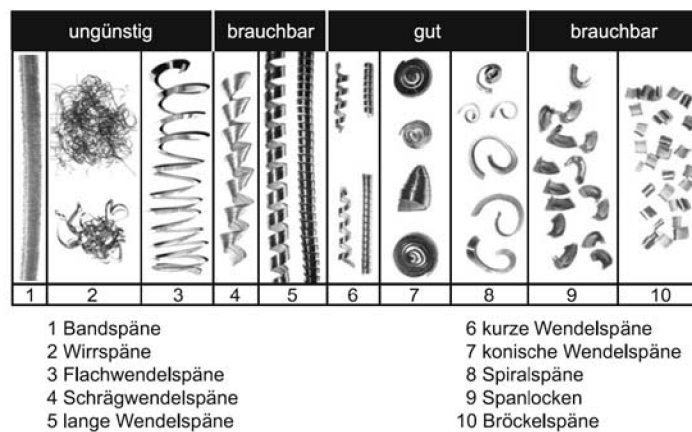


Abbildung 3.8 Spanformen [10].

3.1.3 Verschleiß

Im Bereich der Schneide unterliegen die eingesetzten Schneidstoffe einem außerordentlich komplexen Belastungskollektiv, das durch hohe Druckspannungen, hohe Schnittgeschwindigkeiten und hohe Temperaturen gekennzeichnet ist. Diese Faktoren führen zu Verschleißmechanismen (mechanischer Abrieb (Adhäsion), Abscheren von Pressschweißstellen, Beschädigung der Schneidkante infolge mechanischer und thermischer Überbeanspruchung, Diffusion und Verzunderung) [10].

In Abbildung 3.9 wird Freiflächenverschleiß und Kolkverschleiß beschrieben:

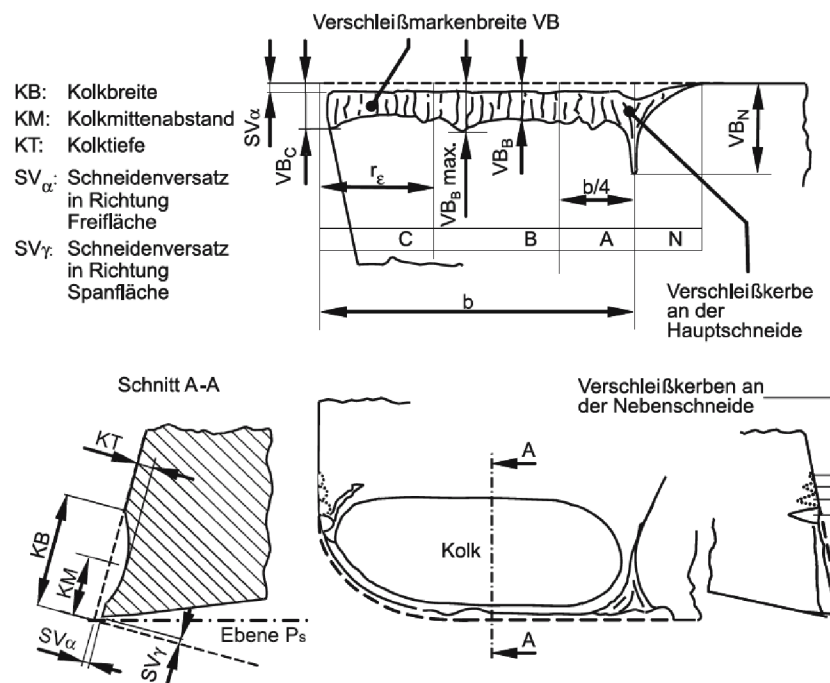


Abbildung 3.9 Verschleißformen und -messgrößen am Schneidteil [10].

Als Freiflächenverschleiß bezeichnet man den annähernd gleichmäßigen Abtrag vom Schneidstoff an der Freifläche des Werkzeugs, wobei die Verschleißfläche, die sog. Verschleißmarke, etwa parallel zur Schnitttrichtung liegt. Als Maß für den Freiflächenverschleiß dient die Verschleißmarkenbreite

VB. Tabelle 3.1 gibt die Größenordnung der Verschleißmarkenbreiten in Abhängigkeit der Drehverfahren an.

Als Kolkverschleiß bezeichnet man den muldenförmigen Abtrag von Schneidstoff auf der Spanfläche. Die muldenförmige Vertiefung an der Spanfläche bezeichnet man als KOLK. Als Maß für den Kolkverschleiß dient die Kolktiefe KT , die Kolkklippe KL und der Kolkmittenabstand KM .

Neben dem Kolkverschleiß und dem Freiflächenverschleiß treten auch noch der Schneidenversatz $SV\alpha$ und $SV\gamma$ auf. Diese haben keine so große Bedeutung, können aber als Richtgröße für Versuchszwecke herangezogen werden.

Verfahren:	VB in (mm)
Feindreihen	0,2
Schlichtdreihen	0,3 – 0,4
Schruppdreihen	0,6 – 0,8

Tabelle 3.1 Größenordnung der Verschleißmarkenbreiten in Abhängigkeit des Drehverfahrens [10].

Standzeit bezeichnet den Zeitraum, in dem das Werkzeug unter Ausschaltung aller Hilfszeiten bis zum Erreichen des ausgewählten Standkriteriums schneidend im Einsatz sein kann. Diesen Zeitpunkt bezeichnet man als "Standzeitende".

Standkriterien sind wesentliche Merkmale für unerwünschte Veränderung vom Werkstück und Werkzeug als Folge des Zerspanungsvorganges. Diese Standkriterien können am Werkzeug, Werkstück oder am Zerspanungsvorgang festgelegt werden. Beispiele solcher Standkriterien am Werkzeug sind die Verschleißmarkenbreite, Kolktiefe und Kolkmittenabstand. Ein Standkriterium am Werkstück ist die Veränderung der Oberfläche (größere Rauigkeit). Durch abgenutzte Werkzeuge kann es auch zu Maßabweichungen kommen [10].

Diese Einflüsse auf die Standzeit sind in Abbildung 3.10 bzw. 3.11 ersichtlich, wobei die Darstellung in Diagrammform gebräuchlich ist. Dabei wird die doppeltlogarithmische Teilung bevorzugt, da sich in diesem Fall der Kurvenverlauf – im allgemeinen eine Exponentialfunktion – als Gerade (Standzeitgerade) darstellen lässt [10].

Zuerst wird ein Verschleißdiagramm aufgestellt, auf welchem basierend das Standzeitdiagramm nach Verwendung eines Verschleißkriteriums entwickelt werden kann [10].

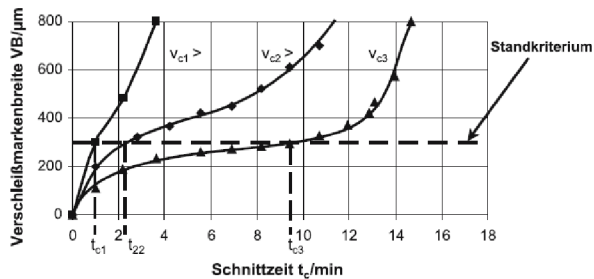


Abbildung 3.10 Verschleiß von unbeschichtetem Hartmetall beim Zerspanen von Vergütungsstahl. [10]

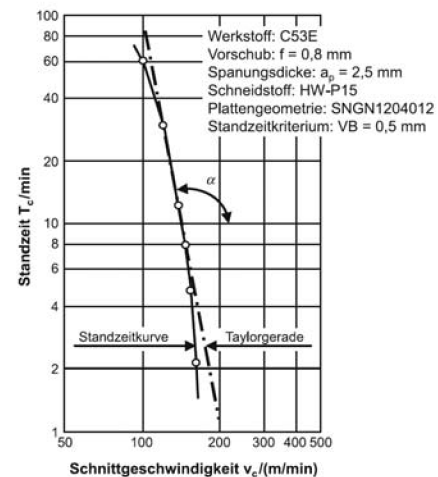


Abbildung 3.11 Standzeitkurve im log-System (Vergütung/Hartmetall). [10]

- Zusammenhang der Standzeit und Schnittgeschwindigkeit:

$$T^m = \frac{C'}{v_c} \quad (3.7)$$

Die Schnittgeschwindigkeit beeinflusst die Standzeit T wegen der beschränkten Temperaturbeständigkeit am stärksten. Der m -Wert ist immer kleiner als 1. Der C -Wert ist vom Werkstückwerkstoff und Werkzeugmaterial, sowie von den gegebenen Zerspanungsbedingungen (Gleichung 3.10) abhängig [10].

m -Wertberechnung:

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\log v_n - \log v_1}{\log T_1 - \log T_n} \quad (3.8)$$

Zusammenhang der Standzeit und Schnitttiefe bzw. Vorschub:

$$T^m = \frac{C'}{a_p^x \cdot f^y \cdot v_c} \quad (3.9)$$

3.1.4 Kräfte und Leistung

Die bei einem Zerspanvorgang auf das Werkstück wirkende *Zerspankraft* F kann in verschiedene Komponenten zerlegt werden, wie Abbildung 3.12 zeigt. Bezogen auf die Arbeitsebene wird die Zerspankraft in die *Aktivkraft* F_a und die *Passivkraft* F_p zerlegt. Die Aktivkraft ist die Komponente der Zerspankraft in der Arbeitsebene und, da in der Arbeitsebene die Bewegungen zur Spanentstehung ausgeführt werden, leistungsbestimmend. Die Passivkraft ist die Komponente der Zerspankraft senkrecht zur Arbeitsebene und ist an den Leistungen beim Zerspanen nicht beteiligt [13].

Bezogen auf die Schnittrichtung wird die Aktivkraft in die *Schnittkraft* F_c und *Wirkkraft* F_e zerlegt, wobei sich die Schnittkraft F_c auf die Vorschubkraft F_f in Vorschubrichtung und die Wirkkraft F_e auf die Wirkrichtung bezieht. Nachfolgende Abbildung 3.12 stellt die Kraftkomponenten und ihre

Abhängigkeit von der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit dar (Gleichung 3.11) [13].

Zerspankraftberechnung:

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (3.10)$$

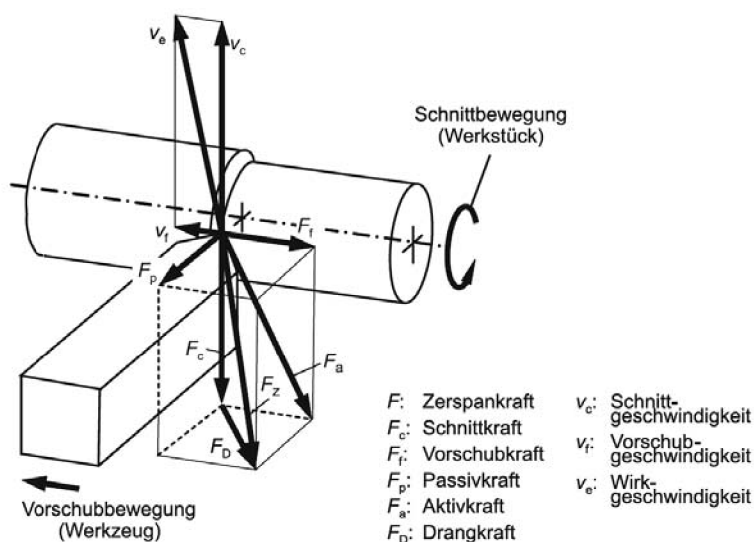


Abbildung 3.12 Komponenten der Zerspankraft bei Drehen, nach DIN 6584.

Zusammenhang zwischen Schnitt- und Vorschubkraft:

$$\tan \eta = \frac{F_f}{F_c} \quad (3.11)$$

Zusammenhang zwischen Vorschub- und Passivkraft:

$$\tan \kappa = \frac{F_f}{F_p} \quad (3.12)$$

Die Schnittkraft F_c wird nach dem Schnittkraftgesetz von Kienzle (Gleichung 3.14) berechnet. Diese Gleichung rechnet mit idealen Parametern, deshalb wird sie zur Errechnung von realen Werten mit Korrekturfaktoren erweitert (Spanwinkelkorrektur K_γ , Schnittgeschwindigkeitskorrektur K_v , Schneidstoffkorrektur K_{sch} und Verschleißkorrektur K_{ver}) (Gleichung 3.15) [13].

Kienzle-Gleichung zur Berechnung der Schnittkraft:

$$F_c = b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{cl.1} \quad (3.13)$$

Kienzle-Gleichung zur Berechnung der Schnittkraft mit Korrekturfaktoren:

$$F_c = b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{cl.1} \cdot K_\gamma \cdot K_v \cdot K_{sch} \cdot K_{ver} \quad (3.14)$$

Kienzle-Gleichung zur Berechnung der Vorschubkraft:

$$F_f = k_{f1.1} \cdot b \cdot h_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^{(1-m_f)} \quad (3.15)$$

Kienzle-Gleichung für Passivkraft:

$$F_p = k_{p1.1} \cdot b \cdot h_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^{(1-m_p)} \quad (3.16)$$

Die Leistungen beim Zerspanen ergeben sich aus dem Produkt der jeweiligen Geschwindigkeitskomponenten und der in ihren Richtungen wirkenden Komponenten der Zerspankraft [13].

Schnittleistungsberechnung:

$$P_c = v_c \cdot F_c \quad (3.17)$$

Vorschubleistungsberechnung:

$$P_f = v_f \cdot F_f \quad (3.18)$$

Wirkleistungsberechnung:

$$P_e = v_e \cdot F_e \quad (3.19)$$

Die Wirkleistung ist die Summe aus der Schnittleistung P_c und der Vorschubleistung P_f :

$$P_e = P_c + P_f \quad (3.20)$$

3.2 Drehen

Drehen ist ein spanendes Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, rotatorischer Schnittbewegung und einer beliebig dazu quer liegenden translatorischen Vorschubbewegung [DIN8589a]. Zur kinematischen Einordnung wird immer die Relativbewegung zwischen dem Werkstück und Werkzeug betrachtet [10].

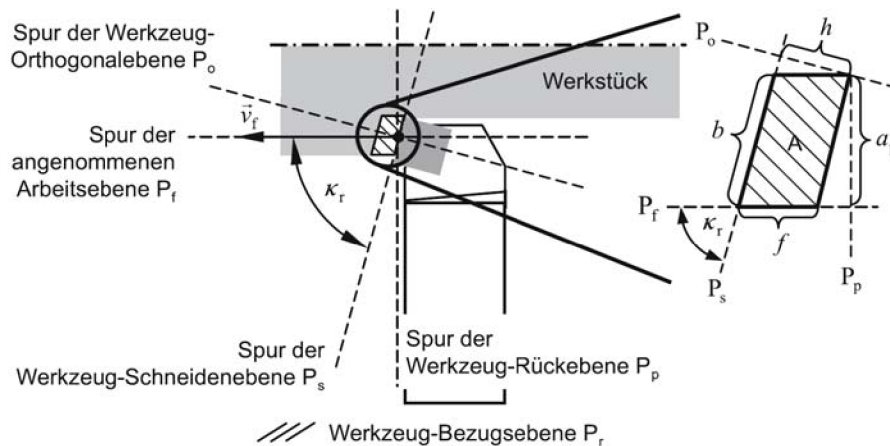


Abbildung 3.13 Werkzeug-Bezugssystem und nomineller Spanungsquerschnitt [10].

3.2.1 Drehverfahren

Eine Einteilung der Drehverfahren kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. So führen z. B. verschiedene Zielsetzungen der Bearbeitungsaufgabe zur Unterscheidung zwischen Schlicht- und Schruppdrehen. Beim Schruppdrehen wird ein hohes Zeitspannungsvolumen erreicht. Eine hohe Maß- und Formgenauigkeit sowie Oberflächengüte wird beim Schlichten durch kleine Spanungsquerschnitte erzielt [10].

Die zumeist verwendeten Drehverfahren sind Plandrehen, Runddrehen, Schraubdrehen, Profildrehen und Formdrehen. Im Weiteren werden nur die Drehverfahren in Bezug auf die betrachtete Drehoperation erwähnt:

a) *Plandrehen* ist ein Drehverfahren zum Erzeugen einer zur Drehachse des Werkstücks orthogonalen ebenen Fläche. Varianten sind u. a. das in Abb. 3.14 dargestellte Quer-Plandrehen und das Quer-Abstechdrehen zum Abtrennen von Werkstückteilen oder des gesamten Werkstücks [DIN8589a].

Der Schnittweg aller Quer-Plandrehvarianten liegt auf einer archimedischen Spirale. Bei den Längs-Plandrehvarianten ist der Schnittweg hingegen wendelförmig (Schraubenlinie). Die Werkzeuge neigen bei hoher Belastung aufgrund ihrer geometrischen Ausführung zum Schwingen (Rattern).

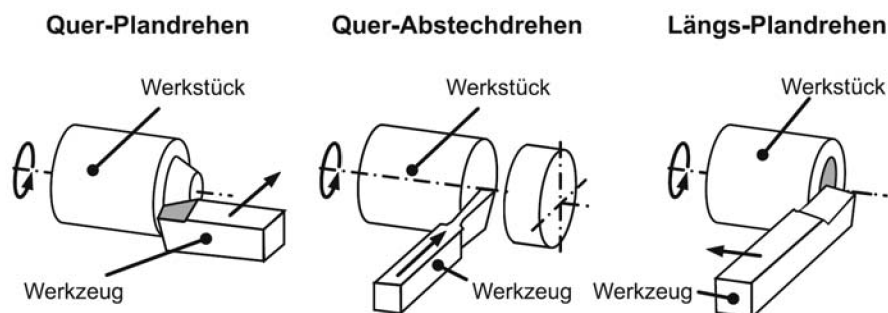


Abbildung 3.14 Verfahrensvarianten des Plandrehens [10].

b) *Runddrehen*: ist Drehen zum Erzeugen einer zur Drehachse des Werkstücks koaxial liegenden zylindrischen Fläche. Die wichtigsten

Runddrehvarianten sind das Längs-Runddrehen und das Schälldrehen, vgl. Abbildung 3.15.

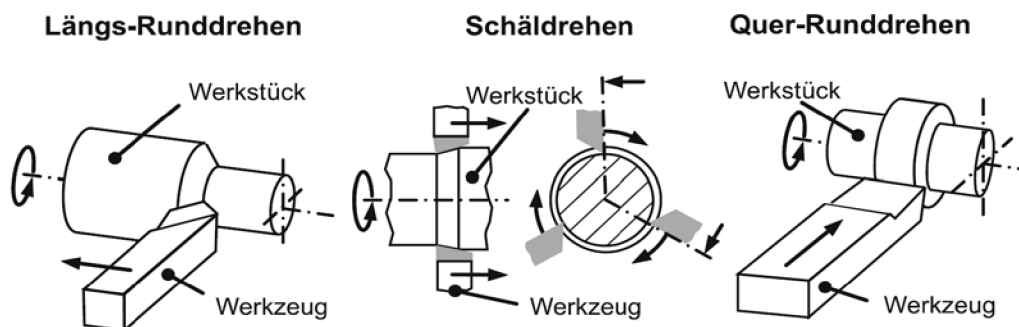


Abbildung 3.15 Verfahrensvarianten des Runddrehens. [10]

c) *Innendrehen*: Beim Innendrehen tiefer Konturen können auf Grund der langen Auskraglänge der Innendrehwerkzeuge Stabilitätsprobleme auftreten. Deshalb sind bei der Wahl der Schnittwerte die Auskraglänge und der Schaftdurchmesser, der abhängig von der Größe der zu bearbeitenden Kontur ist, zu berücksichtigen. Abbildung 3.16 zeigt einige typische Werkzeuge zur Bearbeitung von innenliegenden Flächen [10].

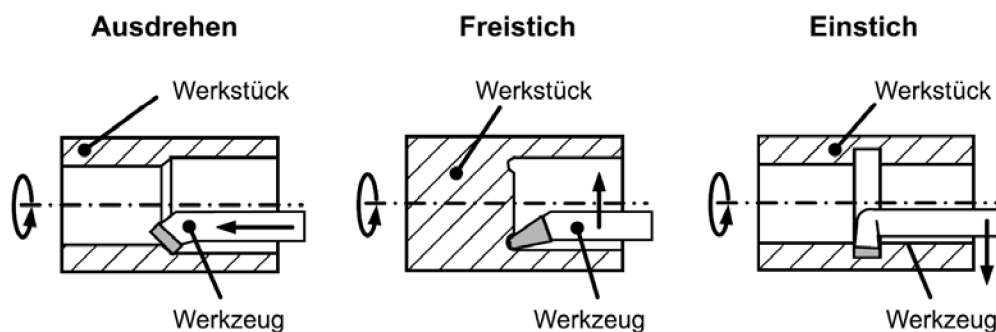
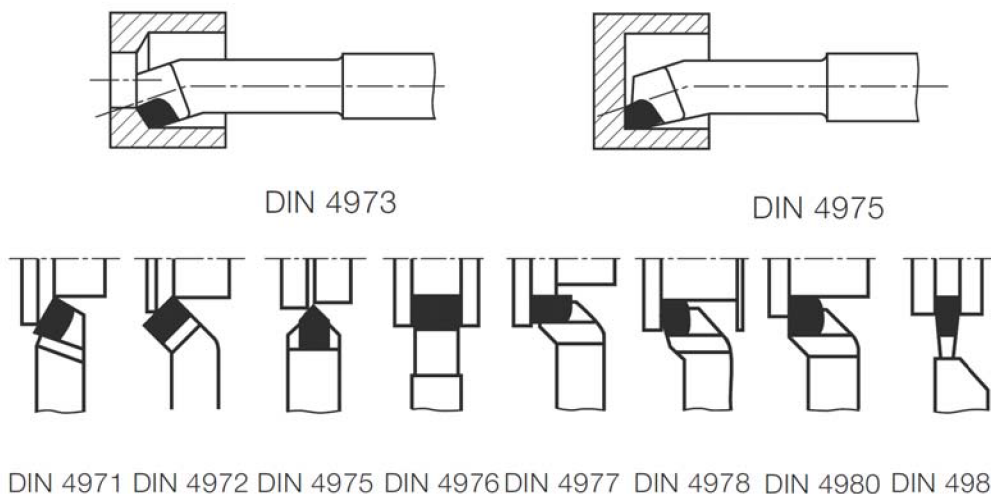


Abbildung 3.16 Innendrehen [10].

3.2.2 Drehwerkzeuge

Die Form und die Abmessungen der Werkzeuge zum Drehen sind abhängig von der Bearbeitungsaufgabe. Moderne Werkzeuge zur spanenden Bearbeitung mit definierten Schneiden sind aus verschiedenen Komponenten aufgebaut. Allgemein kann man zwischen dem Schneidensystem, Befestigungs- bzw. Klemmsystem und dem Werkzeuggrundkörpersystem unterscheiden. Der Hauptvorteil einer Aufteilung in mehrere Teilsysteme besteht dabei in einer verbesserten Anpassung des Werkzeugsystems an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe.

Abbildung 3.17 zeigt unterschiedliche Werkzeugformen für verschiedene Bearbeitungsaufgaben beim Drehen mit aufgelöteten Schneidplatten aus Hartmetall [14].



DIN 4971 DIN 4972 DIN 4975 DIN 4976 DIN 4977 DIN 4978 DIN 4980 DIN 4981
Abbildung 3.17 Werkzeugformen für verschiedene Bearbeitungsaufgaben beim Drehen [14].

Abbildung 3.18 zeigt einige Beispiele für gebräuchliche Befestigungs- bzw. Klemmsysteme. Die dabei eingesetzten Konstruktionsprinzipien sind:

- Befestigung mittels Klemmfinger,
- Befestigung mit Klemmfinger über verstellbar angeordnete Spanformplatten,
- Befestigung mit Klemmpratze mit mechanisch betätigter, über Exzenter stufenlos verstellbarer Spanformstufe,
- Befestigung mittels eines über eine Spannschraube betätigten Winkelhebels,
- Schraubenbefestigung ohne Spanformstufe,
- Schraubenbefestigung mit Spanformstufe.

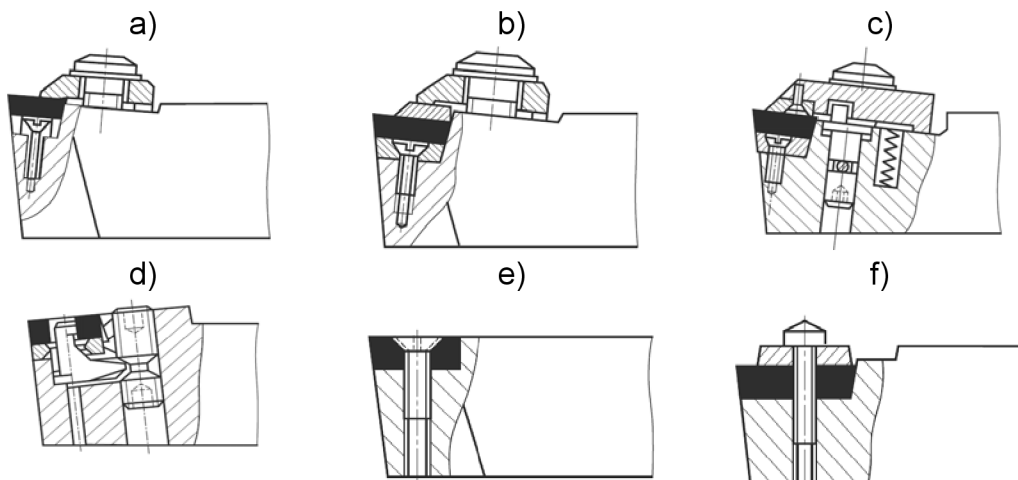


Abbildung 3.18 Klemmsysteme für Wendeschneidplatten [14].

3.2.3 Zeitberechnung

Die *Schnittzeit* t_c ist der wesentliche Anteil an der *Hauptnutzungszeit* t_h . Diese Hauptnutzungszeit ist definiert als die Zeit, in der das Werkzeug am Werkstück die beabsichtigte Änderung der Werkstückform und/oder der Werkstückoberfläche vollzieht, also seiner Zweckbestimmung entsprechend genutzt wird. Es gilt:

Hauptzeitberechnung:

$$t_h = t_c + t_a + t_{\ddot{u}} \quad (3.21)$$

Die Schnittzeitberechnung t_c :

$$t_c = \frac{l_f}{v_f} \quad (3.22)$$

Berechnung der Hauptnutzungszeit beim Längsdrehen, wobei die Länge L sowie der Abschnittweg und der Überlaufweg berücksichtigt werden:

$$t_h = \frac{L \cdot d \cdot \pi}{f \cdot v_c} \quad (3.23)$$

Berechnung der Hauptnutzungszeit beim Querdrehen bei konstanten Umdrehungen, wobei die Länge D sowie der Abschnittweg und der Überlaufweg berücksichtigt werden:

$$t_h = \frac{D}{2 \cdot f \cdot n} \quad (3.24)$$

Berechnung der Hauptnutzungszeit von Querdrehen bei konstanter Schnittgeschwindigkeit, wobei Länge D sowie Abschnittweg und Überlaufweg berücksichtigt werden [13]:

$$t_h = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4 \cdot f \cdot v_c} \quad (3.25)$$

4 IST-STAND DES DREHPROZESSES

Die Arbeit untersucht den Drehprozess, welcher im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird. Das Standvermögen der Bearbeitung wird von den Werkzeug-, Werkstoff- und Prozessparametern sowie der angewendeten Drehmaschine beeinflusst, wie es in Abbildung 4.1 dargestellt ist.



Abbildung 4.1 Standvermögen [10].

4.1 Beschreibung der Drehmaschine

Der betrachtete Drehprozess wird an zwei vertikalen Drehmaschinen (Maschine 1 und Maschine 2) durchgeführt. Die Maschinenstruktur ist bei beiden Drehmaschinen gleich und ist in Abbildung 4.2. dargestellt. Die Spindel liegt senkrecht zum Fundament (vertikal). Das Werkstück wird in der Spindel und die Werkzeuge im Sternrevolver eingespannt.


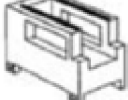



Bettformen	Relative Lage zwischen Werkzeug und Werkstück	Kreuzschlitten	Werkzeug-träger	Hilfseinrichtungen
 Spindel parallel zum Fundament	 Vertikal Spindelbett	 Vertikal-spindel	 Sternrevolver	 Werkstückspannung

Abbildung 4.2 Maschinenstruktur einer Drehmaschine mit vertikaler Spindel [10].

4.2 Beschreibung des Drehprozesses

In diesem Kapitel werden das Rohteil, das Werkstück, der Drehprozess und die eingesetzten Werkzeuge erläutert.

4.2.1 Rohteil

Das gelieferte Rohteil besteht aus dem Material W4, welches dem Material 100CrMn6 nach DIN entspricht.

Das Material mit dem Werkstoffnummer 1.3520 (100CrMn6 nach DIN, bekannt auch unter dem Produktnamen W4) ist ein legierter Edelstahl, genauer gesagt Cr-Mn-legierter Wälzlagerstahl. [7]

4.2.2 Drehprozess

Die untersuchte Teilarbeit besteht aus folgenden drei Drehprozessen: Außendrehen, Innendrehen und Einstechen.

4.2.3 Werkzeuge

Die eingesetzten Werkzeuge werden nach den Drehprozessen in T01 (Außendrehen), T02 (Innendrehen) und T03 (Einstechen) eingeteilt. Die Werkzeuge sind beim Innendrehen und beim Einstechen auf den beiden betrachteten Maschinen ident.

4.3 Zusammenfassung des IST-Bestands

Die Beschreibung des IST-Bestandes zeigt, dass die Bedingungen für einen Vergleich der beiden Drehmaschinen nicht gegeben sind. Dazu müssten Rohteile, Werkzeuge, Schnittparameter und Fertigteile gleich sein. Deshalb wird im folgenden Kapitel ein indirekter Maschinen- und Prozessvergleich durch die theoretische Schnittleistung durchgeführt.

Die folgende Modifikation des Drehprozesses soll auch die Gesichtspunkte Energiekosten, Werkzeugkosten und Fertigungszeit berücksichtigen. Deshalb wird in einem Versuch die Abhängigkeit zwischen der Schnittgeschwindigkeit und dem Vorschub ermittelt.

5 MESSTECHNISCHE BESCHREIBUNG DES BESTEHENDEN DREHPROZESSES

Abbildung 5.1 zeigt die allgemeinen Anforderungen an Verfahren zur Erfassung der Maschineneigenschaften. Zunächst muss eine ausreichende Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse gewährleistet sein. Die Messbedingungen sollen für möglichst viele relevante Bearbeitungsaufgaben (Bearbeitungsbedingungen, Werkstück-Werkzeug-Konfiguration usw.) ausreichend aussagefähig sein [9].

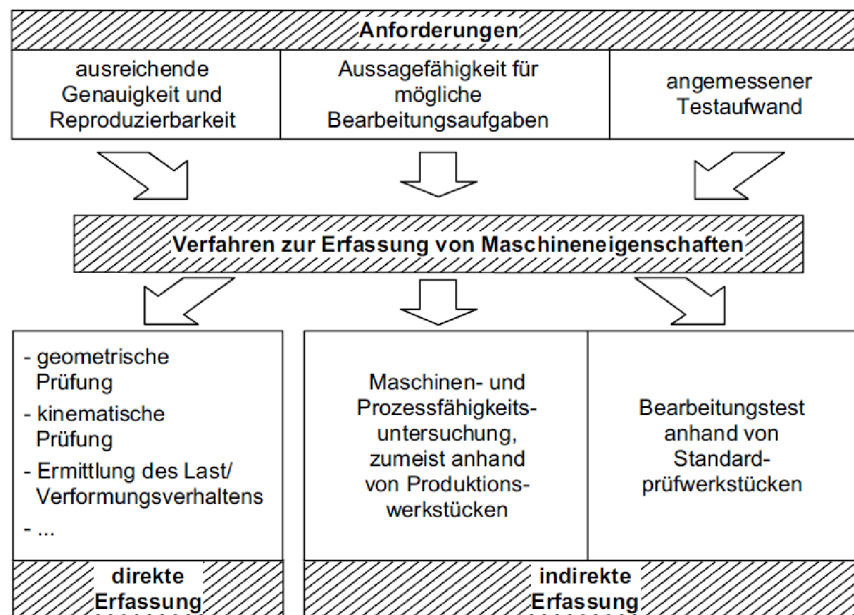


Abbildung. 5.1 Anforderungen an Verfahren zur Erfassung von Maschineneigenschaften [9].

Im Rahmen dieser Arbeit wird direkt das Energieverhalten von Drehmaschinen erfasst. Die geometrischen, kinematischen und dynamischen Maschineneigenschaften beeinflussen den Drehprozess durch die Messung der Leistungsaufnahme der Maschine im Prozess. In diesem Kapitel wird die Energieeffizienz der Drehmaschinen gemessen und berechnet.

Damit die Berechnung der Schnittenergie E_c aus der Schnittleistung P_c möglich ist, wird die Schnittkraft F_c nach Viktor Kienzle bestimmt. Dies benötigt die Kenntnisse der spezifischen Schnittkraft und der Werkzeuggeometrie. Schlussendlich wird eine Standzeitkurve, durch welche die Koeffizienten für die Taylor Gleichung ermittelt werden, untersucht.

5.1 Spezifische Schnittkraftermittlung

Der Messversuch zur Ermittlung der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$ und der Tangente des Steigungswinkels m_c wurden im Labor für Produktionstechnik (LPT) an der Drehmaschine HAAS TL2-HE durchgeführt. Diese Drehmaschine ist in Abbildung 5.2 dargestellt.



Abbildung 5.2 Drehmaschine HAAS TL2-HE.

Abbildung 5.3 stellt den Versuchsaufbau für die Ermittlung der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$ dar. Der Oberschlitten wird durch ein piezobasierendes Kistler-Dynamometer z3392b (siehe Abbildung 5.4a) ersetzt. Das Dynamometer ist mit dem Ladungsverstärker Kistler 5070 (Abbildung 5.4b) verbunden. Die Messdaten werden mit einer auf Labview basierenden Auswertesoftware, die am IFT entwickelt wurde, aufgezeichnet und verarbeitet. Alle Versuche werden als Außenlängsdrehoperationen durchgeführt.



Abbildung 5.3 Versuchsaufbau.

Abbildung 5.4 stellt das verwendete piezobasierende Kistler-Dynamometer z3392b und den Ladungsverstärker Kistler 5070 dar.

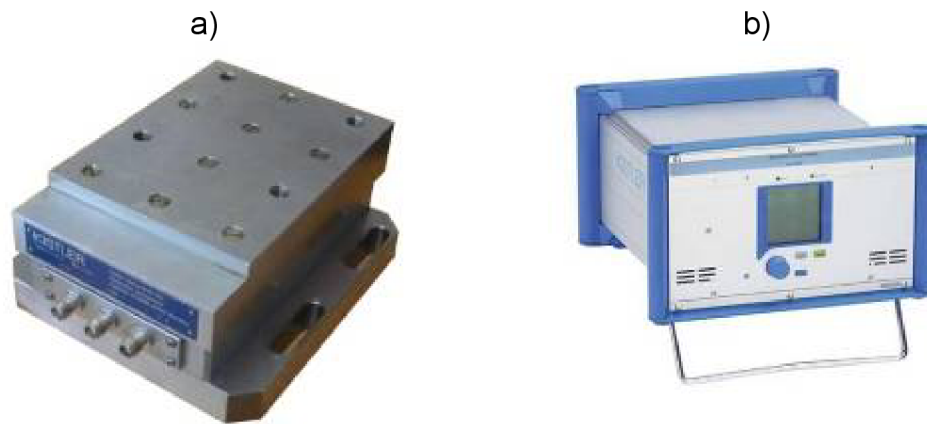


Abbildung 5.4 a) piezobasierende Kistler-Dynamometer z3392b und b) Ladungsverstärker Kistler 5070.

Für die Versuche wurden Wendeschneidplatten der Firma ATORN (SPMW 120408) eingesetzt, deren Eckdaten in Tabelle 5.1 angeführt sind. Diese Schneidplatten sind unbeschichtet und zeichnen sich durch eine einfache Geometrie aus. Der Werkzeughalter ist von Mitsubishi Materials mit der Bezeichnung SSSCR2020K12.

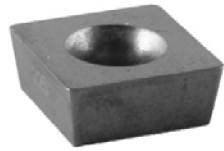
ATORN SPMW 120408 – Herstellungsangaben (unbeschichtet)			
			
Dicke: s	4,76 mm	Freiwinkel: α	11°
Länge: l	12,7 mm	Keilwinkel: β	79°
Eckenradius: r	0,8 mm	Spanwinkel: γ	0°

Tabelle 5.1 Wendeschneidplatte – Abmessungen.

Abbildung 5.5 zeigt den Kraftverlauf während eines Schnittversuchs, die durch die Software Labview dargestellt wird. Es zeigt sich, dass sich für den Zerspankraftverlauf kein kontinuierlicher Linienzug einstellt, sondern der Messwert durch eine zeitlich veränderliche Kraftkomponente überlagert ist. Eine Drehmaschine weist Eigenfrequenzen auf, bei deren Anregung sich Resonanzerscheinungen einstellen. Wäre eine drehzahlsynchrone Abhängigkeit der Zerspankraftveränderung gegeben, ist darauf zu achten, dass Prozessinstabilitäten das Gesamtergebnis nicht beeinflussen. Um Effekte aus den Werkstoffinhomogenitäten und Prozessveränderlichkeiten in der Zerspankraftauswertung zu berücksichtigen, wird für die Bestimmung der repräsentativen Schnittkraft der Mittelwert μ plus der einfache Wert der Standardabweichung σ kalkuliert (Gleichung 5.4). Diese erhöhte Schnittkraft stellt aus energetischer Sicht eine effektive Anpassung dar [5]. In Abbildung 5.5 ist der Kraftverlauf des gesamten Versuchs dargestellt. Zur Auswertung wird aber nur der Bereich zwischen den beiden vertikalen Linien herangezogen. Die X-Achse durch die Koordinatentranspolation des Dynamometers gibt die Vorschubkraft, die Y-Achse die Passivkraft und Z-Achse die Schnittkraft an. Zur Bestimmung der spezifischen Schnittkraft wird lediglich die Kraftkomponente in X-Achse (Schnittkraft) berücksichtigt.

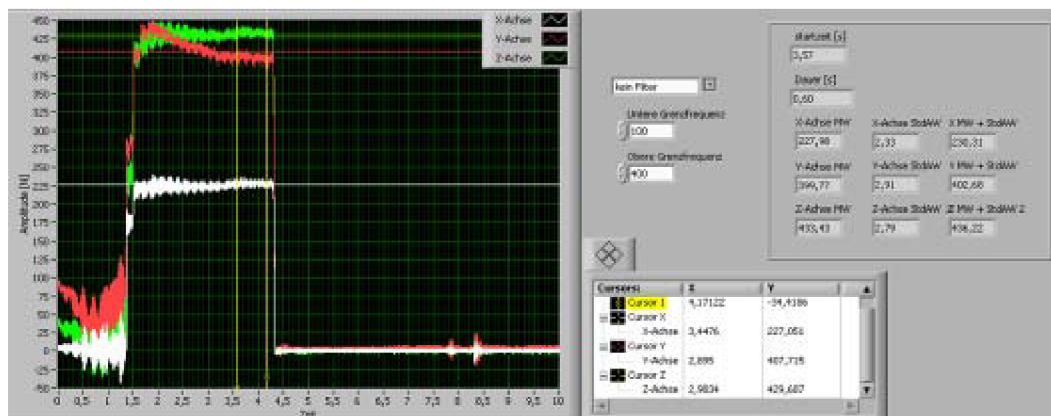


Abbildung 5.5 Kraftverlauf in Labview bei $v_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0,1$ mm.

Bestimmung der Schnittkraft von gemessenem Kraftverlauf:

$$F_c = |\mu| + \sigma \quad (5.1)$$

Abbildung 5.6 zeigt eine Messung mit ausgeprägten Vibrationen. Der Grund für die hohen Amplituden ist das „Rattern“, welches aufgrund von ungünstigen Schnittparametern auftritt. Die Frequenzen können ebenfalls durch die sichtbaren Rattermarken an der Oberfläche des Drehteils verifiziert werden. Ohne weitere Analyse der einzelnen Kraftverläufe dürfen diese Tests nicht zur Auswertung herangezogen werden [5].

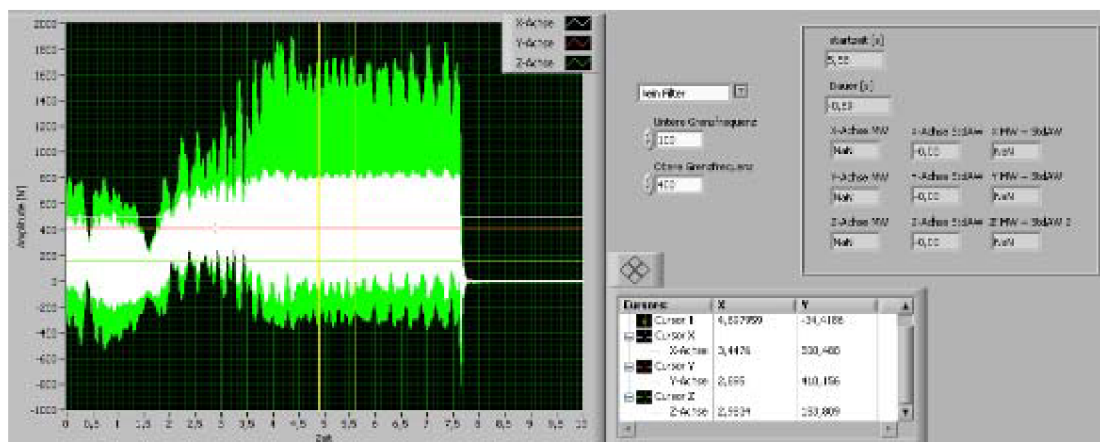


Abbildung 5.6 Kraftverlauf in Labview bei $v_c = 50$ m/min, $a_p = 2$ mm, $f = 0,05$ mm.

Der Hauptwert der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$ und die Tangente des Steigungswinkels m_c stellen die grundlegenden Werte zur Berechnung der Schnittkräfte F_c dar und sind gleichzeitig die Basis für die Kienzle-Gleichung (Gleichung 5.2) (Degner et al., 2002).

Ermittlung der spezifischen Schnittkraft:

$$F_c = b \cdot h \cdot k_c \Rightarrow k_c = \frac{F_c}{b \cdot h}; \quad \text{mit} \quad k_{c1.1} = \frac{k_c}{h^{m_c}} \quad (5.2)$$

Im Zuge von Schnittversuchen werden verschiedene Spannungsdicken h und Spanungsbreiten b festgelegt und die unter diesen Bedingungen auftretende Schnittkraft F_c gemessen. Diese Kraftwerte werden in Gleichung 5.2 eingesetzt und liefern die spezifische Schnittkraft k_c . Von der Funktion der spezifischen Schnittkraft k_c in Abhängigkeit von der Spannungsdicke h lassen sich die spezifische Schnittkraft $k_{c1.1}$ und die Tangente des Steigungswinkels m_c nach Gleichung 5.2 bestimmen.

Bei der Schnittgeschwindigkeit v_c von 100 m/min werden jeweils die Kräfte bei verschiedenen Vorschüben ($f = 0,05$; $f = 0,1$; $f = 0,2$ und $f = 0,5$ mm) für eine Schnitttiefe a_p von 1 mm und 2 mm gemessen. Beim Vorschub f von 0,5 mm bei der Schnitttiefe a_p von 2 mm konnte der Versuch wegen der niedrigen Maschinenleistung nicht realisiert werden. Dieser nicht gemessene Punkt wird rechnerisch bestimmt. Die Berechnung berücksichtigt eine konstante Steigerung der Schnittkraft bei steigendem Vorschub f bzw. Spannungsdicke h .

Es wird die Differenz zwischen den spezifischen Kräften bei Schnitttiefen a_p von 1 mm und 2 mm ($\Delta k_c = k_{c,ap1} - k_{c,ap2}$) ermittelt. Diese Differenz wird für alle drei gemessenen Schnittkräfte (bei $f = 0,05$; 0,1 und 0,2 mm) berechnet. Abbildung 5.7 stellt die graphische Abhängigkeit zwischen der berechneten Differenz Δk_c und den gefahrenen Vorschüben ($f = 0,05$; 0,1 und 0,2 mm) dar. Die daraus folgende Funktion definiert die Differenz Δk_c bei einem Vorschub von 0,5 mm. Anschließend wird die spezifische Schnittkraft k_c bei einem Vorschub von 0,5 mm und bei einer Schnitttiefe a_p von 2 mm nach Gleichung 5.3 bestimmt.

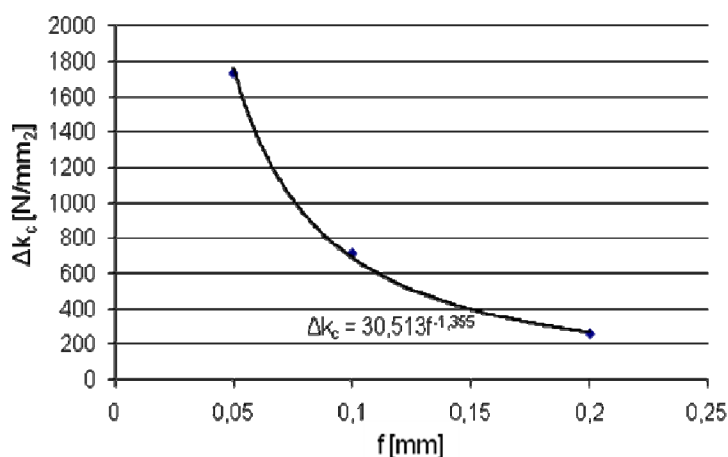
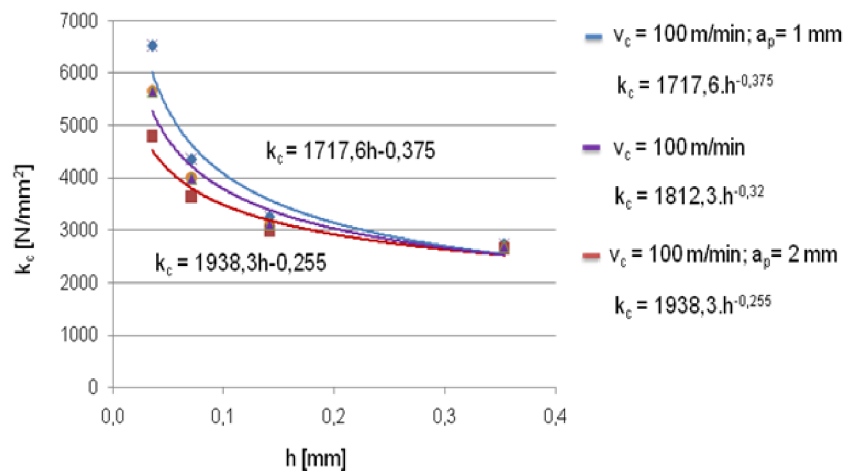
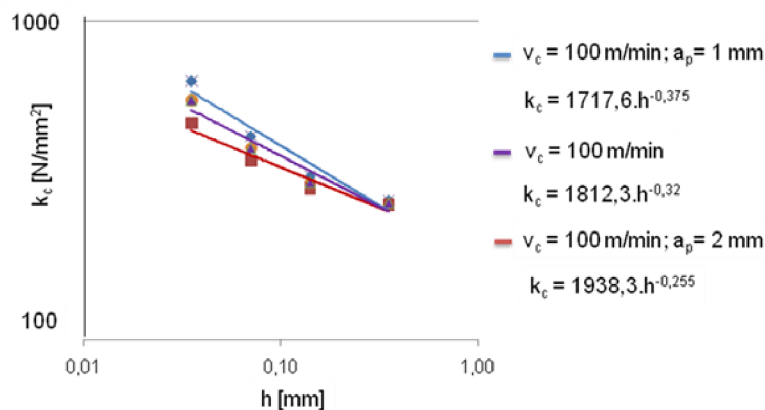


Abbildung 5.7 Ermittlung der Schnittkraft bei $v_c = 100$ m/min; $a_p = 2$ mm und $f = 0,5$ mm.

Bestimmung der Schnittkraft für $a_p = 2$ mm und $f = 0,5$ mm:

$$k_{c;ap2;f0,5} = k_{c;ap1;f0,5} - \Delta k_{c;f0,5} = k_{c;ap1;f0,5} - 30,513 \cdot f^{-1,355} \quad (5.3)$$

Anschließend wird der Verlauf des k_c -Werts in Abhängigkeit der Spannungsdicke h in linearer (Abbildung 5.7) und doppellogarithmischer Darstellung (Abbildung 5.8) für eine Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min dargestellt.

Abbildung 5.8 Bestimmung der $k_{c1.1}$ und m_c -Werte in linearer Darstellung.Abbildung 5.8 Bestimmung der $k_{c1.1}$ und m_c -Werte in linearer Darstellung.Abbildung 5.9 Bestimmung der $k_{c1.1}$ und m_c -Werte in logarithmischer Darstellung.

Unter Berücksichtigung des Modellansatzes der Exponentialfunktion können die spezifischen Schnittkräfte für den Werkstoff 100CrMn6 ermittelt werden. Für eine Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min resultiert eine Funktion entsprechend Gleichung 5.4.

Ermittelte Gleichung der spezifischen Schnittkraft bei $v_c = 100$ m/min:

$$k_c = 1812 \cdot h^{-0,32} \quad (5.4)$$

Daraus resultiert eine spezifische Schnittkraft von $k_{c1.1} = 1812$ N/mm² und eine Tangente des Steigungswinkels m_c von 0,32.

Die ermittelten $k_{c1.1}$ und m_c -Werte werden mit einem ähnlichen Material nach DIN 100Cr6 verglichen. Für den Werkstoff nach DIN 100Cr6 werden in der Literatur zwei verschiedene $k_{c1.1}$ und m_c Werte angegeben. Aus Tabelle 5.2 ist ersichtlich, dass die ermittelten $k_{c1.1}$ - und m_c Werte unterschiedlich sind. Dies wird durch einen unterschiedlichen Glühzustand und unterschiedliche Werkstoffeigenschaften wie beispielsweise zulässige Zugspannung R_m begründet.

Material:	R _m [MPa]	Werkstoff- nummer	k _{c1.1} [N/mm ²]	m _c [-]
100Cr6 [16]	Bis 850	1.2067	1410	0,39
100Cr6A [12]	624	1.3505	1726	0,28
100CrMn6	1125-1810	1.3520	1812	0,32

Tabelle 5.2 Ermittelte k_{c1.1}- und m_c-Werte vom Werkstoff 100CrMn6.

5.2 Untersuchung der Werkzeuggeometrie

Die Werkzeuggeometrie wird mit dem 3D-Oberflächenmessgerät Alicona Infinite Focus G3 gescannt.

Vom gescannten 3D-Modell werden der Schneidewinkel β , der Schneideradius r und der Spanwinkel γ durch einen Orthogonalschnitt bestimmt. Aus Abbildung 5.10 ist ersichtlich, dass zur Beschreibung des Schneidenprofils drei Linien und ein Kreis eingepasst werden.

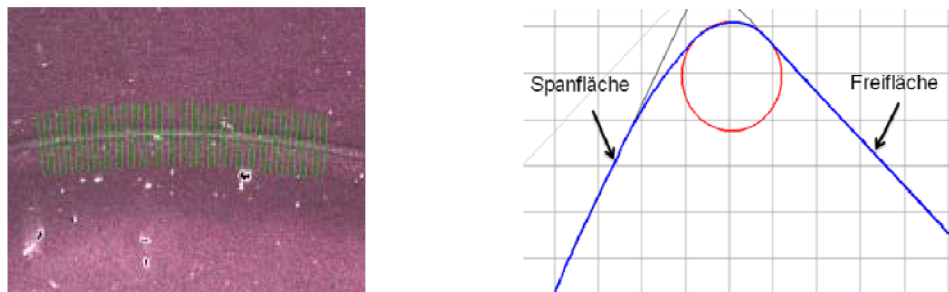


Abbildung 5.10 a) ausgewerteter Bereich an WSP - RNMG 120400, b) ermittelter Orthogonalschnitt.

Das gleiche Messungs- und Auswertungsverfahren wird auch für die restlichen Schneidplatten durchgeführt. Aus den ermittelten Parametern wird der tatsächliche Spanwinkel des Werkzeugs γ_o nach Gleichung 5.5 errechnet. Aufgrund des unterschiedlichen Spanwinkels bei geringen Schnitttiefen wird der Spanwinkel der WSP für diese Schnitttiefe ermittelt.

Berechnung des Spanwinkels des Werkzeugs:

$$\gamma_o = \gamma_{o,h} + \gamma_{o,w} - \alpha_o \quad (5.5)$$

5.2.1 Berechnung der Schnittleistung

Die Schnittleistung P_c wird über das Produkt der Schnittkraft F_c und der Schnittgeschwindigkeit v_c berechnet. Die Schnittgeschwindigkeit v_c wird aus dem jeweiligen NC-Programm bestimmt. Die Schnittkraft F_c wird nach dem Schnittkraftgesetz von Kienzle (siehe Gleichung 3.14) berechnet. Diese Gleichung rechnet mit idealen Parametern, deshalb wird sie den jeweiligen Einsatzfall um die Faktoren Spanwinkelkorrektur K_γ , Schnittgeschwindigkeitskorrektur K_v , Schneidstoffkorrektur K_{sch} und Kühlschmierstoffkorrektur K_{KSS} erweitert. Die Verschleißkorrektur wird vernachlässigt, weil die Messungen der Leistung unter Einsatz von unverschlissenen Werkzeugen durchgeführt wurden.

Nachfolgend wird die Schnittkraftberechnung am Beispiel des Teilprozesses Plandrehen beim Aussendrehen dargestellt. Die Spanfläche A wird wegen der nicht konstanten Schnitttiefe a_p und des großen Eckenradius des Werkzeugs graphisch mit Hilfe eines CAD-Programms bestimmt. Mit der konstruierten Spanfläche A (Abbildung 5.11) wird die Spanungsbreite b als Bogenlänge durch den Winkel α und den Eckenradius der WSP errechnet (Gleichung 5.6). Die Spanungsdicke h wird anschließend nach Gleichung 5.7 als Verhältnis der Spanfläche A zur Spanungsbreite b bestimmt.

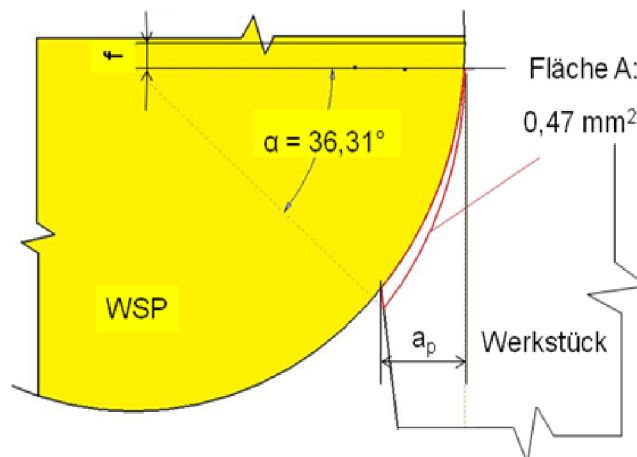


Abbildung 5.11 Konstruktion der Spanfläche beim Außendrehen.

Spanungsbreite:

$$b = r_\varepsilon \cdot \pi \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} \quad (5.6)$$

Spanungsdicke:

$$h = \frac{A}{b} \quad (5.7)$$

Die Spanwinkelkorrektur K_γ wird nach Gleichung 5.8 bestimmt. Dabei beträgt der Basiswinkel γ_0 für Stahlwerkstoffe 6° . Die Schnittgeschwindigkeitskorrektur K_v lässt sich nach Gleichung 5.9 bestimmen. Die Schneidstoffkorrektur K_{sch} für ein beschichtetes Werkzeug aus Hartmetall entspricht dem Wert von 0,94 und die Schnittgeschwindigkeitskorrektur beträgt 0,925 [13]. Der Faktor zur Kühlschmierstoffkorrektur beträgt 0,9 beim Einsatz von Kühlemulsion [15].

Berechnung der Spanwinkelkorrektur [13]:

$$K_\gamma = 1 - \frac{\gamma - \gamma_0}{66,7} \quad (5.8)$$

Kienzle-Gleichung zur Berechnung der Schnittkraft für beliebige Verwendung:

$$F_c = b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{c1.1} \cdot K_\gamma \cdot K_v \cdot K_{sch} \cdot K_{KSS} \quad (5.9)$$

Leistungsberechnung:

$$P_c = v_c \cdot F_c \quad (5.10)$$

Um die Energie des Teilprozesses nach Gleichung 5.14 zu ermitteln, wird die mittlere Schnittleistung und die Schnittzeit (Gleichung 5.12) des Teilprozesses (in diesem Fall Plandrehen) bestimmt.

Schnittzeit beim Plandrehen:

$$t_c = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4 \cdot f \cdot v_c} \quad (5.11)$$

Energieberechnung:

$$E_c = \int P_c(t) dt = \overline{P_c} \cdot t \quad (5.12)$$

5.3 Messung der Leistungsaufnahme

Die Messung der Leistungsaufnahme wird mit Hilfe des Leistungsmessgerätes LMG 500, sowie den Stromzangen L45-Z10 der Firma ZES (Zimmer Electronic Systems) und magnetischen Prüfspitzen - MultiContact XMA-11 Magnet-Messadapter realisiert. Alle verwendeten Geräte sind in Abbildung 5.12 dargestellt.

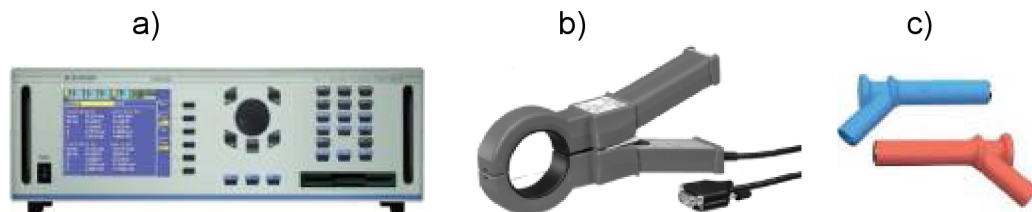


Abbildung. 5.12 a) Leistungsmessgerät LMG 500, b) Stromzange L45-Z10 und c) Magnetische Prüfspitze - MultiContact XMA-11 Magnet-Messadapter.

Das Leistungsmessgerät LMG 500 ermöglicht eine hochpräzise Aufzeichnung der Messwerte mit einer zeitlichen Auflösung von 50 ms und misst die Ströme $i(t)$ und Spannungen $u(t)$ in drei Phasen, aus welchen die Gesamtwirkleistung der Drehmaschine P_m bestimmt wird. Die Stromzangen L45-Z10 ermöglichen eine Messung von Strömen bis zu 1000 A. Die Spannungen $u(t)$ werden über die magnetische Prüfspitze MultiContact XMA-11 aufgenommen. Die Leistung wird mit Hilfe des LMG500 ermittelt, welche den Strom $i(t)$, die Spannung $u(t)$ und den Leistungsfaktor berechnet. Der Leistungsfaktor bezeichnet das Verhältnis vom Betrag der Wirkleistung zur Scheinleistung. Die Messdaten werden über die USB-Schnittstelle an den Messcomputer übertragen und mit dem Programm Matlab R2010b ausgewertet. Der Messungsverlauf mit den erwähnten Messgeräten ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

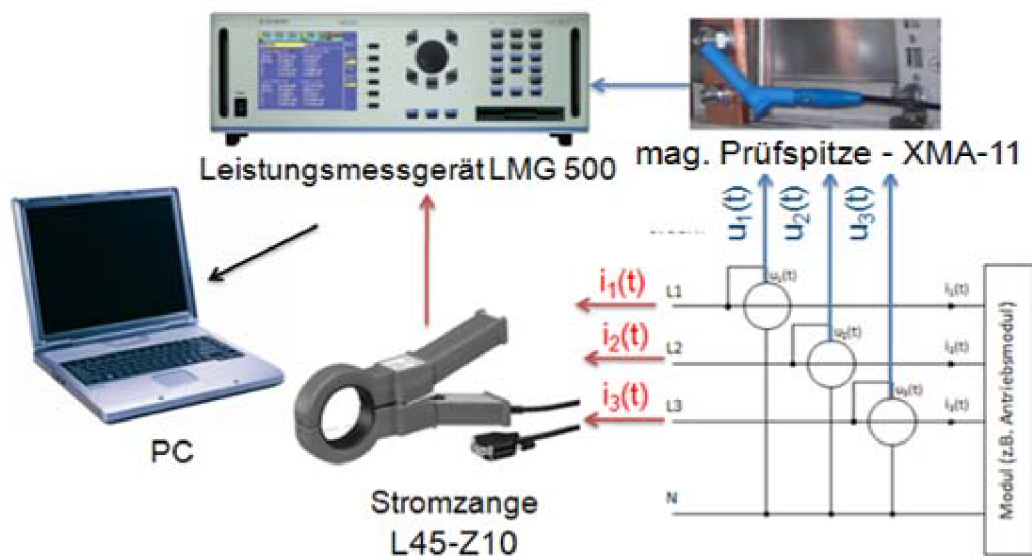
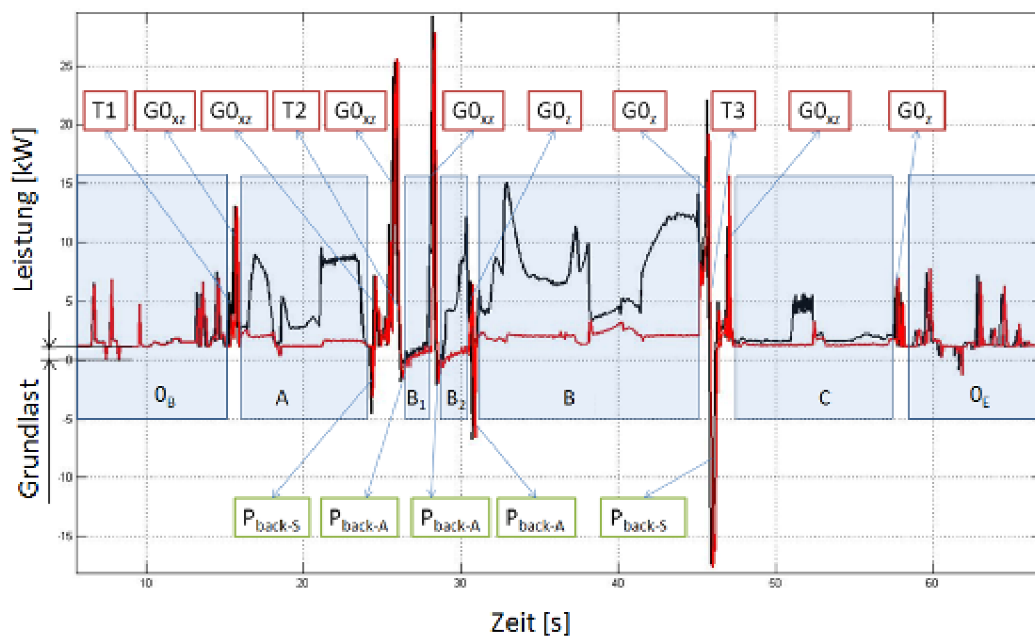


Abbildung 5.13 Verlauf der Leistungsmessung.

5.3.1 Messung der Leistungsaufnahme (Maschine 1)

Von dem oben beschriebenen Messungsverlauf wurde die Leistungskurve für die gesamte Leistung der WZM P_m sowie die Leistung im Leerlauf P_{nol} der Drehmaschine 1 ermittelt und ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Die schwarze Kurve zeigt den Leistungsverlauf der gesamten Leistung der Drehmaschine während der Bearbeitung P_m , d. h., dass die Schnitttiefe größer als Null ($a_p > 0$) ist. Die rote Kurve beschreibt den Leistungsverlauf im Leerlauf P_{nol} ($a_p = 0$). Der Unterschied P_d zwischen der schwarzen Leistungskurve P_m und der roten P_{nol} soll dem Wert der theoretischen Schnittleistung P_c entsprechen. Von der dargestellten Grafik in Abbildung 5.22 lässt sich die Grundlast P_b von 1,2 kW während der Stillstandzeit der Drehmaschine bestimmen. Die gemessenen Werte und die davon ermittelte Energieeffizienz der Maschine η_{Ed} von 44% (Gleichung 5.13) sind verhältnismäßig hoch. Im Vergleich zu den vom IFT in der Vergangenheit analysierten Maschinen, wurde eine Energieeffizienz η_{Ed} von 5 bis 25% (siehe Kapitel 2.2.4) ermittelt. Der im Zuge dieser Arbeit gemessene Maschinenzklus besteht aus drei Drehprozessen (Außendreihen - A, Innendreihen - B und Einstechen - C), einem Beladeprozess (0_B) und einem Entladeprozess (0_E).



T1, T2, T3 – Werkzeugwechsel P_{back-S} – rückgespeiste Leistung des Spindelstopps O_B – Beladen
 $G0_{xz}$ – Eilgang in X- und Z-Achse P_{back-A} – rückgespeiste Leistung der Achsenbremsung A – Außendreihen
 $G0_x$ – Eilgang in X-Achse C – Einstechen
 $G0_z$ – Eilgang in Z-Achse O_E – Entladen

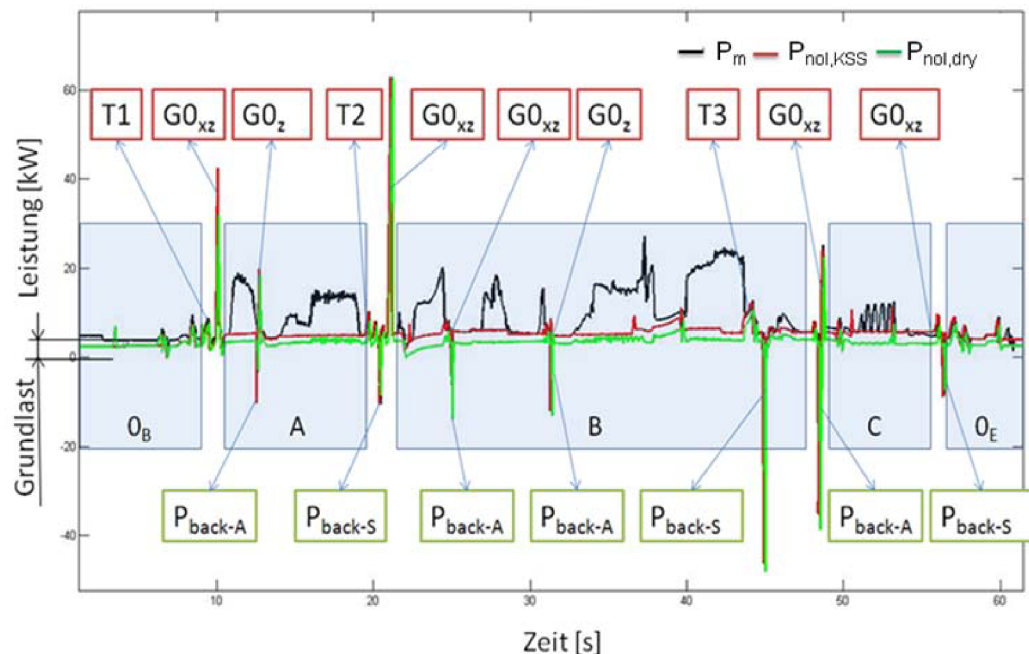
Abbildung 5.14 Leistungsmessung Okuma LTV300.

Energieeffizienz:

$$\eta_{Ed} = \frac{E_d}{E_m} \quad (5.13)$$

5.3.2 Messung der Leistungsaufnahme (Maschine 2)

Vom oben beschriebenen Messungsverlauf wurde die Leistungskurve für die Gesamtleistung der WZM P_m und der Leistung im Leerlauf P_{noi} für die Drehmaschine 1 ermittelt und in Abbildung 5.15 dargestellt. Die schwarze Kurve zeigt den Leistungsverlauf der Gesamtleistung der Drehmaschine während der Bearbeitung P_m , d.h., die Schnitttiefe a_p ist größer als Null ($a_p > 0$). Die rote Kurve beschreibt den Leistungsverlauf im Leerlauf $P_{noi,KSS}$ ($a_p = 0$) bei eingeschalteter Kühlschmierstoffpumpe. Die grüne Kurve stellt die Leistung im Leerlauf ohne die eingeschaltete Kühlschmierstoffpumpe $P_{noi,dry}$ dar. Aus der dargestellten Grafik in Abbildung 5.15 lässt sich auch die Grundlast P_b von 3,85 kW in der Stillstandzeit der Drehmaschine bestimmen. Die gemessenen Werte und die davon ermittelte Energieeffizienz der Maschine von 39,8% (Gleichung 5.14) sind verhältnismäßig hoch im Vergleich zu den analysierten Maschinen am IFT, die eine Energieeffizienz von 5 bis 25% (siehe Kapitel 2.2.4) aufweisen. Der gemessene Maschinenzklus besteht aus drei Drehprozessen (Außendreihen - A, Innendreihen - B und Einstechen - C), einem Beladeprozess (O_B) und einem Entladeprozess (O_E).



T1, T2, T3 – Werkzeugwechsel
 G0_{xz} – Eilgang in X- und Z-Achse
 G0_x – Eilgang in X-Achse
 G0_z – Eilgang in Z-Achse

P_{back-S} – rückgespeiste Leistung des Spindelstopps
 P_{back-A} – rückgespeiste Leistung der Achsenbremsung

O_B – Beladen
 A – Außendrehen
 B – Innendrehen
 C – Einstechen
 O_E – Entladen

Abbildung. 5.15 Leistungsmessung (Scherer VDZ-120).

Energieeffizienz:

$$\eta_{Ed} = \frac{E_d}{E_m} \quad (5.14)$$

5.4 Ermittlung der Standzeitkurve

Die Standzeitkurve wird durch den Einfluss der Schnittparametern (v_c , f und a_p) auf die Standzeit des Werkzeugs T beschrieben (Gleichung 5.30). Bei diesem Versuch wurden lediglich die Einflüsse der Schnittgeschwindigkeit v_c und des Vorschubs f berücksichtigt. Dabei muss ein gleiches Standkriterium verwendet werden. Der Einfluss der Schnitttiefe a_p wird durch einen Exponenten x beschrieben. Der Exponent x wird aus den ermittelten Ergebnissen nach der Taylorgleichung (5.15) bestimmt.

Taylorgleichung:

$$T^m = \frac{C'}{a_p^x \cdot f^y \cdot v_c} \quad (5.15)$$

Als Standkriterium wird die Oberflächenqualität der Radiusfläche ausgewählt. Dabei hat das Entstehen des Grates auf dem Übergang von der Stirnfläche zur 25°-Kante die größte Bedeutung. Die blau markierte Fläche bzw. die rot markierte Kante in Abbildung 5.38 zeigen die zu untersuchende Fläche bzw. Kante. Zusätzlich wird die Maßhaltigkeit des Fertigteils berücksichtigt. Die Auswahl eines Standkriteriums für das

Außendreihen und das Einstechen würde den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen.

Dieses Standkriterium stellt eine indirekte Messung des Werkzeugverschleißes dar. Das Innendrehen weist unterschiedliche Vorschübe auf, deswegen wird der Vorschub f in Prozent [%] angegeben. Der Wert von 100% stellt die ursprünglichen Vorschubsgrößen dar, die vom NC Programm stammen.

Aus bestimmten Standzeiten T wird eine Standzeitgerade bei einer doppellogarithmischen Teilung dargestellt. Daraus wird eine Exponentialfunktion ermittelt, die die Abhängigkeit der Standzeit T von der Schnittgeschwindigkeit v_c und die Abhängigkeit der Standzeit T vom Vorschub f beschreiben.

6 MODIFIKATION DES PROZESSES UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER ZIELE

Die Optimierung des Energieeinsatzes geschieht stets im Spannungsfeld der Werkzeugmaschinen. Zu diesen Eigenschaften zählen die mechanischen Struktureigenschaften, welche insbesondere das Leistungsvermögen, die Arbeitsgenauigkeit, die Zuverlässigkeit, sowie das Umweltverhalten beeinflussen (Abbildung 6.1) [2].

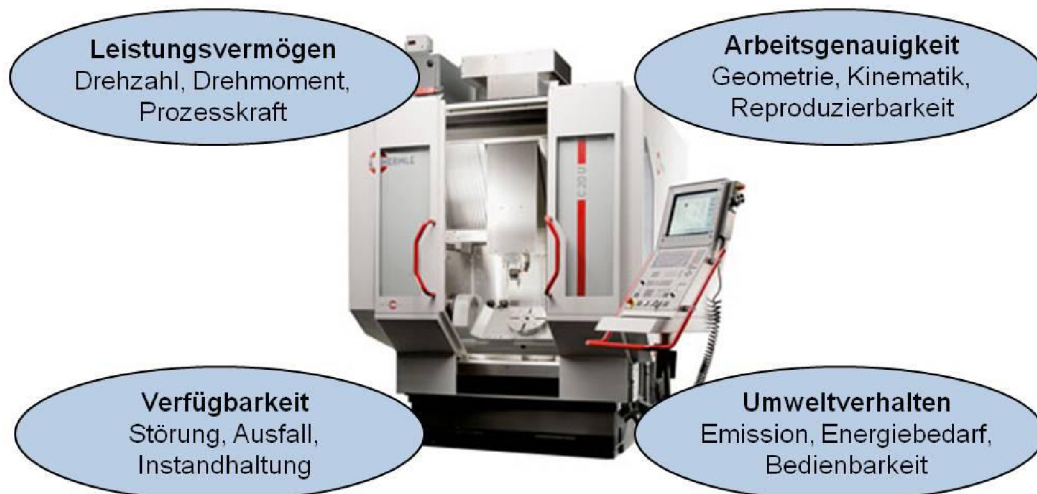


Abbildung 6.1 Eigenschaften der Werkzeugmaschine [7].

Der enge Zusammenhang der vier Eigenschaften untereinander erfordert bei jeder Optimierung die Betrachtung der entsprechenden Wechselwirkungen. Eine derartige Strukturoptimierung kann jedoch zum Beispiel auf Grund möglicher Einbußen bei der statischen und dynamischen Steifigkeit oder der installierten Maschinenleistung Auswirkungen auf die Arbeitsgenauigkeit, das Leistungsvermögen, sowie auf die Zuverlässigkeit mit sich bringen [2].

Eine direkte Optimierung der Energieaufnahme ermöglicht eine detaillierte Analyse der Haupt- und Nebenaggregate, sowie eine komplexere Steuerungstechnik. Durch günstigere Haupt- und Nebenaggregate wird die Grundlast P_b reduziert. Wegen der verhältnismäßig niedrigen Grundlast der beiden Drehmaschinen wird dadurch keine wesentliche Energieeinsparung erzielt. Deshalb wird eine Energiereduzierung, in diesem Fall durch eine technologische Optimierung des Drehprozesses und eine Modifikation der Maschinendynamik, realisiert.

6.1 Modifikation der Maschinendynamik

Ein günstigerer Energieverbrauch des Drehprozesses soll durch die folgenden Modifikationen der Maschinenbewegungen erzielt werden:

- Änderung der Fertigungsfolge,
- Einsatz von unterbrochenem Vorschub,
- Reduzierung der Leistungsspitzen.

6.1.1 Änderung der Fertigungsfolge

Als Hauptziel dieser Modifikation wird die Reduzierung der Schnittzeit t_c und der Nebenzeit t_N durch eine Änderung der Arbeitsfolge betrachtet.

Beim Innendrehen wird das Schrägdrehen bei der Maschine 2 lediglich in einem Drehvorgang realisiert, wie es beim Drehprozess auf der Maschine 1 durchgeführt wird.

Beim Innendrehen wird das erste. Schruppen zweiter Stirnfläche entfernt. Die zweite Stirnfläche wird lediglich in einem Schruppvorgang gedreht, wie es beim Drehprozess auf der Maschine 2 durchgeführt wird.

Der Belade- und Entladeprozess beim Drehen auf der Maschine 1 wird modifiziert. Dabei werden die nicht funktionellen Bewegungen entfernt.

Um den Energieverbrauch beim Span-zu-Span Vorgang (0_{T3}) zu reduzieren, wird ein Doppelhalter vom Werkzeug T02 und T03 eingesetzt.

6.1.2 Einsatz von unterbrochenem Vorschub

Die ungünstige Spanbildung beeinflusst direkt die benötigte Energie durch die Entstehung der Aufbauschneide, sowie indirekt durch die Verlängerung der Nebenzeit. Ein kontinuierlicher Spanbruch wird durch den Einsatz von unterbrochenem Vorschub (Funktion G64) gewährleistet. Die Funktion G64 unterbricht den programmierten Vorschub f kurzzeitig. Dabei beschleunigt sich der Schlitten auf den programmierten Vorschub und bremst am Ende des definierten Intervalls bis auf „Vorschub Null“ ab [18].

Die Funktion G64 stellt einen Nachteil in der Form der Positionierung des Werkzeugs bei den tolerierten Abmessungen dar. Eine genaue Positionierung wird mittels der Funktion G09 gewährleistet (Abbildung 6.2). Die daraus resultierende Verlängerung der Schnittzeit wird vernachlässigt.

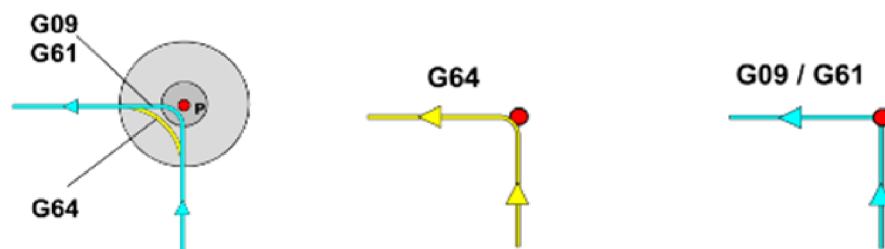


Abbildung 6.2 Vergleich der G64 und G9 [17]

Durch einen kontinuierlichen Spanbruch wird die Steigerung der Schnittkraft F_c durch die Aufbauschneide verhindert. Eine weitere Reduzierung der Nebenzeit stellt die Eliminierung der manuellen Entfernung der Fließspäne vom Werkzeug und vom Arbeitsraum sowie die Eliminierung der möglichen Verstopfung durch Späne im Späneförder dar.

6.1.1 Einsatz der Kreisinterpolation beim Span-zu-Span Vorgang

Die höchsten Leistungsspitzen entstehen in den Eilgängen ($G0_x$ und $G0_z$) bei der Span-zu-Span Bewegung. Deshalb werden alle Span-zu-Span Eilgänge durch eine Kreisinterpolation ($G02$ oder $G03$) durchgeführt. Aus Abbildung 6.3 ist ersichtlich, dass die Z-Achse beim Einsatz der

Kreisinterpolation G02 fließend abgebremst und die X-Achse gleichzeitig fließend beschleunigt wird. Dies soll zur Reduzierung der Leistungsspitzen führen.



Abbildung 6.3 Kombination vom Eilgang der Z- und der X-Achse durch eine Kreisinterpolation (G02)

6.2 Optimierung der Schnittparameter

Eine energieoptimale Bearbeitung von Werkstücken lässt sich zum Beispiel durch eine Änderung der Schnittparameter, wie der Schnittgeschwindigkeit v_c und des Vorschubs f erzielen. Die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub beeinflussen wesentlich die Leistungsaufnahme, die Schnittzeit und den Werkzeugsverschleiß. Deshalb wird eine Energieabnahme oft als eine kürzere Standzeit des Werkzeugs bezeichnet. Einen wesentlichen Faktor stellen die durch die variable Schnittzeit veränderten gesamten Fertigteilkosten dar. Deswegen werden drei verschiedene Kurven bei diesem Optimierungsverfahren ermittelt.

Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der gesamten Energiekosten C_E (Gleichung 6.1) bei der variablen Schnittgeschwindigkeit v_c bzw. beim variablen Vorschub f . Die Gesamtenergie wird als die Summe der gemessenen Energie im Leerlauf E_{nol} und der berechneten Schnittenergie E_c bestimmt.

Berechnung der Energiekosten:

$$C_E = E_m \cdot c_{kWh} = (E_{nol} + E_c) \cdot c_{kWh} \quad (6.1)$$

Die zweite Kurve stellt den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c bzw. des Vorschubs f auf die Werkzeugkosten C_{tool} dar. Die Werkzeugkosten werden nach Gleichung 6.3 durch die Standzeit des Werkzeugs T (Gleichung 6.2) ermittelt. Die Koeffizienten m , C' , x und y werden in Kapitel 5.4 bestimmt.

Berechnung der Standzeit:

$$T^m = \frac{C'}{a_p^x \cdot f^y \cdot v_c} \quad (6.2)$$

Berechnung der WSP-Kosten:

$$C_{tool} = \frac{C_{WSP}}{N} = \frac{C_{WSP} \cdot t_{pr}}{T} = \frac{C_{WSP} \cdot t_{pr}}{\sqrt[m]{a_p^x \cdot f^y \cdot v_c}} \quad (6.3)$$

Durch die dritte Kurve werden die sogenannten Maschinenkosten in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit v_c und des Vorschubs f beschrieben. Die Maschinenkosten C_M stellen die gesamten Fertigteilkosten C_{total} ohne Energiekosten C_E und ohne Werkzeugkosten C_{tool} dar. Ihre Größe wird aus dem Maschinenstundensatz $C_{total,h}$, der Prokutionzeit in Prozent PZ und der Zykluszeit t_z bestimmt, wie Gleichung 6.4 darstellt.

Berechnung der Maschinenkosten pro Fertigteil:

$$C_{M,Z} = \frac{C_{total,h} - C_{E,h} - C_{tool,h}}{\frac{3600}{t_z} \cdot \frac{PZ}{100}} \cdot \frac{PZ}{100} \quad (6.4)$$

Zum Erreichen der geforderten Oberflächenqualität des Fertigteils wird der maximale Vorschub f_{max} nach Gleichung 6.5 berechnet. Dieser stellt den größten Vorschub, mit dem der Sollrauheitswert R_z bzw. R_a noch gewährleistet wird.

Berechnung des theoretischen Rauheitswerts R_z [13]:

$$R_z \approx R_t = 125 \frac{f^2}{r_\epsilon} \Rightarrow f_{max} = \sqrt{\frac{R_z \cdot r_\epsilon}{125}} \quad (6.5)$$

Beim Außendrehen und beim Einstechen wird keine Standkurve und daraus folgend kein Koeffizient (m , C' , x und y) ermittelt. Deshalb werden die oben die beschriebenen Kurven für alle Teilprozesse lediglich beim Innendrehen dargestellt.

Abbildung 6.4 stellt die Abhängigkeit der Fertigungskosten von der Schnittgeschwindigkeit v_c für das Schruppen der zweiten Stirnfläche dar. Die günstigen Schnittgeschwindigkeiten $v_{c,günstig}$ stammen aus dem Bereich von 300 bis 340 m/min. Daraus entstehen die niedrigsten Fertigungskosten bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_{c,opt}$ von 340 m/min. Der Unterschied zwischen den Fertigungskosten ist im Bereich der günstigen Schnittgeschwindigkeiten vernachlässigbar, wie in Abbildung 6.4 dargestellt ist.

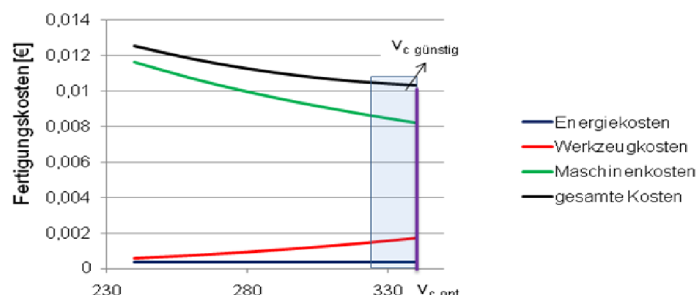


Abbildung 6.4 Graphische Darstellung der Fertigungskosten bei variablen Schnittgeschwindigkeiten.

Abbildung 6.5 stellt die Abhängigkeit der Fertigungskosten vom Vorschub f für das Schruppen der zweiten Stirnfläche (B_2) dar. Die günstigen Vorschübe stammen aus dem Bereich von 0,6 bis 0,7 mm. Daraus entstehen die niedrigsten Fertigungskosten beim Vorschub f_{opt} von 0,7 mm.

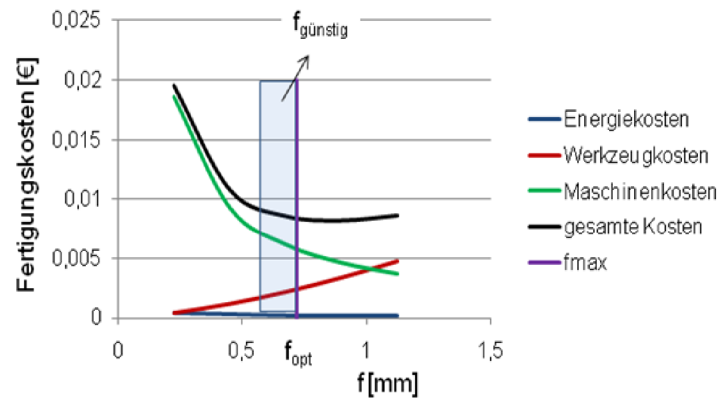


Abbildung 6.5 Graphische Darstellung der Fertigungskosten bei variablen Schnittgeschwindigkeiten.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit behandelt unterschiedliche Optimierungsansätze bezüglich des Energiebedarfs von Drehmaschinen bei der Produktion eines Kegelrollenlagers unter der Berücksichtigung der Werkzeugkosten und der Fertigungszeit.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die detaillierte Untersuchung des Energieverbrauchs der eingesetzten Drehmaschinen. Bei dieser Betrachtung werden sämtliche Teilprozesse eines Produktionszyklus in Haupt- und Nebenzeiten eingeteilt und der Energiebedarf mittels Leistungsmessung bestimmt.

Die Analyse des IST-Bestandes zeigt, dass die Bedingungen zum direkten Vergleich der eingesetzten Drehmaschinen nicht gegeben sind, da die eingesetzten Drehprozesse teilweise unterschiedliche Schnittparameter und teilweise unterschiedliche Werkzeuge aufweisen.

Die Effektivität der eingesetzten Energie der Drehmaschinen wurde mit dem Energieeffizienzfaktor des Bearbeitungsprozesses η_{Ed} sowie der Schnittenergie η_{Ec} bewertet. Die Bestimmung dieser Faktoren benötigt eine direkte Messung der Gesamtleistung der Maschine, der Leistung im Leerlauf und eine Berechnung der Schnittleistung. Damit die Berechnung der Schnittenergie E_c aus der Schnittleistung P_c möglich war, wurde die Schnittkraft F_c nach dem Schnittkraftmodell von Viktor Kienzle bestimmt. Dies benötigt Kenntnisse der spezifischen Schnittkraft und der Werkzeuggeometrie, welche ebenfalls im Zuge dieser Arbeit ermittelt wurden.

Die gemessenen Leistungen und die daraus berechneten Energien weisen bei beiden Drehmaschinen eine hohe Energieeffizienz η_{Ed} im Vergleich zu den vom IFT in der Vergangenheit analysierten Maschinen ($\eta_{Ed} = 5 - 25\%$) auf. Die Energieeffizienz der Maschine 1 beträgt 44%. Dagegen beträgt die Energieeffizienz der Maschine 2 VDZ-120 40%.

Nach der Ermittlung des IST Stands wurden die Teilprozesse nach der benötigten Energie eingeteilt und mit der Optimierung der Prozesse mit dem größten Energiebedarf begonnen. Zusätzlich wurde ein graphischer Vergleich der gemessenen Differenzleistung und der berechneten Schnittleistung dargestellt, um zusätzliche Einflussfaktoren, wie z.B. eine Aufbauschneide des Werkzeugs, zu beschreiben. Schlussendlich wird eine Standzeitkurve für die Bestimmung der Koeffizienten der Taylor Gleichung erstellt um die Werkzeugkosten beschreiben zu können.

In diesem Fall ist der Anteil der Grundlast der Drehmaschine am Gesamtenergieverbrauch wesentlich geringer als die benötigte Energie für die Spanbildung. Deshalb wurde eine Reduzierung des Energieverbrauchs durch die Modifikation der Maschinendynamik und Optimierung der Schnittparameter beim Innendrehen realisiert. Dabei wurden die Zykluszeit um 15% bzw. 16,2% und die Energiekosten um 9,3% bzw. 7,3% bei der Maschine 1 bzw. 2 reduziert. Hingegen konnten die gesamten verringert werden. Zusätzlich wurde eine Verbesserung des Spanbruchs und eine Reduzierung der Leistungspitzen erzielt. Die Optimierungsansätze wurden theoretisch

ermittelt, die praktische Durchführung dieser Ansätze sind nicht Teil dieser Arbeit.

Wie die verwendeten Optimierungsverfahren darstellen, ist der Einsatz der technologischen Optimierungsverfahren des Energieverbrauchs durch die maximalen Schnittparameter, durch den Werkzeugverschleiß und durch die Qualität des Fertigteils limitiert. Diese Begrenzung erschwert den zukünftigen Einsatz dieser Modifikationen. Die Energieeffizienz lässt sich durch den Einsatz von günstigeren Haupt- und Nebenaggregaten erhöhen. Da dies eine Investition in neue Aggregate fordert, kann eine Berücksichtigung des Energieverbrauchs beim Einkauf einer neuen Drehmaschine auch als ein Optimierungsverfahren angesehen werden.

QUELLENVERZEICHNIS

1. SCHMID. *Moderne Produktionstechniken im Automobilbau*. Technische Universität in Graz, Institut für Fertigungstechnik. Hochschüllerschaft an der TU Graz, 2007. 301 Seite.
2. DORN. *Untersuchung zur Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der kinematischen Struktur un der Prozesskräfte*. Industrielles Symposium Mechatronik, Smart Produktion. Linz, 18.11.2010.
3. *Aspekte der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen*, Dr. Johannes Heidenhain GmbH, [online]. [zitiert 5. Februar 2011]. Erreichbar an World Wide Web: <Energieeffizienz_WZM_de.pdf >
4. *Technologie und Werkzeugmaschine*. Institut für Produktionsmanagement, Symposium, METAV Düsseldorf, 24.2.2010
5. BLEICHER, KOPAC, MEYER, STICH. *HPM – High Performance Manufacturing*. Technische Universität Wien, Institut für Fertigungstechnik, 2008. 272 Seite.
6. *LVT Series – LVT300*. [online]. [zitiert 20. Mai 2011]. Erreichbar an World Wide Web: <<http://www.okuma.de/mainframe.asp?lang=en&e1=952>>
7. WECK, BRECHER. *Werkzeugmaschinen. Konstruktion und Berechnung*. Springer-Verlag, Berlin 2006
8. WECK, BRECHER. *Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche. Band 1: Maschinenarten, Bauformen und Anwendungsbereiche*. WZL Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre Aachen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 599 Seite.
9. WECK, BRECHER. *Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche. Band 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung*. WZL Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre Aachen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 493 Seite.
10. KLOCKE, KÖNIG. *Fertigungsverfahren 1. Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 562 Seite.
11. TÖNSHOFF; DENKENA. *Spanen Grundlagen*. Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 284 Seite.
12. PAUCKSCH, HOLSTEN, LINß, TIKAL. *Zerspantechnik Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. Viewegh + Theubner Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008. 473 Seite.

13. BLEICHER. *Spanende Fertigungsverfahren*. Technische Universität Wien, Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik. 242 Seite.
14. FRITZ, SCHULZE. *Fertigungstechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 467 Seite.
15. *Formelsammlung Drehen* [online]. [zitiert 20. April 2011]. Erreichbar an World Wide Web: <wiki.techniker-forum.de/Formelsammlung_Drehen>
16. *Garant Handbuch Zerspanen*. Hoffmann Group 2007. 771 Seite.>
17. *Vision. Emco industrial training system*. Emco group. [online]. [zitiert 3. Mai 2011]. Erreichbar an World Wide Web: <<http://almandeel.net/MET237/VISION%20-%20FANUC-0M-21M.pdf>>
18. *Benutzer-Handbuch MANUALplus4110*, Dr. Johannes Heidenhain GmbH, [online]. [zitiert 5. Mai 2011]. Erreichbar an World Wide Web: <www.heidenhain.de/doku/manualsplus4110/pdf/354%20267-15.pdf>
19. *Edelstahlwerke* [online]. [zitiert 20. April 2011]. Erreichbar an World Wide Web: <www.format.mwn.de/werkstoffe/werkDetails.do>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1 Werkzeugmaschinen als technisches System [5].	9
Abbildung 2.1 Bezeichnung der Fertigungssysteme nach dem Automatisierungsgrad [8].	11
Abbildung 2.2 Zu beurteilende Eigenschaften von Werkzeugmaschinen [9].	13
Abbildung 2.3 Energieflüsse entlang der Fertigungskette. [2].	14
Abbildung 2.4 Aufteilung der gesamten Leistung der WZM, bearbeitet nach [2].	15
Abbildung 2.5 Leistungsverlauf und Energieparameter während des Außendrehens.	16
Abbildung 2.6 Exemplarische energetische Kostenverteilung eines Bearbeitungszentrums. [4].	17
Abbildung 2.7 Graphische Darstellung der Energieeffizienz der Antriebskomponenten [3].	18
Abbildung 2.8 Gliederung der Werkzeugmaschinen [8].	19
Abbildung 2.9 Konstruktive Komponenten und Bauformen von Drehmaschinen [8].	20
Abbildung 2.10 Systematik der Drehmaschinen-Bauformen. [8].	21
Abbildung 2.11 Werkstückwechsel mit Pick-Up-Spindel [8].	22
Abbildung 2.12 Zwischenspindel-Senkrecht Drehmaschine [8].	22
Abbildung 3.1 Zonen der Spanentstehung [11].	24
Abbildung 3.2 Geschwindigkeit der Hauptbewegungen [12].	25
Abbildung 3.3 Drehwerkzeug in verschiedenen Schnittebenen [12].	26
Abbildung 3.4 Schnittgrößen und Spanungsgrößen bei Werkzeugen mit gerader Schneide ohne Eckenrundung [12].	26
Abbildung 3.5 Flächen, Schneiden und Schneidenecke am Drehwerkzeug [12].	27
Abbildung 3.6 Spanbildungsarten [11].	27
Abbildung 3.7 Aufbauschneidenbildung [11].	28
Abbildung 3.8 Spanformen [10].	29
Abbildung 3.9 Verschleißformen und -messgrößen am Schneidteil [10].	29
Abbildung 3.10 Verschleiß von unbeschichtetem Hartmetall beim Zerspanen von Vergütungsstahl. [10].	31
Abbildung 3.11 Standzeitkurve im log. System (Vergütung/Hartmetall). [10].	31
Abbildung 3.12 Komponenten der Zerspankraft bei Drehen, nach DIN 6584.	32
Abbildung 3.13 Werkzeug-Bezugssystem und nomineller Spanungsquerschnitt [10].	34
Abbildung 3.14 Verfahrensvarianten des Plandrehens [10].	34
Abbildung 3.15 Verfahrensvarianten des Runddrehens. [10].	35
Abbildung 3.16 Innendrehen [10].	35
Abbildung 3.17 Werkzeugformen für verschiedene Bearbeitungsaufgaben beim Drehen [14].	36
Abbildung 3.18 Klemmsysteme für Wendeschneidplatten [14].	36
Abbildung 4.1 Standvermögen [10].	38
Abbildung 4.2 Maschinenstruktur einer Drehmaschine mit vertikaler Spindel [10].	39
Abbildung. 5.1 Anforderungen an Verfahren zur Erfassung von Maschineneigenschaften [9].	40
Abbildung 5.2 Drehmaschine HAAS TL2-HE.	41

Abbildung 5.3 Versuchsaufbau.	41
Abbildung 5.4 a) piezobasierende Kistler-Dynamometer z3392b und b) Ladungsverstärker Kistler 5070.	42
Abbildung 5.5 Kraftverlauf in Labview bei $v_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0,1$ mm.	43
Abbildung 5.6 Kraftverlauf in Labview bei $v_c = 50$ m/min, $a_p = 2$ mm, $f = 0,05$ mm.	43
Abbildung 5.7 Ermittlung der Schnittkraft bei $v_c = 100$ m/min; $a_p = 2$ mm und $f = 0,5$ mm.	44
Abbildung 5.8 Bestimmung der $k_{c1.1}$ und m_c -Werte in linearer Darstellung.	45
Abbildung 5.9 Bestimmung der $k_{c1.1}$ und m_c -Werte in logarithmischer Darstellung.	45
Abbildung 5.10 a) ausgewerteter Bereich an WSP - RNMG 120400, b) ermittelter Orthogonalschnitt.	46
Abbildung 5.11 Konstruktion der Spanfläche beim Außendrehen.	47
Abbildung. 5.12 a) Leistungsmessgerät LMG 500, b) Stromzange L45-Z10 und c) Magnetische Prüfspitze - MultiContact XMA-11 Magnet-Messadapter.	48
Abbildung 5.13 Verlauf der Leistungsmessung.	49
Abbildung 5.14 Leistungsmessung Okuma LTV300.	50
Abbildung. 5.15 Leistungsmessung (Scherer VDZ-120).	51
Abbildung 6.1 Eigenschaften der Werkzeugmaschine [7].	53
Abbildung 6.2 Vergleich der G64 und G9 [17]	54
Abbildung 6.3 Kombination vom Eilgang der Z- und der X-Achse durch eine Kreisinterpolation (G02)	55
Abbildung 6.4 Graphische Darstellung der Fertigungskosten bei variablen Schnittgeschwindigkeiten.	56
Abbildung 6.5 Graphische Darstellung der Fertigungskosten bei variablen Schnittgeschwindigkeiten.	57

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1 Größenordnung der Verschleißmarkenbreiten in Abhängigkeit des Drehverfahrens	30
Tabelle 5.1 Wendeschneidplatte – Abmessungen	42
Tabelle 5.2 Ermittelte $k_{c1.1}$ - und m_c -Werte vom Werkstoff 100CrMn6.....	46

ABKÜRZUNG- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Abkürzung/Symbol	Einheit	Beschreibung
A	[mm ²]	Spanfläche
a _p	[mm]	Schnitttiefe
b	[mm]	Spanungsbreite
C _E	[€]	Energiekosten
C _{E,0}	[€]	Ursprüngliche Energiekosten
C _{E,opt}	[€]	Optimierte Energiekosten
C _{EPZ}	[€]	Energiekosten während der Produktionzeit
C _{ESZ}	[€]	Energiekosten während der Stillstandzeit
C _{kWH}	[€/kWh]	Stompreis
C _M	[€]	Maschinenkosten
C _{tool}	[€]	Werkzeugkosten
C _{total}	[€]	Gesamte Fertigungskosten
C _{total,0}	[€]	Ursprüngliche gesamte Fertigungskosten
C _{total,opt}	[€]	Optimierte gesamte Fertigungskosten
D, d, Ø	[mm]	Durchmesser
e	[J/mm ³]	Spezifische Energie
E _{AIR}	[kWh]	Energie der Luftdruckerzeugung
E _e	[kWh]	Eintrittsenergie
E _{KSS}	[kWh]	Energie der Kühlschmierstoffaufbereitung
E _m	[kWh]	Gesamte Energie der WZM
E _{NE}	[kWh]	Nebenenenergie
E _{vc}	[kWh]	Mechanische Energie des CNC- Steuerungspakets mit Hauptspindel
E _{vf}	[kWh]	Mechanische Energie des CNC- Steuerungspakets mit Vorschubantrieb
F	[N]	Kraft
F	[N]	Zerspankraft
f	[mm]	Vorschub
f ₀	[mm]	Ursprünglicher Vorschub
F _a	[N]	Aktivkraft
F _c	[N]	Schnittkraft
F _D	[N]	Drangkraft
F _f	[N]	Vorschubkraft
f _{opt}	[mm]	Optimierter Vorschub
F _p	[N]	Passivkraft
G	[m/N]	Nachgiebigkeit
h	[mm]	Spanungsdicke
k _c	[N/mm ²]	Spezifische Schnittkraft
k _{c1.1}	[N/mm ²]	Spezifische Schnittkraft
KL	[mm]	Kolklippe

KM	[mm]	Kolkmittenabstand
KT	[mm]	Kolktiefe
k_x	[N/m]	Steifigkeit der X-Achse
k_z	[N/m]	Steifigkeit der Z-Achse
l	[mm]	länge
m_{CO_2}	[kg]	Freigesetzte Masse von Kohlendioxid
n	[U/min]	Drehzahl
N	[St]	Standmenge
n_{Teil}	[St]	Anzahl der Teilen
P_b	[kW]	Grundlast
P_{back-A}	[kW]	Rückgespeite Leistung des Spindelstopps
P_{back-S}	[kW]	Rückgespeite Leistung der Achsenabbremung
P_c	[kW]	Schnittleistung
P_d	[kW]	Differenzleistung
P_e	[kW]	Wirkleistung
P_f	[kW]	Vorschubleistung
P_m	[kW]	Gesamtleistung der WZM
P_{nol}	[kW]	Leistung im Leerlauf
PZ	[%]	Produktionszeit in Prozent
Q_{span}	[mm ³]	Spanvolumen
Q_w	[mm ³]	Abgetragenes Werkstoffvolumen
R	[mm]	Radius
R_m	[MPa]	Zulässige Zugspannung
r_ϵ	[mm]	Eckenradius
s	[mm]	Dicke
SV_α	[mm]	Schneidenversatz in Richtung Freifläche
SV_λ	[mm]	Schneidenversatz in Richtung Spanfläche
t	[s]	Zeit
t_c	[s]	Schnittzeit
$t_{c,0}$	[s]	Ursprüngliche Schnittzeit
$t_{c,opt}$	[s]	Optimierte Schnittzeit
t_h	[s]	Hauptnutzungszeit
t_N	[s]	Nebenzeit
t_{PZ}	[s]	Produktionszeit
t_T	[s]	Auslaufzeit
$t_{\dot{u}}$	[s]	Überlaufzeit
t_z	[s]	Zyklusdauer
VB	[mm]	Verschleißmarkenbreite
v_c	[m/min]	Schnittgeschwindigkeit
$v_{c,0}$	[m/min]	Ursprüngliche Schnittgeschwindigkeit
$v_{c,opt}$	[m/min]	Optimierte Schnittgeschwindigkeit
v_e	[m/min]	Wirkgeschwindigkeit
v_f	[m/min]	Vorschubgeschwindigkeit
1.TA	[-]	Erste Teilarbeit
2.TA	[-]	Zweite Teilarbeit

O _B	[–]	Beladeprozess
O _E	[–]	Entladeprozess
O _T	[–]	Span-zu-Span Vorgang
A	[–]	Außendreihen
A ₁	[–]	Plandrehen beim Außendreihen
A ₂	[–]	Radiusdrehen beim Außendreihen
A ₃	[–]	Längsdrehen beim Außendreihen
B	[–]	Innendreihen erster Stirnflächen
B ₁	[–]	Erstes Schruppen zweiter Stirnfläche
B ₂	[–]	Zweites Schruppen zweiter Stirnfläche
B ₃	[–]	Plandrehen
B _{4,15}	[–]	Schrägdrehen der Kante von 15°25′
B _{4,15a}	[–]	Schrägdrehen der Kante von 15°25′ bei erster Vorgang
B _{4,15b}	[–]	Schrägdrehen der Kante von 15°25′ bei zweiter Vorgang
B _{4,45}	[–]	Schrägdrehen der Kante von 45°
B _{4,45a}	[–]	Schrägdrehen der Kante von 45° bei erster Vorgang
B _{4,45b}	[–]	Schrägdrehen der Kante von 45° bei zweiter Vorgang
B ₅	[–]	Längsdrehen beim Innendreihen
B ₆	[–]	Plandrehen zweiter Stirnfläche
B ₇	[–]	Radiusdrehen beim Innendreihen
B ₈	[–]	Drehen der Bohrung
C	[–]	Einstecken
C′	[–]	Konstante aus der Taylorgleichung
C ₁	[–]	Einstecken
C ₂	[–]	Radiusdrehen beim Einstecken
CAD	[–]	Computer Aided Desing
CNC	[–]	Computer Numeric Contol
CO ₂	[–]	Kohlendioxid
FFS	[–]	Flexible Fertigungssysteme
G0 _x	[–]	Eilgang der X-Achse
G0 _z	[–]	Eilgang der Z-Achse
G1 _x	[–]	Arbeitsgang der X-Achse
G1 _z	[–]	Arbeitsgang der Z-Achse
GKZ	[–]	Gekühlt aus kuhligen Karbiden
HRB	[–]	Brinellhärte
HRC	[–]	Rockvellhärte
HV	[–]	Vickershärte
IFT	[–]	Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik
K _{Sch}	[–]	Schneidstoffkorrektur
K _v	[–]	Schnittgeschwindigkeitskorrektur
K _{ver}	[–]	Verschleißkorrektur
K _γ	[–]	Spanwinkelkorrektur
K _{KSS}	[–]	Kühlschmierstoffkorrektur
KSS	[–]	Kühlschmierstoff

LPT	[-]	Labor für Produktionstechnik
m_c	[-]	Tandente des Steigungswinkel
MRV	[-]	Material Remove Volume
NC	[-]	Numeric Control
RZ	[-]	Spanraumzahl
T	[-]	Werkzeugwechsel
T01	[-]	Erste Werkzeug
T02	[-]	Zweite Werkzeug
T03	[-]	Dritte Werkzeug
T1	[-]	Werkzeugwechsel auf Werkzeug T01
T2	[-]	Werkzeugwechsel auf Werkzeug T02
T3	[-]	Werkzeugwechsel auf Werkzeug T03
U	[-]	Umgeformter Zustand
USB	[-]	Universal Serial Bus
WSP	[-]	Wendeschneidplatte
WZM	[-]	Werkzeugmaschine
x	[-]	Exponent der Schnitttife in der Taylorgleichung
y	[-]	Exponent des Vorschubs in der Taylorgleichung
α	[°]	Freiwinkel
β	[°]	Schneidewinkel
γ	[°]	Spanwinkel
$\gamma_{o,h}$	[°]	Spanwinkel des WSP-Halters
$\gamma_{o,w}$	[°]	Spanwinkels der WSP
ε	[°]	Eckenwinkel
κ	[°]	Einstellwinkel
η	[°]	Wirkwinkel
η_E	[%]	Energieeffizienz
η_{Ec}	[%]	Energie Effizienz der Schnittenergie
η_{Ed}	[%]	Energieeffizienz des Bearbeitungsprozesses
μ	[N]	Schnittkraft der Mittelwert
σ	[N]	Standartabweichung der Schnittkraft
λ	[°]	Neigungswinkel
y		Exponent des Vorschubs in der Taylorgleichung