



Manuela Erika Redecker, Dipl.-Ing.

Kenngrößen der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas

Institut für Fertigungstechnik, TU Graz

Begutachter

Prof. i.R. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, TU München

Graz, Mai 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Graz, den 02.05.2016

Datum

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeiten als Universitätsassistentin am Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Graz entstanden.

Dem Institutsvorstand Herrn Professor Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas möchte ich meinen Dank für die Ermöglichung dieser Dissertation und für das mir entgegengebrachte Vertrauen aussprechen. Herrn Professor i.R. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, Emeritus am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Koreferates und die damit verbundene gutachterliche Tätigkeit.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Institutes, Kollegen und Studenten, die durch wertvolle Diskussionen und tatkräftige Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. In besonderer Weise hervorheben möchte ich meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Georg Mörwald, der mich immer an seinem Wissen aus der Elektrotechnik hat teilhaben lassen und alle elektrischen Maschinen in den Messaufbauten kompetent angeschlossen hat.

Meinen größten Dank haben sich mein Mann und unser Kinder verdient. Ohne die familiäre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Graz, im Frühjahr 2016

Manuela Redecker

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die spanende Fertigung beispielhaft in den Bereichen Drehen, Bohren und Fräsen hinsichtlich einer energetischen Beurteilung. Für eine umfassende Analyse werden unterschiedliche Werkzeugmaschinen zur spanenden Bearbeitung und spanende Bearbeitungsprozesse mit Hilfe der Leistungsmessung analysiert. Die Arbeit unterteilt sich in die Untersuchung des Systems Werkzeugmaschine mit den zugehörigen Komponenten und in die Untersuchung des Fertigungsprozesses. Aus den aufgenommenen Messdaten der Werkzeugmaschinen und der Zerspanungsprozesse wird der Energiebedarf ermittelt.

Die Betrachtung des Systems Werkzeugmaschine befasst sich mit zwei CNC-Bearbeitungszentren und einem CNC-Drehzentrum inklusive deren Maschinenkomponenten. Der Energiebedarf einer Maschinenkomponente, bei der Bearbeitung eines Testwerkstücks, liefert Informationen zur Effizienz der Werkzeugmaschinenkomponenten. Als weitere Kenngröße wird der Retrofit Faktor weiter entwickelt, der Aussagen zum Erneuerungsbedarf einer Komponente gibt. Für den Vergleich von Werkzeugmaschinen wird der Energiebedarf zur Bearbeitung eines Testwerkstücks verwendet.

Durch die Analyse der Zerspanungsprozesse werden Erkenntnisse zum Energiebedarf bei unterschiedlichen Prozessrandbedingungen gewonnen. Der Einfluss des Werkzeugs, der Prozessstrategie und des Werkstoffs wird untersucht. Abgeleitet werden Kenngrößen, die die Zusammenhänge der Prozessgrößen bezogen auf den Energiebedarf beschreiben.

Abstract

This thesis examines the machining technology of example in the areas of turning, drilling and milling in terms of energy evaluation. For a comprehensive understanding various metal cutting machine tools and machining processes are analyzed using power measurement. The work is divided into the examination of the machine tool and its components and the examination of the machining process. From the recorded data of the machine tools and the machining processes, the energy demand is determined.

The consideration of the machine tool systems deals with two CNC machining centers and a CNC turning center, including their components. The energy demand of a machine tool component, in the processing of a test workpiece, provides information about the efficiency of the component. As a parameter for the evaluation of machine tool components the retrofit factor, stating the need for renewal, is further developed. For the comparison of machine tools, the energy demand processing a test workpiece is determined.

By analyzing the machining process knowledge about the energy demand is gained at different process conditions. The influence of the tool, the process strategy and the material is examined. Based on this, parameters are derived that describe the relationship between the process variables related to the energy demand.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	VI
1 Einleitung	1
1.1 Betrachtung des Systems Werkzeugmaschine	5
1.2 Betrachtung von spanenden Fertigungsprozessen	9
2 Zielsetzung und Aufgabenstellung	11
3 Stand der Wissenschaft und Praxis	13
3.1 Beurteilung von Werkzeugmaschinen	16
3.2 Beurteilung von spanenden Fertigungsprozessen	21
3.3 Leistungsmessung zur Ermittlung des Energiebedarfs	29
3.3.1 Messung elektrischer Energie	30
3.3.2 Leistungsmessung zur Bewertung von Maschinen und Anlagen	32
3.3.3 Ermittlung der Energieeffizienz	35
4 Versuchs- und Messeinrichtung	36
4.1 Werkzeugmaschinen	36
4.2 Versuchswerkstoffe	38
4.3 Versuchswerkzeuge	40
4.4 Messeinrichtungen	43
4.5 Versuchsaufbau	48
5 Versuchsdurchführung und Auswertung der Ergebnisse	50
5.1 Analyse des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen	52
5.1.1 Testwerkstück	53
5.1.2 Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine und deren Komponenten	56
5.1.3 Vergleich von Werkzeugmaschinen	62
5.2 Analyse des Energiebedarfs spanender Fertigungsprozesse	64
5.2.1 Untersuchung des Einflusses der Prozessstrategie	64
5.2.2 Ermittlung des Einflusses der Schnittparameter	75
5.2.3 Ermittlung des Einflusses der Werkzeugstandzeit	88
6 Kenngrößen der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung	95
6.1 Ermittlung von Kenngrößen der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	96
6.1.1 Retrofit Faktor IFT	96
6.1.2 Spezifische Maschinenenergie	101
6.2 Ermittlung von Kenngrößen der Energieeffizienz spanender Fertigungsprozesse	103
6.2.1 Dimensionslose Kenngrößen	103
6.2.2 Spezifische Prozessenergie	105
7 Zusammenfassung und Ausblick	106

Abbildungsverzeichnis	109
Tabellenverzeichnis	112
Literaturverzeichnis	114

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	mm^2	Spanungsquerschnitt
A_E	-	Gewichtungsfaktor Energieanteil
A_0	-	Gewichtungsfaktor Lastkollektiv
a_p	mm	Schnitttiefe
b	mm	Spanungsbreite
d_{Bohrer}	mm	Bohrerdurchmesser
$E_{\text{Bearbeitung}}$	J	Energiebedarf Bearbeitung
E_c	J	Schnittenergie
E_{el}	J	elektrische Energie
E_f	J	Vorschubenergie
E_i	J	Energiebedarf der Komponente i
E_{kin}	J	kinetische Energie
$E_{\text{Komponente}}$	J	Energiebedarf einer Komponente
E_{Kuehlung}	J	Energiebedarf Kühlung
E_{pot}	J	potentielle Energie
E_{spez}	J mm^{-3}	spezifischer Energiebedarf
E_{System}	J	Gesamtenergiebedarf
f	mm	Vorschub je Umdrehung
f_a	Hz	Abtastfrequenz
f_z	mm	Vorschub je Schneide
F_a	N	Aktivkraft
F_c	N	Schnittkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_p	N	Passivkraft
F_z	N	Zerspankraft
h	mm	Spanungsdicke
i	-	betrachtete Werkzeugmaschinenkomponente
I	A	elektrischer Strom
$i(t)$	A	Momentanwert des Stroms
I_R	-	Retrofit Faktor
k_c	N mm^{-2}	spezifische Schnittkraft
M_z	Nm	Moment um die Z-Achse
n_w	min^{-1}	Werkstückdrehzahl
n_z	min^{-1}	Spindeldrehzahl
$p(t)$	W	Momentanwert der elektrischen Leistung
P	W	elektrische Leistung
P	W	Wirkleistung
P_c	W	Schnittleistung Zerspanung
P_e	W	Wirkleistung Zerspanung
P_{el}	W	elektrische Wirkleistung

P_f	W	Vorschubleistung Zerspanung
$P_{i,norm}$	-	normierte Leistung
P_{max}	W	Leistungsspitze
P_{mean}	W	durchschnittliche Leistung
P_{min}	W	Leistungsminimum
Q	var = W	Blindleistung
S	VA = W	Scheinleistung
s	-	Standardabweichung
t_0	s	Zeitpunkt 0
t_1	s	Zeitpunkt 1
$t_{i,norm}$	-	normierte Zeit
T	s	Dauer
U	V	elektrische Spannung
$u(t)$	V	Momentanwert der Spannung
V	mm ³	Zerspanungsvolumen
\dot{V}	mm ³ s ⁻¹	Zeitspanvolumen
v_c	m min ⁻¹	Schnittgeschwindigkeit
v_e	m min ⁻¹	Wirkgeschwindigkeit
v_f	mm min ⁻¹	Vorschubgeschwindigkeit
x	mm	Position in x-Richtung
y	mm	Position in y-Richtung
z	mm	Position in z-Richtung
α_i	Grad	Regressionswinkel der Komponente i
φ	Grad	Vorschubrichtungswinkel
φ_{el}	Grad	Phasenwinkel
η	Grad	Wirkrichtungswinkel
κ	Grad	Einstellwinkel
\bar{x}_{arithm}	-	Mittelwert

Abkürzung	Bezeichnung
AC	alternating current (Wechselstrom)
AKW	Atomkraftwerk
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMWFW	Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CVD	Chemical Vapour Deposition
DIN	Deutsche Industrie Norm
DC	direct current (Gleichstrom)
E ³	Konzept für die Zukunft der industriellen Produktion der Fraunhofer-Gesellschaft
ECO ² CUT	EU-Forschungsprojekt ecological and economical machining
ED	Einschaltdauer
EEffG	Energieeffizienzgesetz
ERP	Enterprise Resource Planning
ESU	Elektroschlacke-Umschmelzverfahren
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
EU	Europäische Union
EU-27	Bezeichnung für die statistische Bemessung der Mitgliedsländer der EU
FSO	Full Scale Output
IE1-IE4	International Efficiency - Wirkungsgradklassen für Elektromotoren
IEA	Internationale Energieagentur
Ifo	Leibnitz-Institut für Wirtschaftsforschung
IFT	Institut für Fertigungstechnik der TU Graz
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
ISO	Internationale Organisation für Normung
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
KSS	Kühlschmierstoff
MES	Manufacturing Execution System
NAS	Network Attached Storage
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
PEACH	Forschungsprojekt KMU-Innovativ
PVD	Physical Vapour Deposition
TBT	Tiefbohrtechnik
VHM	Vollhartmetall
WZW	Werkzeugwechsel

1 Einleitung

Nachhaltigkeit ist ein Anspruch, der vermehrt zum Anlass genommen wird, um mit veränderter Betrachtungsweise Produktionsprozesse zu gestalten. Durch die politischen Veränderungen erfährt die Thematik Energieeffizienz in der Gesellschaft eine erhöhte Aufmerksamkeit. Die Paarung der gesellschaftlichen Aufmerksamkeit mit Kostensenkungsprogrammen ergibt die Notwendigkeit der Auseinandersetzung mit dieser Thematik. Nachhaltige Fertigung basiert auf ressourceneffizientem Handeln, das die Chance auf eine langfristige Profitabilität gewährleistet. In Forschungsprojekten wie die E³-Produktion der Fraunhofer-Gesellschaft wird an der Überleitung eines neuartigen Konzeptes für die Zukunft der industriellen Produktion in Deutschland gearbeitet.

Die Senkung von Kosten ist eine Motivation für produzierende Betriebe Energieeffizienz in Zeiten steigender Energiepreise anzustreben. Die kostengetriebene Veranlassung für kurzfristige Maßnahmen nimmt jedoch in Zeiten sinkender Energiepreise ab. Durch die Dynamik der Energiepreise werden Effizienzbetrachtungen, seit der Ölkrise in den 1970er Jahren, in Zeiten steigender Energiepreise stärker vorangerieben als bei fallenden Energiepreisen. Aufgrund der Korrelation des Weltenergieverbrauchs mit dem Wachstum der Weltbevölkerung und der Endlichkeit fossiler Primärenergieträger ist die Betrachtung nicht nur während Phasen steigender Preise sinnvoll. Der weltweite Energiebedarf steigt weiter an und macht eine globale Betrachtung notwendig (Abbildung 1.0.1).

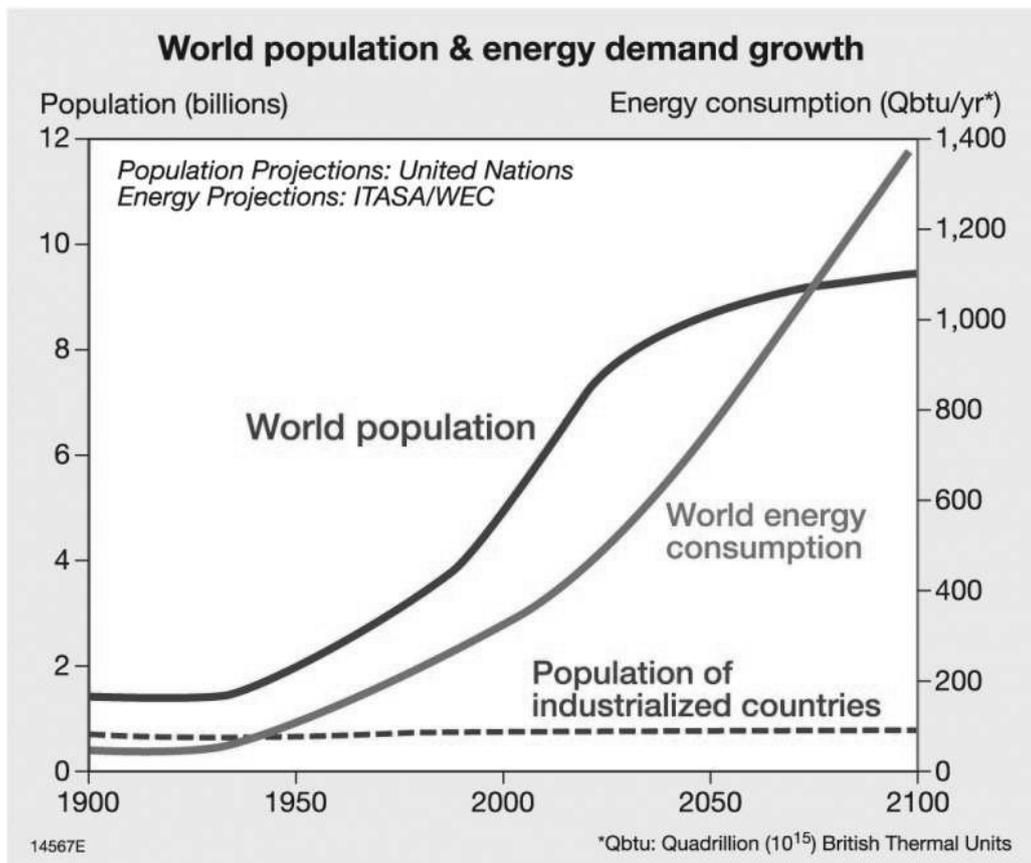


Abbildung 1.0.1: Wachstum von Weltbevölkerung und Energiebedarf, Quelle: Diercke (2010), S.190.

In der Europäischen Union (EU) gibt es energiepolitische Aktionspläne und gesetzlich verankerte Ziele im 2020-Rahmen. Darin haben sich die EU-Mitgliedsstaaten verpflichtet, bis 2020 die Treibhausgasemissionen um mindestens 20 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren, die Energieeffizienz um 20 Prozent zu erhöhen und einen Anteil von 20 Prozent erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch zu erreichen. Im Bereich der Konsumgüter wurden in den letzten zehn Jahren klare Vorschriften zur Kennzeichnung von Energieeffizienzklassen erlassen. Die EU-Energielabels stellen Beispiele zur Umsetzung dieser Vorschriften dar und sind auf Kühl- und Gefriergeräten, Klimageräten, Waschmaschinen, Haushaltslampen, Fernsehgeräten, etc. zu finden. Sie dienen bei Kaufentscheidungen zur Information über den Energieverbrauch bei der Nutzung und ordnen das gekennzeichnete Gerät einer Energieeffizienzklasse zu.¹

Am 4. Dezember 2012 ist in der EU die Energieeffizienz-Richtlinie 2012/27/EU in Kraft getreten, in der zwei Kernpunkte, die verpflichtende Energieeinsparung im Zeitraum 2014 bis 2020 von jährlich durchschnittlich 1,5 Prozent und eine verpflichtende Durchführung regelmäßiger Energieaudits in großen Unternehmen, enthalten sind.² Damit ergibt sich die Notwendigkeit Methoden zu entwickeln, die sowohl zum Nachweis dienen, als auch Potenziale zur Verbesserung aufzeigen.

Ein Ziel der österreichischen Energiepolitik ist die Entkopplung der Wirtschaftsentwicklung von der Energieverbrauchsentwicklung. Ein Maß dafür ist der relative Energieverbrauch, der der notwendigen Menge an Gesamtenergie zur Erzeugung einer Einheit des Bruttoinlandsproduktes (BIP) entspricht. In Österreich hat sich der relative Energieverbrauch zwischen 1973 und 2013 um 34,9% verringert.³ Abbildung 1.0.2 zeigt, dass sich die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch seit 2000 etwas abgeschwächt hat und immer wieder kurzzeitige Anstiege vorkommen. Weitere Anstrengungen sind notwendig, um die Entkopplung zu festigen.

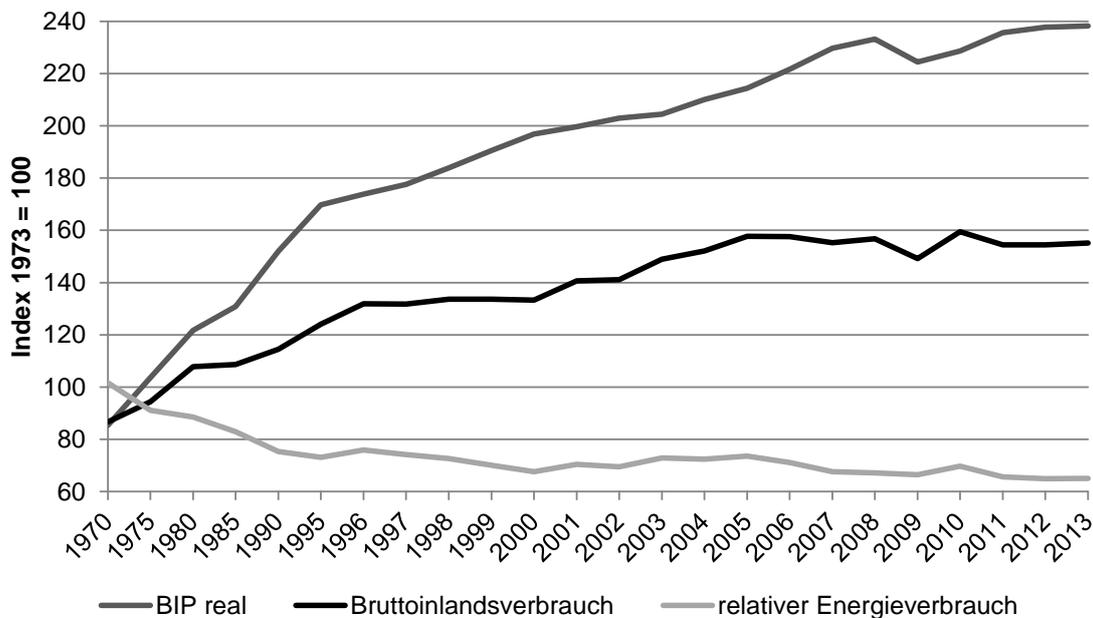


Abbildung 1.0.2: Entkopplung des Bruttoinlandsverbrauchs vom Wirtschaftswachstum in Österreich, Quelle: In Anlehnung an BMWFW (2015a), S.4.

¹Vgl. 2010/30/EU, 2010, S.1ff.

²Vgl. 2012/27/EU, 2012, S.1ff.

³Vgl. BMWFW, 2015a, S.4.

Die Energiepreise sind ein Standortfaktor für Unternehmen. Durch gesetzliche Regelungen liegt der Strompreis für die Industrie zwar deutlich unter dem Preis für Privatkunden, doch innerhalb von Europa gibt es deutliche Unterschiede im Preis für eine Kilowattstunde Strom. 2008 wurde mit der Richtlinie 2008/92/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates die Erfassung der Daten zu Strom- und Erdgaspreisen für industrielle Endverbraucher rechtlich geregelt und damit Transparenz geschaffen.⁴

Die Europakarte in Abbildung 1.0.3 zeigt, wie unterschiedlich die Strompreise für ein industrielles Unternehmen mittlerer Größe (Jahresverbrauch 500-2000 MWh) innerhalb Europas 2014 war. Die Durchschnittspreise haben 2014 zwischen 4,2 und 18,6 Eurocent pro kWh Industriestrom in den europäischen Staaten gelegen.

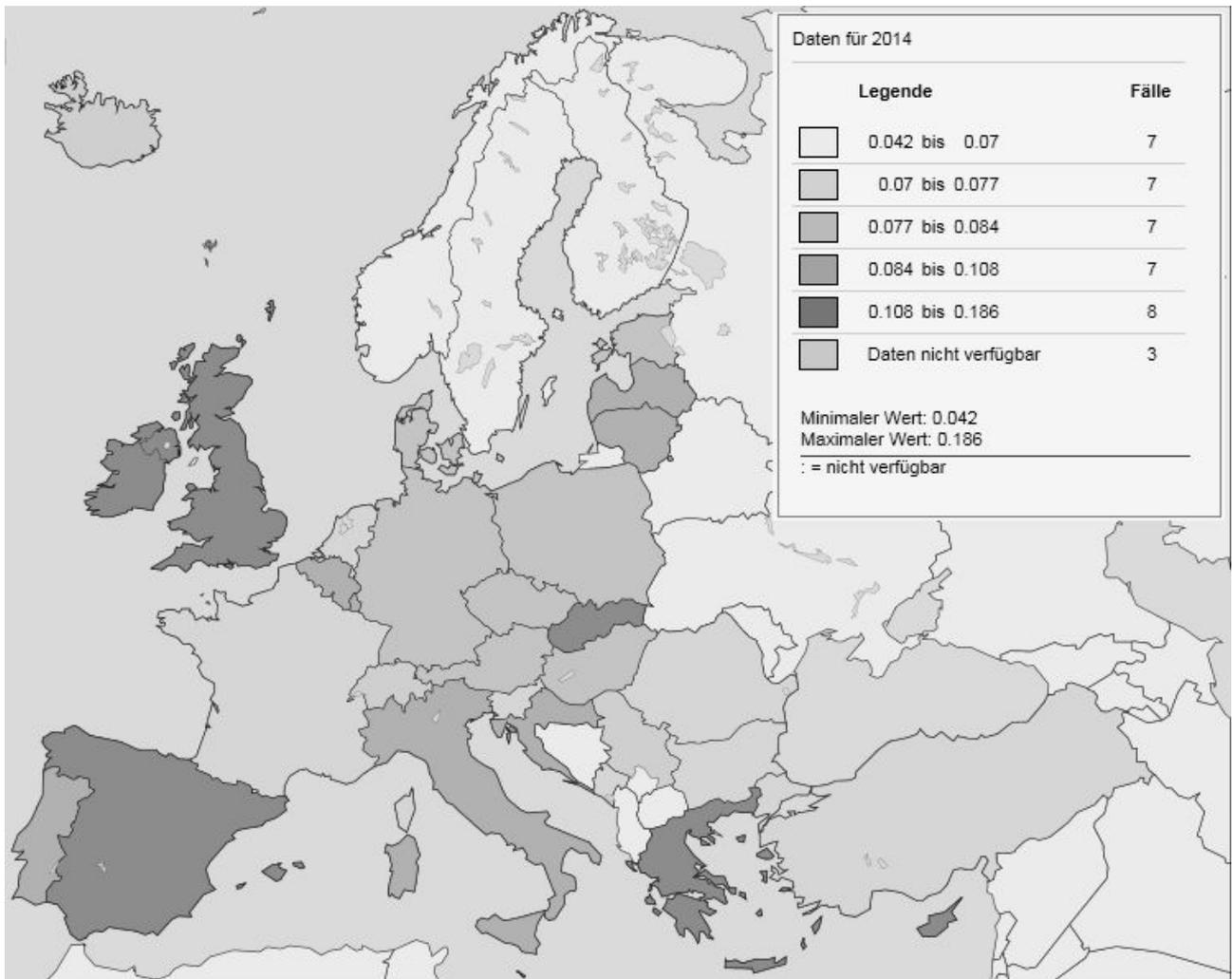


Abbildung 1.0.3: Strompreis in € je kWh für industrielle Unternehmen mittlerer Größe in Europa, Quelle: Eurostat.

⁴Vgl. 2008/92/EG, 2008, S.9ff.

Im weltweiten Vergleich liegen die europäischen Strompreise in den letzten Jahren über den Preisen in anderen Industrienationen wie zum Beispiel den USA. Abbildung 1.0.4 zeigt die Entwicklung der Strompreise für mittlere Industrieunternehmen (Jahresverbrauch 500-2000 MWh) von 2005 bis 2013. Während der Strompreis in den USA im Betrachtungszeitraum kaum angestiegen ist, hat er sich in Österreich um ein Drittel erhöht. Diese Entwicklung ist auch in den anderen europäischen Staaten zu beobachten und bringt international gesehen Wettbewerbsnachteile mit sich.

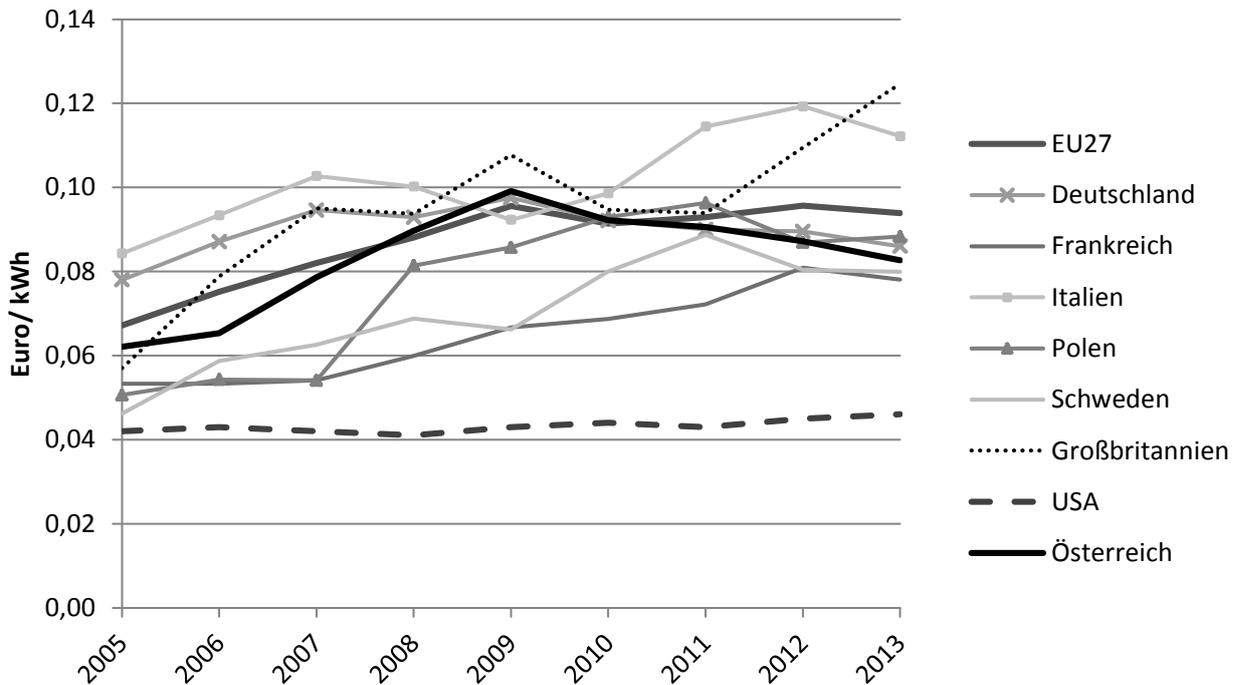


Abbildung 1.0.4: Entwicklung der Industriestrompreise für große industrielle Unternehmen, Quelle: In Anlehnung an Eurostat.

Den europäischen Rahmen für Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz gibt die Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates. Die Motivation zur Verbesserung der Energieeffizienz lässt sich nicht nur durch den Strompreisanstieg sondern auch durch Maßnahmen des Anreizes zur Vermeidung von unnötigem Verbrauch erklären. Steigerungen der Energieeffizienz tragen zur Erreichung der anderen beiden Ziele, Verbrauchsreduktion und Anteilssteigerung erneuerbarer Energieträger, bei. Nachdem zu Beginn der Effizienzbemühungen Beleuchtung, Gebäude und Konsumgüter im Fokus gewesen sind, weiten sich die Vorschriften nun auf Unternehmen aus, die zur Durchführung regelmäßiger Energieaudits verpflichtet werden.⁵

⁵Vgl. 2012/27/EU, 2012, S.1ff.

1.1 Betrachtung des Systems Werkzeugmaschine

Die vielseitige Motivation für die Betrachtung der Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen und Prozessen zeigt Abbildung 1.1.1. Äußere politische Randbedingungen haben ebenso einen Einfluss wie die ständige Herausforderung, in Hochlohnländern wirtschaftlich erfolgreich an Innovationen zu arbeiten.⁶

Das Streben nach einer Technologieführerschaft kann durch politisch vorgegebene Ziele mit Fördermaßnahmen unterstützt werden. Die politischen Rahmenbedingungen hängen vom Standort der Betrachtung ab, da die Erfüllung der geltenden Richtlinien länderspezifisch oder regionenspezifisch ist. Volkswirtschaftlich interessant ist die Reduktion der Abhängigkeit von Energie- und Rohstoffimporten.

Aus Sicht der Wirtschaft sind die Kosten für Ressourcen und die Betrachtung der Lebenszykluskosten relevant. Überdimensionierte Komponenten von Werkzeugmaschinen und ineffiziente Prozesse im Betrieb sind Ansatzpunkte zur Verbesserung bestehender Anlagen und zur optimalen Planung zukünftiger Fertigungssysteme. Durch die Forschung an ressourceneffizienten Werkzeugmaschinen und Prozessen lassen sich CO₂-Emissionen senken, Rohstoffe effizient einsetzen und in weiterer Folge den Klimawandel beeinflussen und das Gefährdungspotenzial durch den Betrieb von Atomkraftwerken verringern.

Die gesellschaftliche Motivation sich mit der Thematik zu beschäftigen ist getrieben durch die weltweit steigende Ressourcennachfrage und durch das positive Image der Ressourceneffizienz.

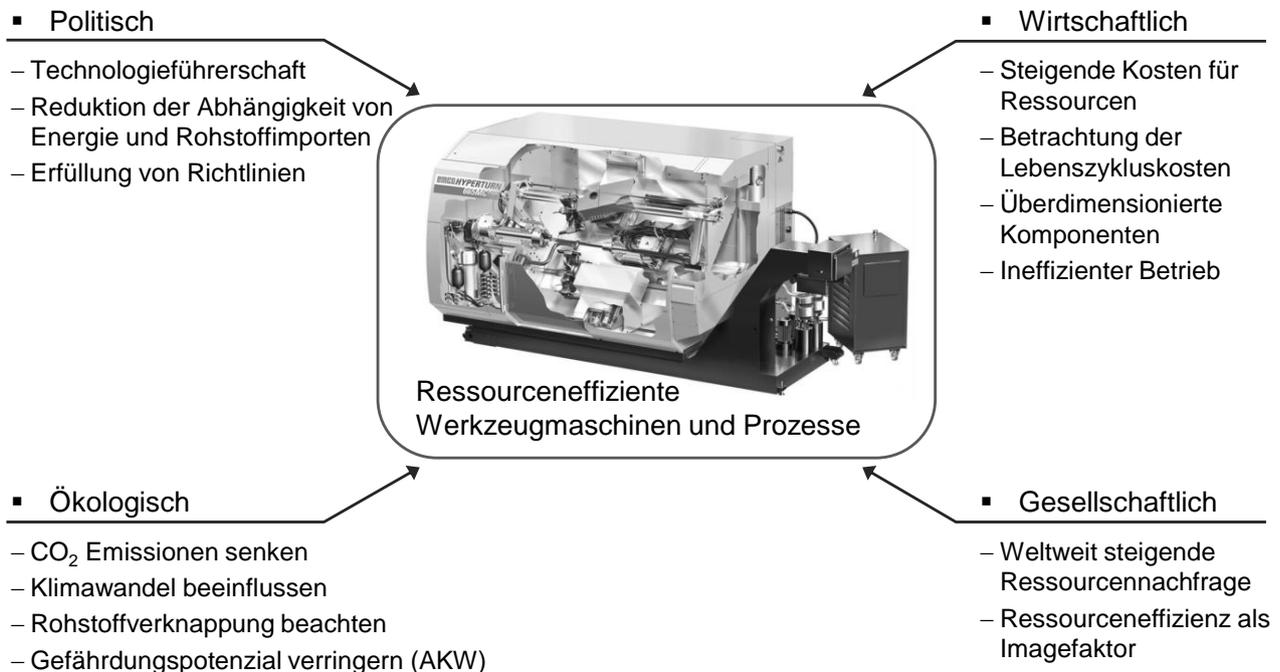


Abbildung 1.1.1: Motivationen für Ressourceneffizienz, Quelle: In Anlehnung an Brecher et al. (2011).

⁶Vgl. Brecher und Bäuml, 2012, S.107ff.

Der Gedanke der Nachhaltigkeit im Zuge der ökologischen Verantwortung findet Beachtung in der Entwicklung und Nutzung von Produkten und der Kreislaufgedanke findet Einzug in die Auslegung von Prozessen. Werkzeugmaschinen, als elementare Bestandteile der industriellen Fertigung, müssen hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht werden, denn der effiziente Umgang mit Ressourcen bringt immer auch eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit mit sich.

Im Produktionsprozess werden Ressourcen unter Einsatz von Energie, Arbeitskraft und Produktionsmitteln zu wertgesteigerten, lagerbaren Wirtschafts- oder Gebrauchsgütern veredelt. „Die Messung des Energiebedarfs ist bei der Ermittlung des Potenzials zur Energieeffizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen und Komponenten ein wichtiger Bestandteil. Mit Hilfe einer systematischen und detaillierten Erfassung des zeitabhängigen Energieverbrauchs können die hauptsächlichen elektrischen Verbraucher von Werkzeugmaschinen identifiziert werden.“⁷

Bei einer Betrachtung des Energiebedarfs einer Werkzeugmaschine über den Lebenszyklus zeigt sich, dass der Energiebedarf im Betrieb der Werkzeugmaschine dominant ist (Abbildung 1.1.2). Der Energiebedarf zur Herstellung einer Werkzeugmaschine beinhaltet die Rohstoffgewinnung und -erzeugung der Werkzeugmaschinenkomponenten und liegt daher über dem Niveau, das bei der Entsorgung benötigt wird.

Eine überschlägige Abschätzung zu den entstehenden Kosten durch den Energiebedarf liefert eine Untersuchung des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München. Bei einem angenommenen Dreischichtbetrieb eines Bearbeitungszentrums mit 7500 Arbeitsstunden pro Jahr, einer durchschnittlichen Prozessleistung von 25 kW und einer Grundlast von 10 kW ergibt sich ein Jahresenergiebedarf von 165 MWh pro Werkzeugmaschine. Bei einem Energiepreis von 8 €ct/kWh entstehen Stromkosten von 13200 € pro Jahr und Werkzeugmaschine.⁸

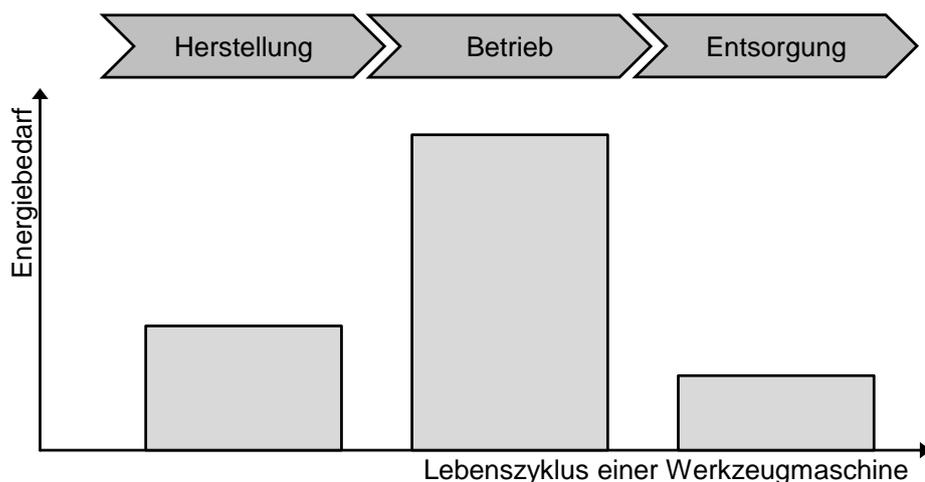


Abbildung 1.1.2: Qualitative Darstellung des Energiebedarfs im Lebenszyklus einer Werkzeugmaschine, Quelle: Eigene Darstellung.

⁷Brecher, Bäumlner u. a., 2011, S.15.

⁸Vgl. <http://www.fertigung.de> 25.10.2015.

Die Energieeffizienz ist somit insbesondere beim Betrieb der Maschine von Bedeutung. Auch die ISO 14955 zieht hier die Grenzen und beschränkt sich auf die Nutzungsphase einer Werkzeugmaschine und betrachtet die zugeführte Energie.⁹ Bisher wurde 2014 von der ISO 14955 Reihe der 1. Teil mit dem Untertitel „Design methodology for energy-efficient machine tools“ veröffentlicht. Der 2. Teil mit dem Untertitel „Methods for measuring energy supplied to machine tools and machine tool components“ befindet sich derzeit in Bearbeitung. Teil 3 „Principles for testing metal-cutting machine tools with respect to energy efficiency“ und Teil 4 „Principles for testing metal-forming machine tools with respect to energy efficiency“ sind derzeit in Planung. Die ISO 14955 Reihe hat zum Ziel, Ecodesign Prinzipien bei der Auslegung von Werkzeugmaschinen anzuwenden und dient zur Schaffung einer freiwilligen Vereinbarung zur Erfüllung der EU-Richtlinie 2009/125/EG.¹⁰

Für eine Effizienzbetrachtung muss immer die Quantifizierung des Ergebnisses und der Ressourcen durch Messung, Berechnung oder Schätzung gegeben sein. Dazu ist es notwendig, die Grenzen des Betrachtungssystems zu definieren. Abbildung 1.1.3 zeigt die schematische Betrachtung eines Produktionssystems. Im Zentrum der Betrachtung stehen die Fertigungsprozesse, die in Prozessketten miteinander verbunden sind. Mit Hilfe der Werkzeugmaschinen werden aus Rohstoffen Endprodukte gefertigt. Die Werkzeugmaschinen sind für die Durchführung der Prozesse notwendig und stellen die Haupt-, Neben- und Hilfsantriebe bereit. Durch die Fertigungsumgebung in der Fabrik werden Energie, Wärme und Rohstoffe zugeführt und als Abluft, Abwärme und in Form des Endproduktes wieder abgeführt.

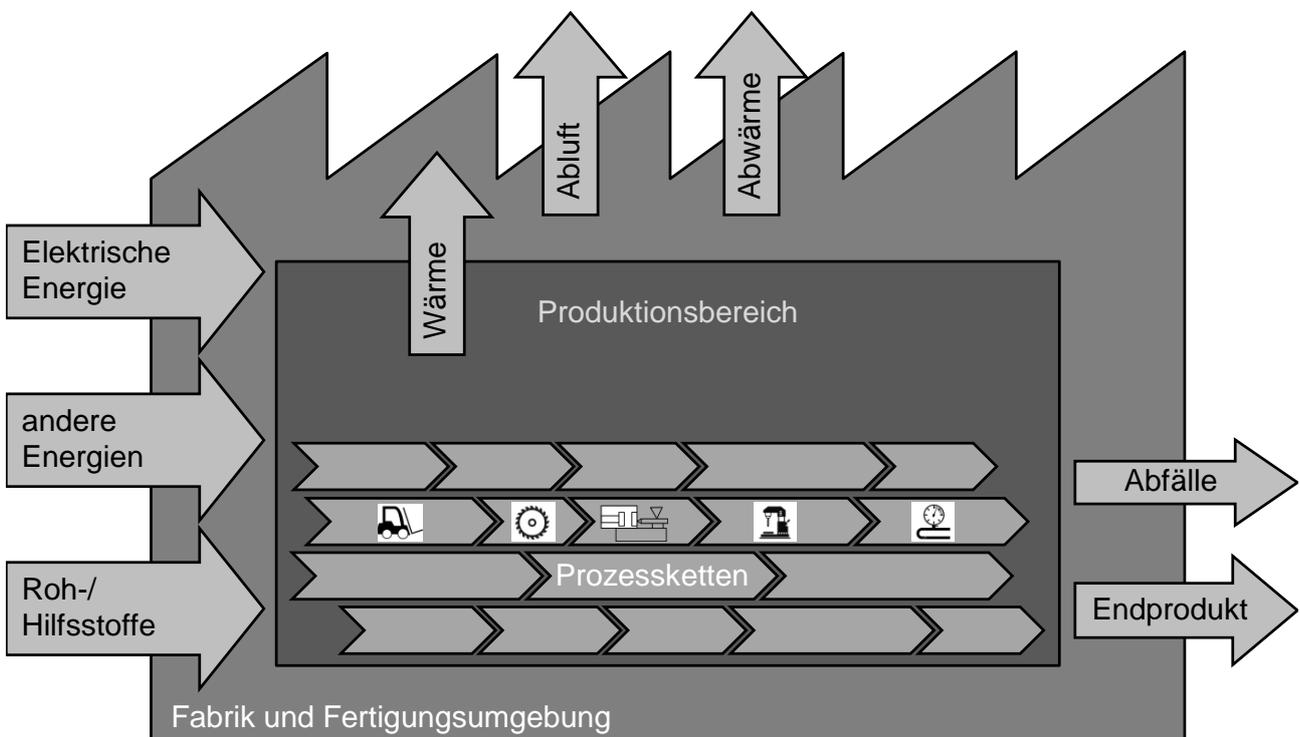


Abbildung 1.1.3: Produktionssystem schematisch, Quelle: Eigene Darstellung.

⁹Vgl. ISO 14955, 2014.

¹⁰Vgl. 2009/125/EG, 2009, S.10ff.

Nach dem Grundgesetz der Physik geht keine Energie verloren. Was als Energie in einer Werkzeugmaschine eingesetzt wird, kommt auch wieder heraus (Abbildung 1.1.4). Vor allem die Wärmeenergie, welche von der Maschine erzeugt wird und welche im Bearbeitungsprozess entsteht und nicht genutzt wird, muss abgeführt werden. Im Endprodukt ist Energie in Form von thermischer, mechanischer, kinetischer, potenzieller, chemischer und anderer Energie enthalten.

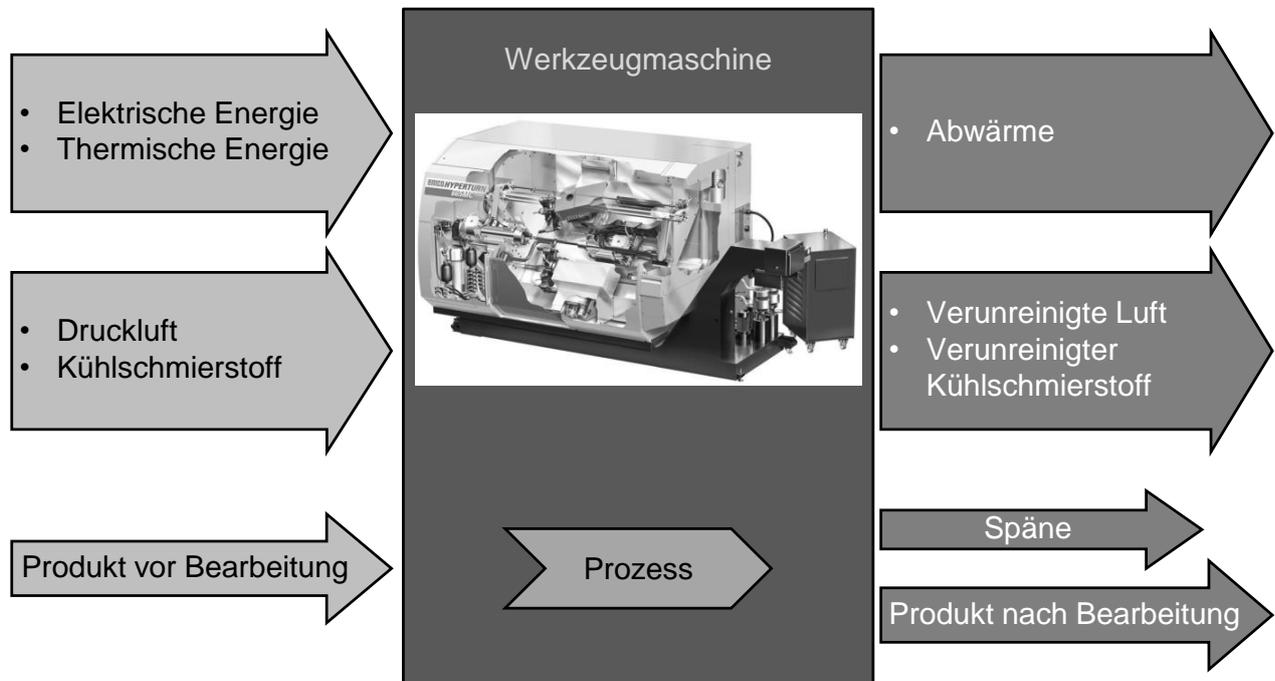


Abbildung 1.1.4: System Werkzeugmaschine schematisch, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Peripherie-Einrichtungen von Werkzeugmaschinen wie Kühlaggregate, Späneförderer, Kühlschmierstoffaufbereitung, Palettenwechselsysteme und die verbaute Leistungselektronik zur Regelung der Antriebe haben einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf. Das zur Betrachtung herangezogene schematische System Werkzeugmaschine wird abgegrenzt, indem die elektrische Energie zur Bereitstellung der Peripherie-Einrichtung als Systemgrenze dient. Auf der Werkzeugmaschine läuft der spanende Fertigungsprozess ab, der das Endprodukt erzeugt. Als Fertigungsabfall entstehen zum einen die Prozesswärme und zum anderen die Späne und der verunreinigte Kühlschmierstoff.

Zur Bewertung des Energiebedarfs spanender Werkzeugmaschinen gibt es derzeit noch keine standardisierten Vorgehensweisen. Die Anschlussleistung von Werkzeugmaschinen kann für die Dimensionierung der Stromversorgung verwendet werden, gibt aber keine Auskunft zur tatsächlich aufgenommenen Wirkleistung. Daher sind Untersuchungen des Leistungsbedarfs von Werkzeugmaschinen notwendig, um Aussagen und Vergleiche treffen zu können.

1.2 Betrachtung von spanenden Fertigungsprozessen

Basis der spanenden Fertigungsprozesse sind die spanenden Fertigungsverfahren, die in der Hauptgruppe Trennen der DIN 8580 eingeordnet sind¹¹. Spanende Verfahren werden vielfältig in der industriellen Fertigung eingesetzt, da das herstellbare Teilespektrum nahezu unbegrenzt ist. Die Verfahren Drehen, Fräsen und Bohren sind die am häufigsten eingesetzten Verfahren. In einer Marktstudie der Jahre 2004 - 2013 ist der weltweite Markt für Zerspanungswerkzeuge betrachtet worden. Das Marktvolumen von 2004 für Dreh-, Fräs-, Bohr- und andere Zerspanungswerkzeuge liegt bei 11,22 Milliarden US\$ und wird 2018 auf prognostizierte 18,59 Milliarden US\$ ansteigen.¹²

Die Betrachtung des Zerspanungsprozesses bezieht sich auf das Werkstück, das Werkzeug und die sich ergebenden Wechselwirkungen. In einer black-box Betrachtung lässt sich der Zerspanungsprozess als ein Wirksystem mit Eingangs- und Ausgangsgrößen darstellen (Abbildung 1.2.1). Im Prozess werden die Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen überführt. Die Ausgangsgrößen lassen sich in Prozessgrößen wie Zerspankräfte, Leistungen, Temperaturen und Schwingungen, die während des Prozesses aufgenommen werden können, und Wirkgrößen wie Maße, Formen und Rauheiten des Werkstücks, Werkzeugverschleiß und Maschinenveränderungen, die nach Ablauf des Prozesses vorliegen, unterteilen.¹³ In vielen wissenschaftlichen Untersuchungen werden die Zerspankräfte als Prozessgröße und der Werkzeugverschleiß und die Werkstückgeometrie als Wirkgröße zur Untersuchung und Bewertung von Prozessen verwendet.

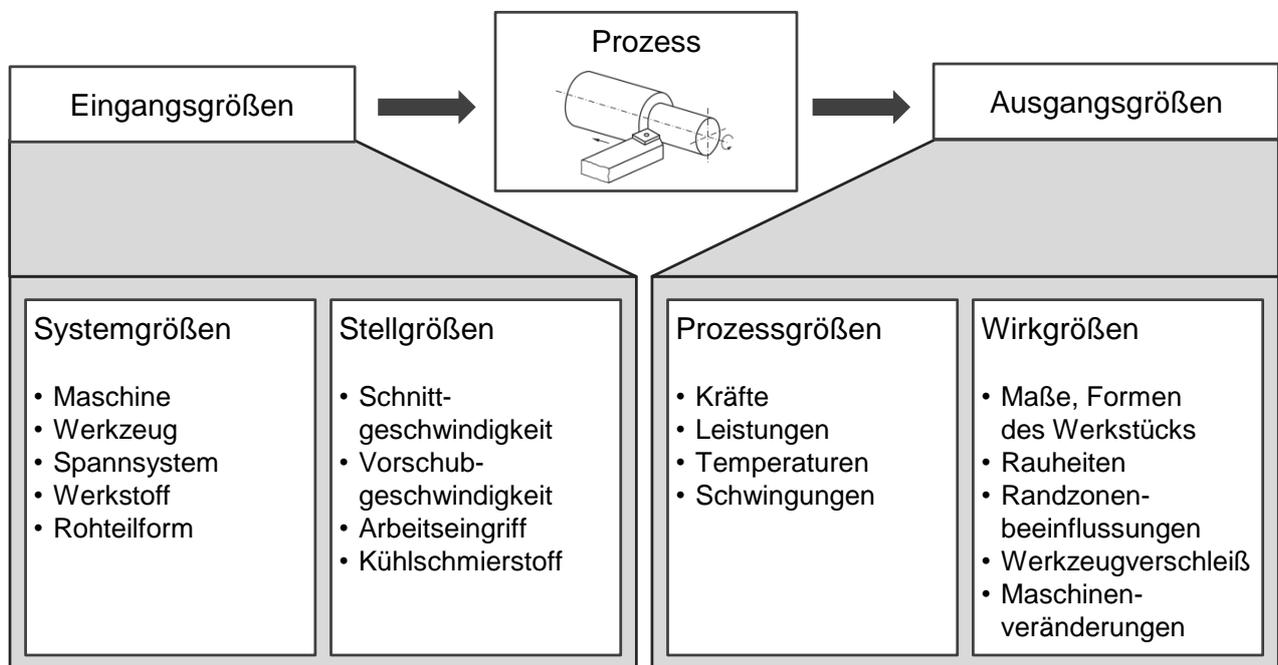


Abbildung 1.2.1: Zerspanungsprozess als System, Quelle: In Anlehnung an Denkena, B. und Tönshoff, H.-K. (2011), S.8.

¹¹Vgl. DIN 8580, 2003, S.1ff.

¹²Vgl. Dedalus Consulting, 2011, S.2/12.

¹³Vgl. Denkena und Tönshoff, 2011, S.8f.

Eine beispielhafte Betrachtung zu den Stückkosten bei spanenden Fertigungsprozessen ist in der 2011 erschienenen Marktstudie zu Zerspanungswerkzeugen von Dedalus Consulting enthalten: Die Stückkosten für ein durch Zerspanung hergestelltes Bauteil unterteilen sich in 20% variable Kosten (Werkzeug- und Materialkosten) und 80% Fixkosten (Maschinen-, Lohn-, Gebäude- und Administrationskosten). Eine Preisreduktion der Werkzeugkosten um 30% verändert die Stückkosten um 1%. Eine Erhöhung der Werkzeugstandzeit um 50% reduziert die Stückkosten um 1%. Eine 20 prozentige Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und ein verbesserter Prozess reduzieren die Stückkosten um 15% und mehr.¹⁴

Der spanende Fertigungsprozess hat einen Einfluss auf den Energiebedarf einer Werkzeugmaschine. Im Zerspanungsprozess erfolgt die Wertschöpfung am Produkt. Durch die Gesetzgebung soll erreicht werden, dass neben den klassischen Aspekten Qualität, Kosten und Zeit der Energiebedarf einen Einfluss auf die Gestaltung des Zerspanungsprozesses hat. Die Frage nach den optimalen Eingangsgrößen, sowohl bei den Systemgrößen Maschinen, Werkzeuge und Werkstoffe, als auch bei den Stellgrößen Schnitt-, Vorschubgeschwindigkeit, Arbeitseingriff und Kühlung zum Erreichen der geforderten Ausgangsgrößen bei minimalem Energiebedarf, muss beantwortet werden.

¹⁴Vgl. Dedalus Consulting, 2011, S.1/9.

2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Die ambitionierten Zielvorgaben der Europäischen Union in der Energiepolitik haben zu einer breiten Auseinandersetzung in Industrie und Wissenschaft geführt. Die Steigerung der Energieeffizienz ist eine jener konkreten Vorgaben, die erfüllt werden müssen. In der produzierenden Industrie ist der effiziente Einsatz von Ressourcen, insbesondere der Ressource Energie, ein zentraler Wettbewerbsvorteil. Die Schaffung von Mess-, Analyse und Bewertungsmethoden zur Identifikation von Energieeffizienz ermöglicht es Unternehmen, den europaweit geforderten Nachweis der Steigerung der Energieeffizienz zu erbringen. Von besonderem Untersuchungsinteresse in der industriellen Betrachtung ist die spanende Fertigung durch ihre zahlenmäßige Relevanz und die Vielfalt der Einflussgrößen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Kenngrößen zur Beurteilung von Fertigungsprozessen und Werkzeugmaschinen in der spanenden Fertigung. Dabei sollen die Kenngrößen als Analysewerkzeuge zum Vergleich von Prozessen und Maschinen dienen und Aussagen zur Effizienz geben.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Systematik zur Ermittlung der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung erarbeitet werden. An Hand von Versuchsreihen werden Systembetrachtungen durchgeführt und Messdaten an Werkzeugmaschinen in spanenden Fertigungsprozessen erhoben. Die zu entwickelnde Systematik soll, sowohl die Untersuchung von Fertigungsprozessen, als auch die Betrachtung von Werkzeugmaschinen ermöglichen. Die Auswertung der Messdaten soll die Ermittlung von Energieeffizienzkenngrößen ermöglichen. Mit Hilfe dieser Kenngrößen soll die Vergleichbarkeit von Maschinen und Prozessen geschaffen werden.

Vorgehensweise:

Abbildung 2.0.1 zeigt schematisch die Vorgehensweise. Als Grundlage für die Ermittlung der Energieeffizienzkenngrößen werden die Einflussgrößen in der spanenden Fertigung identifiziert. Die zu betrachtenden Systeme sind zum einen die Werkzeugmaschinen mit deren eingebauten Komponenten und zum anderen die Fertigungsprozesse am Beispiel der Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen und Bohren.

Zur energetischen Analyse von Werkzeugmaschinen wird ein Testwerkstück definiert, das die energetische Untersuchung und den Vergleich von Werkzeugmaschinen ermöglicht. Untersucht werden aktuelle CNC-Bearbeitungszentren zum Drehen, Fräsen und Bohren und ein älteres CNC-Drehzentrum Baujahr 1986. Aus dem ermittelten Energiebedarf werden Kenngrößen zur Beschreibung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen abgeleitet.

Weiterhin werden Versuche zur Ermittlung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen durchgeführt, bei denen die Prozessparameter wie bearbeitete Werkstoffe, verwendete Werkzeuge, Arten der Prozesskühlung und -schmierung und Zerspanungsparameter wie Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Zustellung verändert werden. Daraus lassen sich Kenngrößen zur Beschreibung der Energieeffizienz von spanenden Fertigungsprozessen ableiten.

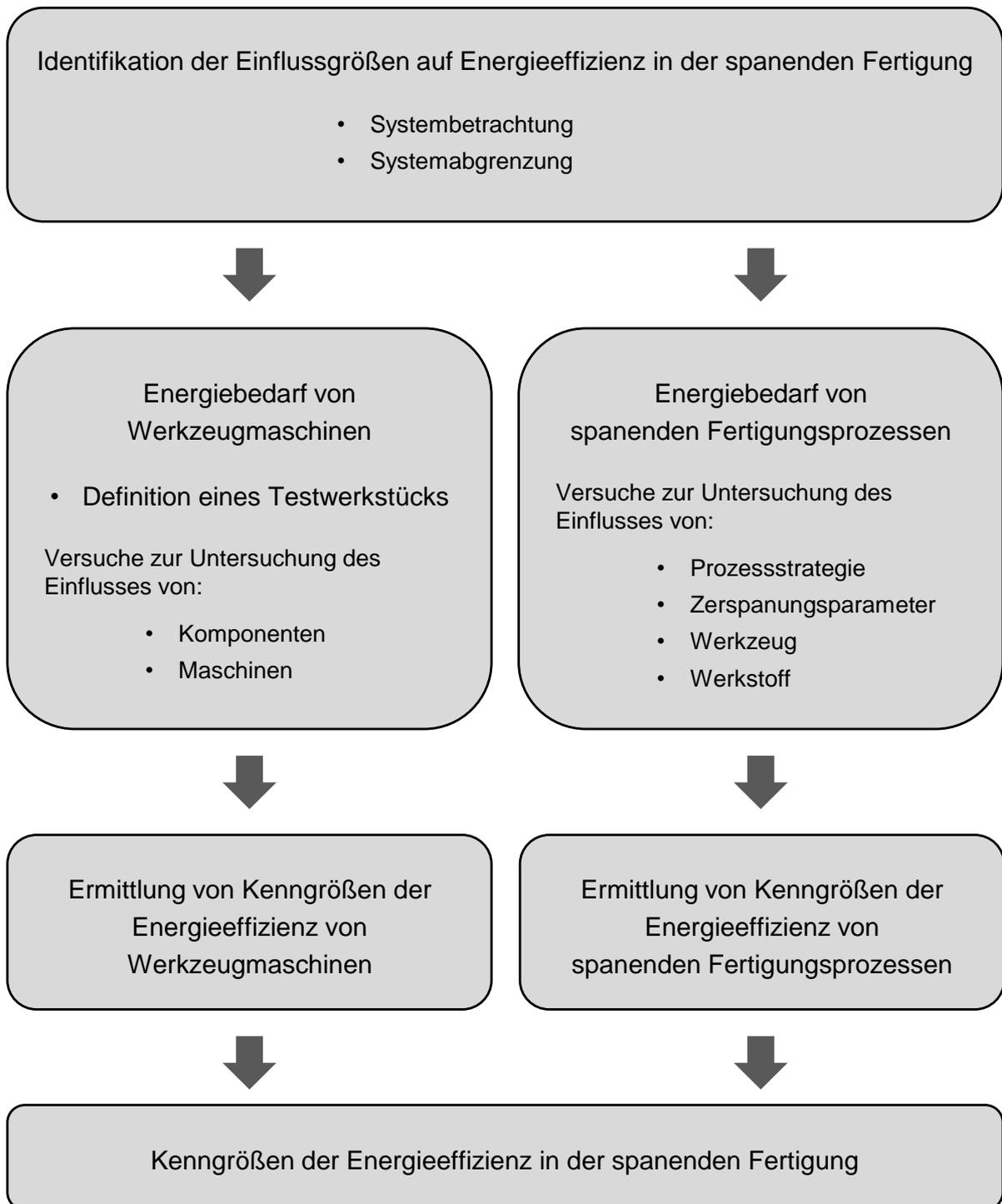


Abbildung 2.0.1: Vorgehensweise zur Ermittlung von Kenngrößen der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung, Quelle: Eigene Darstellung.

3 Stand der Wissenschaft und Praxis

Die Bewertung von Produkten bezüglich ihrer Energieeffizienz hat sich im Bereich der elektrischen Haushaltsgeräte etabliert. Die standardisierten EU-Energielabel bieten Verbrauchern einen schnellen Überblick und unterstützen beim Kauf die Bemühungen, neben den Erstehungskosten die anfallenden Energiekosten über die Lebensdauer abschätzen zu können. Ausgehend von den Haushaltsgeräten hat sich die Kennzeichnung auch in weiteren Bereichen etabliert. So werden zum Beispiel Elektromotoren in weltweit geltende Energieeffizienzklassen IE1 - IE4 unterteilt. Für Gebäude werden Energieausweise erstellt, die Auskunft über den Primärenergiebedarf, den Endenergiebedarf und den Energieverbrauchskennwert geben. Um in der spanenden Fertigung die Frage nach der Energieeffizienz beantworten zu können, braucht es messbare Parameter bzw. Indikatoren. Solche Kriterien und Indikatoren fehlen weltweit noch.

Energieeffizienz ist das Verhältnis oder eine andere quantitative Beziehung zwischen einer erzielten Leistung bzw. einem Ertrag an einer Dienstleistung, Gütern oder Energie und der eingesetzten Energie (ISO 50001). Mit der Norm ISO 50001, Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitungen zur Anwendung, liegt eine internationale Norm vor, die Anforderungen an ein Energiemanagementsystem festlegt. Die Norm soll ein standardisiertes Vorgehen beim Aufbau von Systemen und Prozessen in Organisationen vorgeben, um energiebezogene Leistungen zu verbessern. Die Beachtung des Produktionsfaktors Energie soll damit in Organisationen eingebunden werden.¹⁵

Die Beschäftigung mit Ressourcen und Energieeffizienz in der Produktion ergibt sich nicht nur aus ökonomischen, sondern auch aus ökologischen und gesellschaftlichen Gründen und ist politisch gewollt. Durch staatliche Förderprogramme wie die Initiative Effizienzfabrik in Deutschland, Fabrik der Zukunft in Österreich, State Energy Program in den USA oder durch die NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) wurde und wird die Forschung in diesem Bereich unterstützt (Tabelle 3.0.1). Die Auseinandersetzung mit diesem Themenfeld verspricht einen Aufbau von wettbewerbsstärkenden Kompetenzen und einen Impuls zur Erhöhung der Innovationskraft.¹⁶ Das Marktpotenzial der Energieeffizienz in den weltweiten Leitmärkten wird auf etwa 900 Milliarden Euro im Jahr 2020 geschätzt.¹⁷

Programm	Land	Laufzeit	Fördervolumen	Projekte	Partner
Effizienzfabrik	Deutschland	2009-2013	50 Millionen €	31	>200
Fabrik der Zukunft	Österreich	2000-2012	23 Millionen €	203	>200
State Energy Program	USA	2008	33 Millionen US\$	450	>500
NEDO	Japan	2010	210 Milliarden Yen	50	>600

Tabelle 3.0.1: Förderprogramme Energieeffizienz, Quelle: Eigene Darstellung.

¹⁵Vgl. DIN EN ISO 50001, 2011.

¹⁶Vgl. Ostertag, Sartorius und Tercero-Espinoza, 2010, S.1894ff.

¹⁷Vgl. Walz u. a., 2008, S.48f.

In Österreich wurden im Jahr 2012 1103 PJ Energie genutzt. Dabei entfiel ein Anteil von 35 % auf den Energiebedarf von Industrieunternehmen (Abbildung 3.0.1). Gas und Strom sind die im produzierenden Bereich hauptsächlich verwendeten Primärenergieträger.

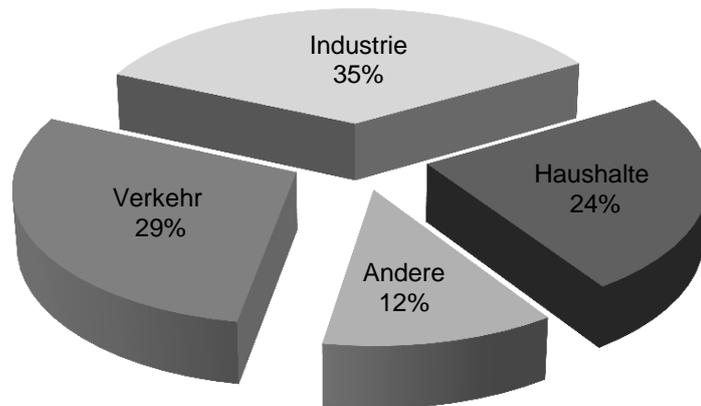


Abbildung 3.0.1: Prozentuale Zusammensetzung des Energiebedarfs in Österreich 2012, Quelle: In Anlehnung an IEA Österreich.

Der Bedarf an elektrischer Energie ist im industriellen Sektor von 1990 bis 2013 deutlich angestiegen.¹⁸ 1990 waren es jährlich noch unter 20 TWh, wohingegen 2013 über 30 TWh von der Industrie benötigt wurden (Abbildung 3.0.2).

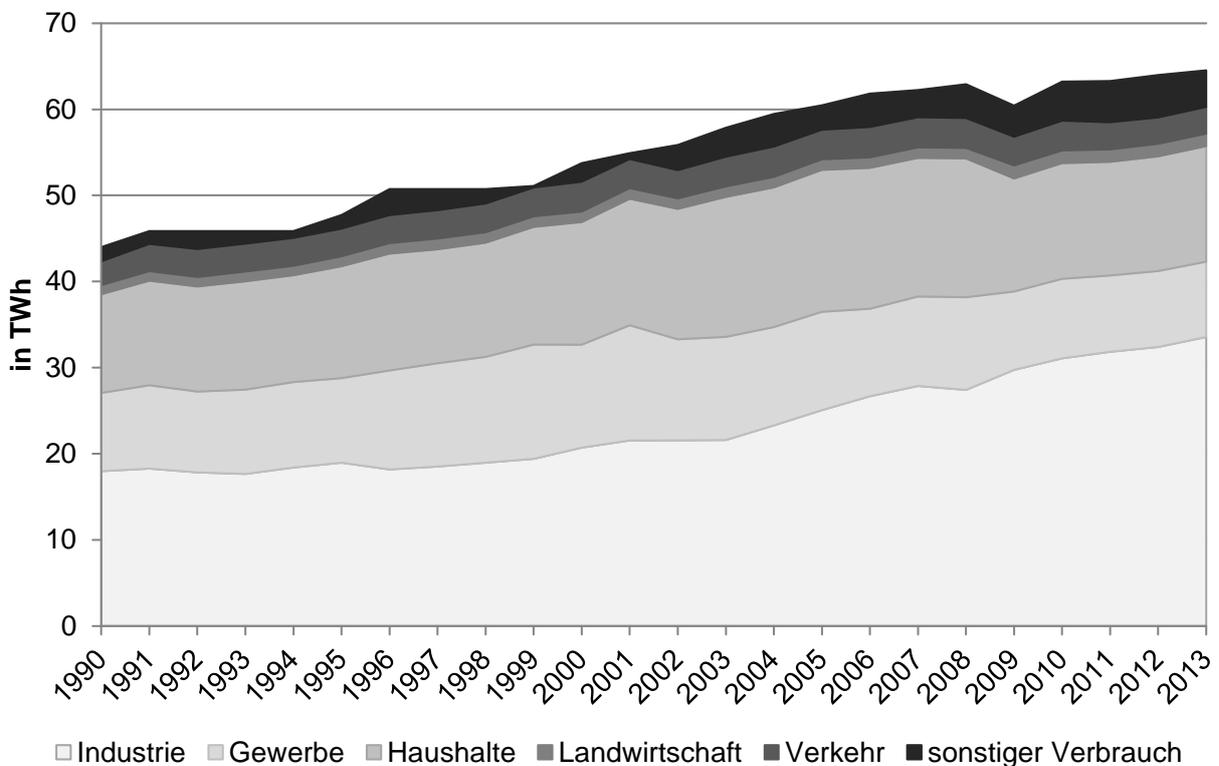


Abbildung 3.0.2: Energetischer Endverbrauch von elektrischer Energie in Österreich 1990-2013, Quelle: In Anlehnung an BMWF (2015b), S.75.

¹⁸Vgl. BMWF, 2015b, S.75.

Der Anteil des Industrieenergieverbrauchs lag in Deutschland 2007 bei 42%. Gemäß Untersuchungen teilt sich dieser Energieverbrauch in 64% Wandlung in kinetische Energie, 26% Prozesswärme, 5% Beleuchtung, 4% IKT und 1% Raumheizung auf (Abbildung 3.0.3).¹⁹ In einer Studie des Ifo-Institutes 2011 geben 64,8% der Befragten im verarbeitenden Gewerbe an, dass die Bedeutung der Energieeffizienz in der Produktion in den vergangenen drei Jahren zugenommen hat.²⁰

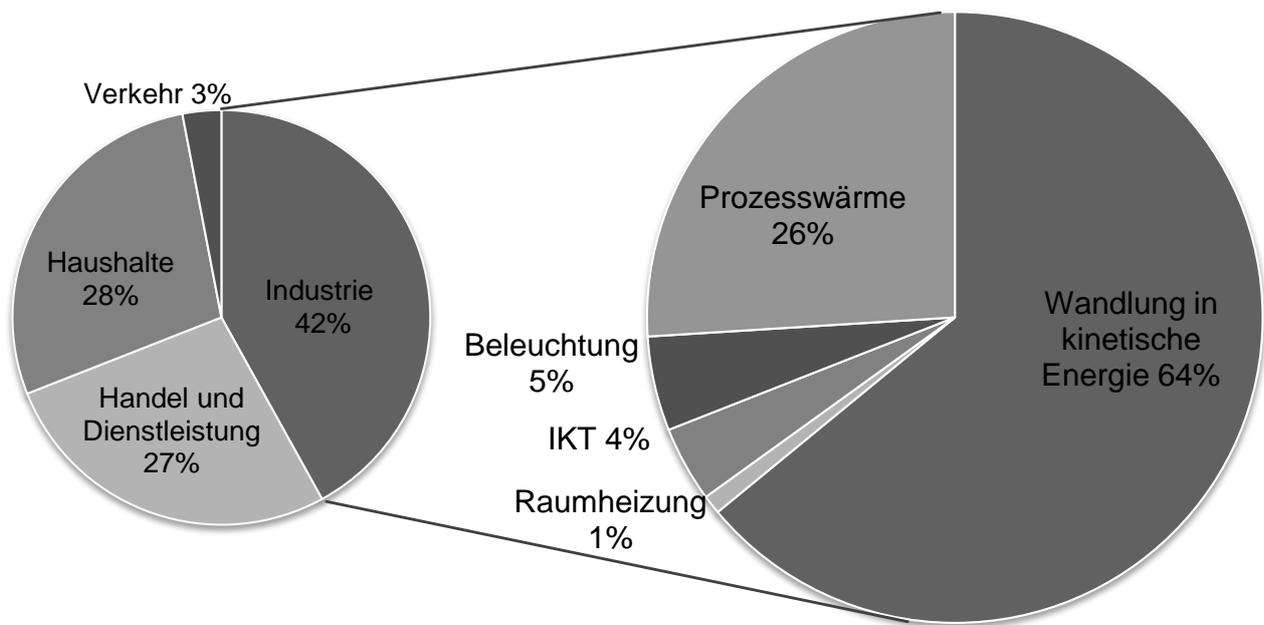


Abbildung 3.0.3: Prozentuale Aufteilung des Industrieenergieverbrauchs in Deutschland 2007, Quelle: In Anlehnung an Tzscheutschler u.a. (2009).

Untersuchungen zeigen, dass in der Fertigung Produktionsanlagen einen bedeutenden Anteil am Energiebedarf haben.²¹ Schätzungen ergeben, dass der Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen in den EU-27 Staaten 2011 bei bis zu 300 TWh pro Jahr liegt, benötigt von 4,5 Millionen eingesetzten Werkzeugmaschinen im metallverarbeitenden Gewerbe.²² Bei Werkzeugmaschinen wird das Potenzial der Energieeffizienz nicht ausgeschöpft, da Informationen zum maschinen- und prozessspezifischen Energiebedarf, der von der Ausstattung und vom Betrieb der Werkzeugmaschine abhängig ist, nicht ausreichend vorliegen.²³

Das Feld der Möglichkeiten und der bestehende Bedarf ist immens. Das Betrachtungsfeld der vorliegenden Arbeit sind spanende Werkzeugmaschinen und die auf diesen Werkzeugmaschinen durchgeführten Bearbeitungsprozesse. In den folgenden Kapiteln 3.1 und 3.2 wird der Stand der Wissenschaft und Praxis bezüglich der Beurteilung von Werkzeugmaschinen und von Fertigungsprozessen im Bereich der spanenden Fertigung dargelegt. Die Ermittlung des Energiebedarfs auf Basis von Leistungsmessungen wird in Kapitel 3.3 beschrieben.

¹⁹Vgl. Tzscheutschler u. a., 2009.

²⁰Vgl. Wackerbauer, 2011.

²¹Vgl. Kührke, 2011, S.2.

²²Vgl. Schichke u. a., 2011.

²³Vgl. Zein, 2012, S.2.

3.1 Beurteilung von Werkzeugmaschinen

Die Bedeutung von Werkzeugmaschinen in der metallverarbeitenden Industrie ist hoch. Werkzeugmaschinen bilden ein Funktionssystem, in dem die Eingangsgrößen Information, Energie und Material in Ausgangsgrößen gewandelt werden.²⁴ Werkzeugmaschinen werden nach den Hauptgruppen der Fertigungsverfahren der DIN 8580 in sechs Gruppen unterteilt (Abbildung 3.1.1). Spanende Werkzeugmaschinen gehören zur Gruppe der Maschinen zum Trennen. Einen großen Anteil an den in der Fertigung eingesetzten Maschinen besitzen Dreh-, Fräs- und Bohrmaschinen. Das weltweite Marktvolumen für spanende Werkzeugmaschinen kann für 2008 mit 83,5 Milliarden US\$ beziffert werden.²⁵

Maschinen zum Urformen	Maschinen zum Umformen	Maschinen zum Trennen	Maschinen zum Fügen	Maschinen zum Beschichten	Maschinen zum Ändern der Stoffeigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> • Stranggussmaschinen • Schleudergussmaschinen • Druckgussmaschinen • Spritzgussmaschinen • Galvanoformende Maschinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressen • Hämmer • Walzmaschinen • Biegemaschinen • Ziehmaschinen 	<p>Zerteilende Maschinen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Scheren • Schneidpressen <p>Spanende Maschinen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Drehmaschinen • Fräsmaschinen • Bohrmaschinen • Schleifmaschine • Honmaschinen • Läppmaschinen • Bearbeitungszentren <p>Abtragende Maschinen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erodiermaschinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schweißmaschinen • Lötmaschinen • Nietmaschinen • Klebmaschinen • Schraubmaschinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Galvanisiermaschinen • Lackiermaschinen • PVD-Anlagen • CVD-Anlagen • Ionenplattiermaschinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrierautomaten • Härteöfen • PVD-Anlagen • CVD-Anlagen • Ionenbeschleunigeranlagen
				PVD: Physical Vapour Deposition CVD: Chemical Vapour Deposition	

Abbildung 3.1.1: Einteilung von Werkzeugmaschinen, Quelle: In Anlehnung an Spur (1996), S.14.

„Die Forderungen an eine Werkzeugmaschine und ihre Beurteilung bilden eine Einheit.“²⁶ Die Beurteilung von Werkzeugmaschinen kann nach Hirsch abgeleitet werden aus:

- der Werkstückgröße (Aufbau, Arbeitsraum, Bewegungsgröße,...);
- der Werkstückanzahl und Teilevielfalt (Werkzeug-, Werkstückwechsel, Steuerung,...);
- dem Verfahren (Bewegungen, Kräfte, Werkzeuge,...);
- den Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchte,...);
- der Arbeits- und Bediensicherheit (Ergonomie, Wartungsfreundlichkeit, Einhausung,...);
- der Wirtschaftlichkeit (Kosten, Aufstellfläche,...);
- den Gesetzen und Vorschriften (Emission von Lärm, Staub,...).

²⁴Vgl. Spur, 1996, S.17.

²⁵Vgl. Dedalus Consulting, 2011, S.2/1.

²⁶Hirsch, 2012, S.9.

Eine andere Untergliederung nehmen Weck und Brecher bei der Beurteilung der Eigenschaften von Werkzeugmaschinen vor. Hier wird zwischen Arbeitsgenauigkeit, Leistungsvermögen, Umweltverhalten und Zuverlässigkeit der Werkzeugmaschinen unterschieden.²⁷

Unabhängig von Bauform, Zweck, Maschinengröße, Automatisierungsgrad und Peripherie, alle Werkzeugmaschinen nutzen elektrische Energie. Im Rahmen der Bearbeitungsprozesse, die von der Werkzeugmaschine und der darüber angesteuerten Peripherie betrieben werden, wird elektrische Energie genutzt und umgewandelt. Übliche Energieformen, die beim Betrieb von Werkzeugmaschinen vorkommen, sind mechanische, hydraulische und pneumatische Energie sowie Wärme- bzw. Kühlenergie.

Für Werkzeugmaschinen und Produktionsanlagen gibt es in den letzten Jahren Bestrebungen den Energiebedarf zu ermitteln. Das europäische Forschungsprojekt ECO²CUT wurde von einer Forschergruppe aus Österreich, Deutschland und Belgien durchgeführt. Unter Beteiligung des Instituts für Fertigungstechnik (IFT) der TU Wien hatte es die Schaffung eines ganzheitlichen Ansatzes zur Energieoptimierung in Fertigungsbetrieben zum Ziel.²⁸ Dabei wurden unterschiedliche Fertigungsanlagen mit Hilfe der Leistungsmessung untersucht und Energy-Footprints von Maschinen und Anlagen erstellt. Abbildung 3.1.2 zeigt als Beispiel die Analyse eines Bearbeitungszentrums bei Opel in Wien, bei dem nur 4,3% der insgesamt benötigten 0,42 kWh für die Prozessleistung aufgebracht werden und ein beachtlicher Anteil von 33,1% durch den Standby-Betrieb der Maschine verbraucht wird. An Hand der Analyseergebnisse konnten Prozessoptimierungen im industriellen Umfeld bei Partnerfirmen realisiert werden.²⁹

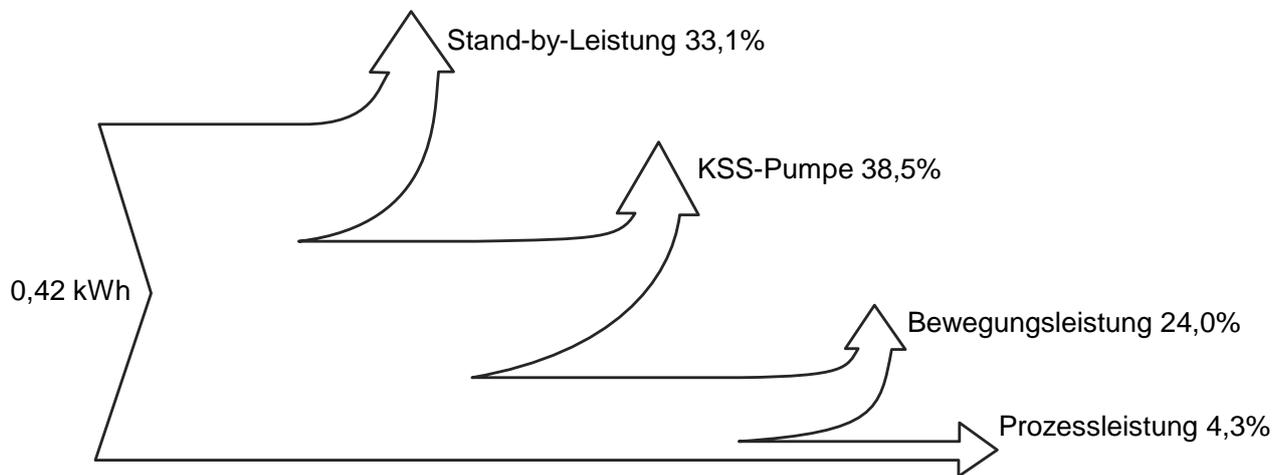


Abbildung 3.1.2: Darstellung des ökologischen Fußabdrucks eines Bearbeitungszentrums, Quelle: Brandenburg und Kropp (2013), S.34 (leicht modifiziert).

²⁷Vgl. Weck und Brecher, 2006, S.3f.

²⁸Vgl. <http://www.eco2cut.com> 15.01.2016.

²⁹Vgl. Brandenburg und Kropp, 2013, S.34f.

Im Rahmen der Dissertation von Benjamin Kuhrke ist an der Technischen Universität Darmstadt eine Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen entwickelt worden, die eine Prognose des Energiebedarfs ermöglicht. Diese Methode unterstützt den Ansatz der Lebenszyklusbetrachtung, der vermehrt eingesetzt wird, um nicht nur die Beschaffung von Werkzeugmaschinen, sondern auch deren Betrieb zu betrachten und zu beurteilen. Allerdings erfordert die Umsetzung der vorgestellten Methoden in großem Maße manuelle Arbeit.³⁰

Die Energiewertstrommethode von Klaus Erlach ermöglicht die Betrachtung und Bewertung einer Gesamtproduktion und stellt den Energiebedarf, der für die Herstellung eines Produktes benötigt wird, transparent dar. Dabei wird die klassische Wertstrommethode um den Aspekt des Energieverbrauchs erweitert. Der Energiebedarf wird am einzelnen Betriebsmittel aufgenommen und auf das betrachtete Produkt bezogen, so dass eine Verknüpfung der Betrachtung von Werkzeugmaschinen und der hergestellten Produkte geschieht.³¹

Ein Beispiel für die Darstellung eines Energiewertstroms zeigt Abbildung 3.1.3. Die Bewertung erfolgt einerseits über die Energieintensität, die für die Herstellung eines Produktes benötigt wird und andererseits über den Quotienten aus einem Referenzwert und der Energieintensität.³²

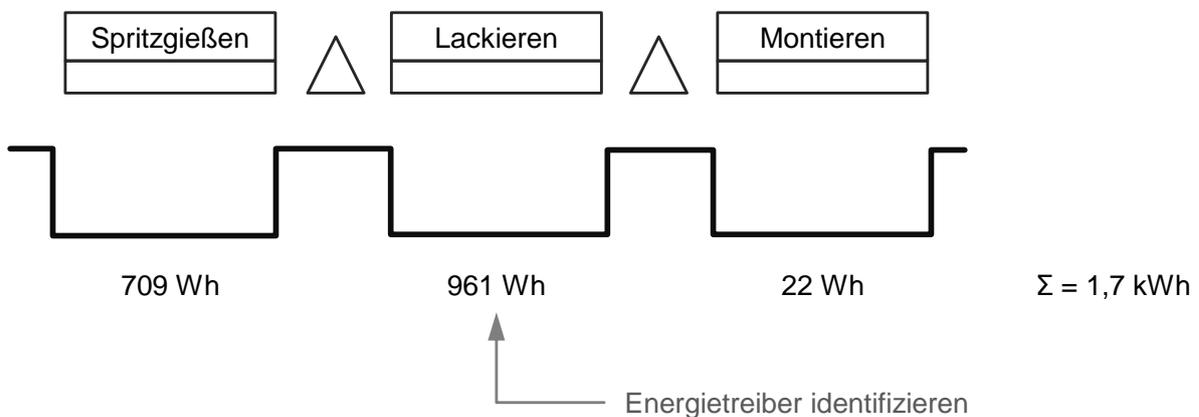


Abbildung 3.1.3: Zeitlinie des Energiewertstroms, Quelle: Erlach (2013a), S.53 (leicht modifiziert).

³⁰Vgl. Kuhrke, 2011, S.147.

³¹Vgl. Erlach, 2013b, S.343ff.

³²Vgl. Erlach, 2013a, S.52ff.

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt PEACH (Projektierung und Steuerung energieeffizienter Anlagen - Systemkompetenz aus Chemnitz) befasst sich mit der Verbesserung der Energieeffizienz von Fertigungs- und Montageanlagen, die im Automobilbau und in der Zulieferindustrie zum Einsatz kommen. Im Rahmen des Projektes ist ein Prototyp für die mobile Energiedatenerfassung entwickelt worden, der zur Untersuchung dieser Produktionsanlagen dient.

Abbildung 3.1.4 zeigt das Grundkonzept der energiesensitiven Anlagensteuerung, bei dem das unter dem Enterprise Resource Planning System (ERP) angesiedelte Manufacturing Execution System (MES) Informationen aus der Energiedatenerfassung erhält, wodurch die Anlagensteuerung beeinflusst wird. Durch die Kopplung der operativen Steuerung mit dem entwickelten Energiemonitoring-System lassen sich geeignete Betriebsweisen steuern und Energiemengen einsparen.³³

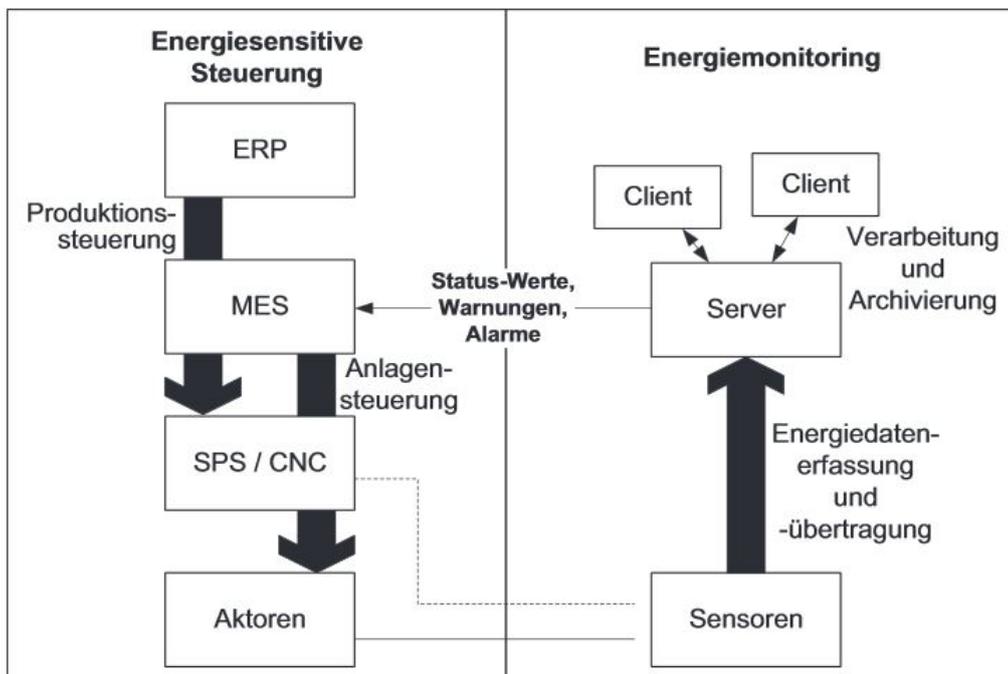


Abbildung 3.1.4: Grundkonzept der energiesensitiven Anlagensteuerung, Quelle: Müller und Löffler (2013), S.75.

In diesem Projekt wird erwartet, dass die „aktive Steuerung des Energieverbrauchs von Produktionsanlagen“ ... „künftig noch an Bedeutung gewinnen“ wird.³⁴

³³ Vgl. Müller und Löffler, 2013, S.72ff.

³⁴ Ebd., S.78.

Im Rahmen von Case Studies sind von der Forschungsgesellschaft Fraunhofer Produktionsanlagen untersucht worden. Die Zeitanteile der Zustände und die Energieanteile der Zustände werden ermittelt. Es wird beispielhaft dargelegt, dass Werkzeugmaschinen in einer Kleinserienfertigung 15% der Betriebszeit und in einer Großserienfertigung 40% der Betriebszeit produktiv sind. Die Grundlast beträgt bis zu drei Viertel der gesamten Leistungsaufnahme der betrachteten Werkzeugmaschinen und erzeugt einen Energiebedarf während der Warte- und Rüstzeiten in den Betriebszuständen *Betriebsbereit* und *Produktionsbereit*.

Abbildung 3.1.5 fasst die Untersuchungsergebnisse zusammen und stellt die Zeitanteile der Zustände *Betriebsbereit*, *Produktionsbereit* und *Produktion*, den Energieanteilen der Zustände gegenüber. Diese Analyse ermittelt ein Potenzial von 10% im Bereich des Zustandes *Betriebsbereit* und ein Potenzial von 5% im Bereich des Zustandes *Produktionsbereit*.³⁵

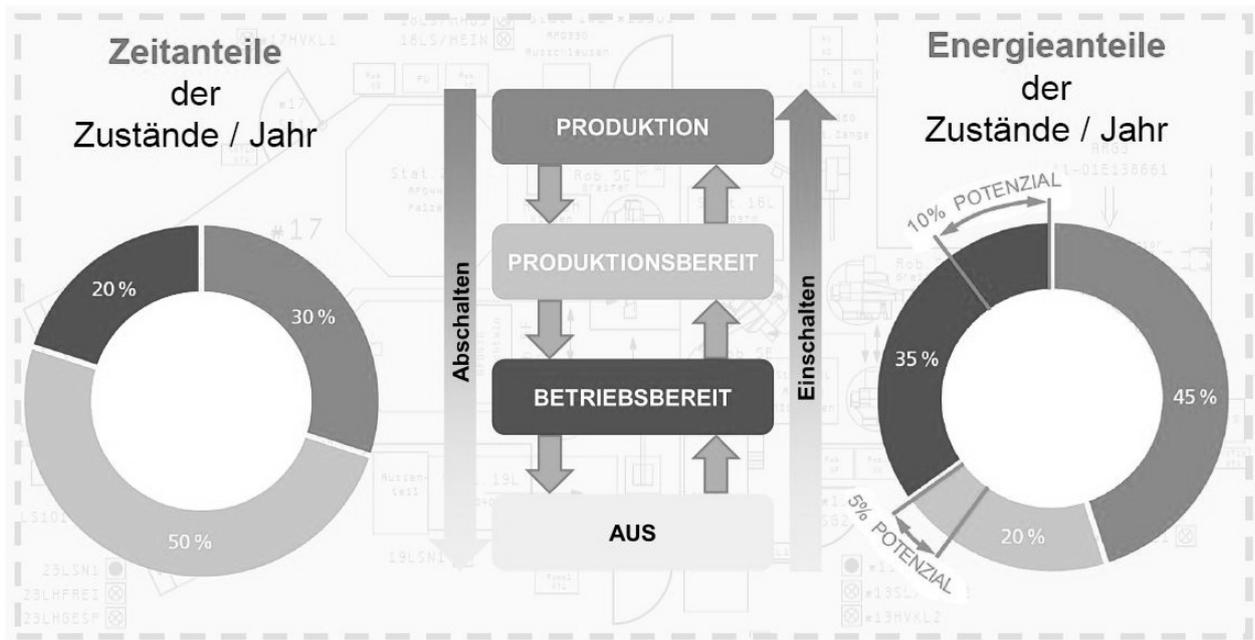


Abbildung 3.1.5: Zeitanteile und Energieanteile von Produktionsanlagen,
Quelle: Vortrag Prof. Matthias Putz 20.03.2014 im Rahmen der ServTech Graz.

³⁵Vgl. Putz, 2014, Vortrag.

3.2 Beurteilung von spanenden Fertigungsverfahren

Trotz steigendem Anteil an additiven Fertigungsverfahren haben die subtraktiven Fertigungsverfahren der spanenden Fertigung nicht an Bedeutung verloren. Zur Beurteilung des Zerspanungsprozesses werden die Eingangs- und Ausgangsgrößen betrachtet und ihr Wirkzusammenhang untersucht (siehe Kapitel 1.2). Die in spanenden Fertigungsverfahren eingesetzten Fertigungsverfahren, bei denen die Formänderung durch Verminderung des Werkstoffzusammenhalts erfolgt, sind der 3. Hauptgruppe - Trennen - der DIN 8580 zugeordnet (Abbildung 3.2.1).

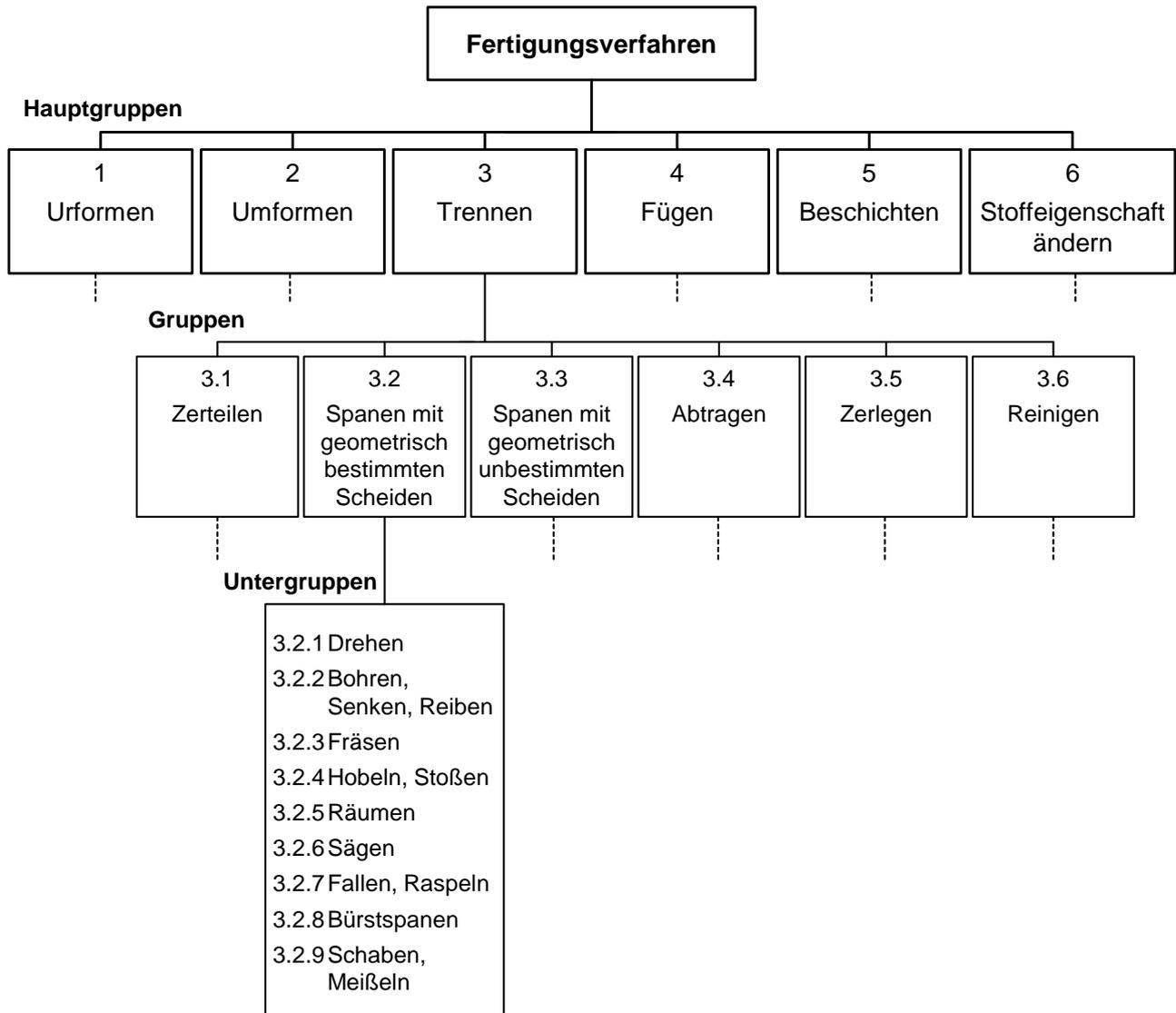


Abbildung 3.2.1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580, Quelle: DIN 8580.

Beim Spanen werden „durch eine (beim Drehen), mehrere (beim Fräsen) oder viele (beim Schleifen) Schneiden eines Werkzeugs Stoffteile in Form von Spänen mechanisch getrennt“.³⁶ Der Schneidkeil dringt in den Werkstoff eines Werkstücks ein. Bei den spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide werden Drehen, Fräsen und Bohren im industriellen Umfeld häufig eingesetzt.

Das Fertigungsverfahren Drehen eignet sich zur Darstellung der allgemeingültigen Zusammenhänge für die Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide besonders gut. In der DIN 6580 sind die Begriffe der Zerspantechnik so festgelegt, dass sie zur Beschreibung der Verfahren für alle Bereiche in der spanenden Fertigung genutzt werden können. Die Betrachtung bezieht sich auf einen einzelnen, ausgewählten Schneidenpunkt mit einem ruhenden Werkstück.³⁷

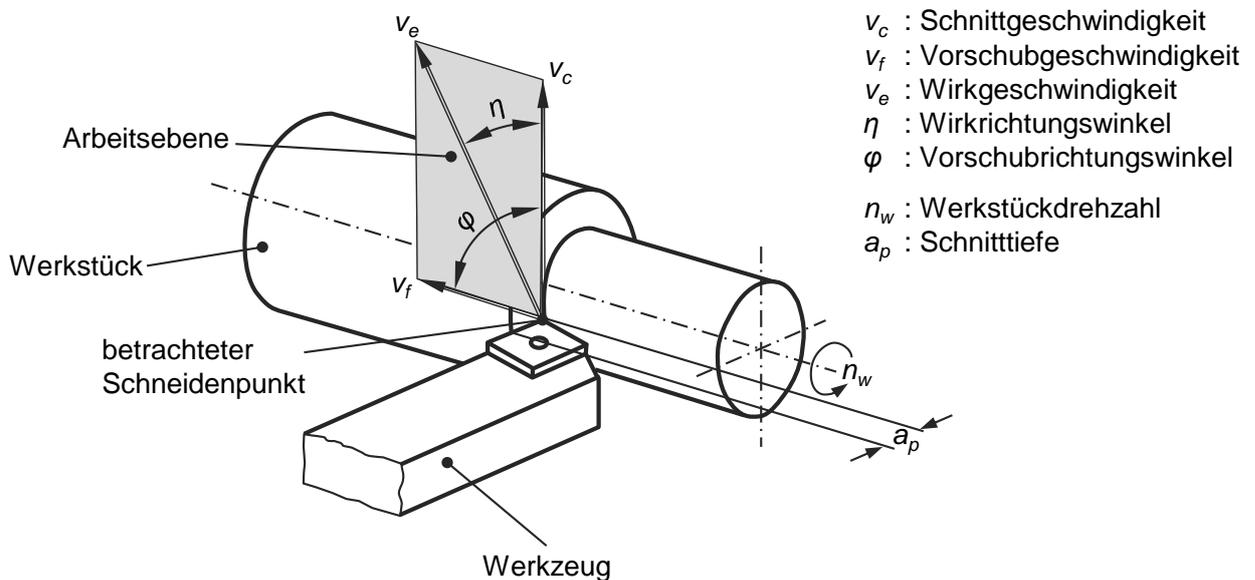


Abbildung 3.2.2: Kinematik beim Spanen, Quelle: In Anlehnung an DIN 6580.

Abbildung 3.2.2 zeigt schematisch die Kinematik beim Spanen. Zwei kinematische Kenngrößen der Relativbewegung zwischen den Wirkpartnern Werkzeug und Werkstoff stellen die Schnittgeschwindigkeit v_c und die Vorschubgeschwindigkeit v_f dar. Die durch die Vektoren der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit aufgespannte Ebene wird als Arbeitsebene bezeichnet. In ihr liegt die aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit resultierende Wirkgeschwindigkeit v_e . Der Wirkrichtungswinkel η wird von der Schnitt- und der Wirkgeschwindigkeit eingeschlossen. Beim Drehen und beim Bohren beträgt der zwischen Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit liegende Vorschubrichtungswinkel φ 90° .

³⁶Denkena und Tönshoff, 2011, S.3.

³⁷Vgl. DIN 6580, 1985, S.2ff.

Abbildung 3.2.3 zeigt, dass der Spanungsquerschnitt A in zwei Größensystemen, entweder bezogen auf das Werkstück oder bezogen auf das Werkzeug, ermittelt werden kann.

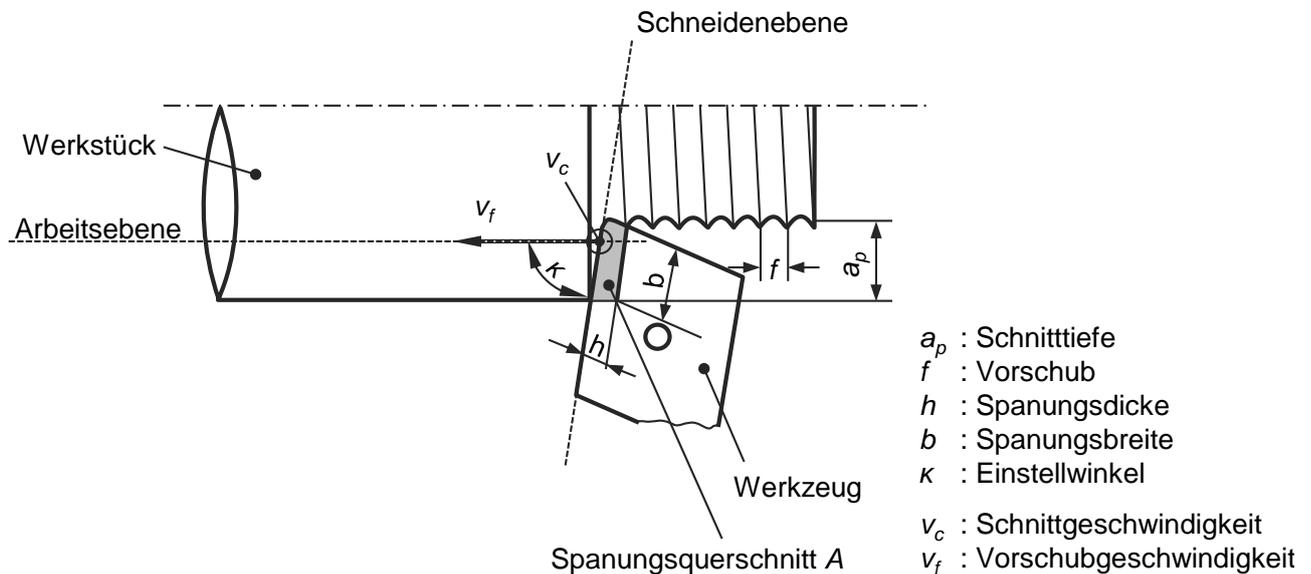


Abbildung 3.2.3: Schnitt- und Spanungsgrößen beim Drehen, Quelle: In Anlehnung an DIN 6580.

Die Schnitttiefe a_p und der Vorschub f bestimmen den Spanungsquerschnitt A bezogen auf das Werkstück. Der Vorschub f ergibt sich gemäß Gleichung 3.2.1 aus der Vorschubgeschwindigkeit v_f und der Werkstückdrehzahl n_w .

Vorschub f :

$$f = \frac{v_f}{n_w} \quad (3.2.1)$$

Die Berechnung des Spanungsquerschnitts A erfolgt gemäß Gleichung 3.2.2.

Spanungsquerschnitt A :

$$A = a_p \cdot f = b \cdot h \quad (3.2.2)$$

Den in der Praxis verwendeten Schnittgrößen a_p und Vorschub f stehen die zur Kennzeichnung des Spanbildungsvorganges verwendeten Spanungsgrößen Spanungsbreite b und Spanungsdicke h gegenüber. Mit dem Einstellwinkel κ lassen sich die Schnittgrößen a_p und f in die Spanungsgrößen b und h überführen (Gleichungen 3.2.3).

Überführung der Schnittgrößen f in h und a_p in b :

$$h = f \cdot \sin\kappa \quad \text{und} \quad b = \frac{a_p}{\sin\kappa} \quad (3.2.3)$$

„Die Zerspankraft F_z ist die bei einem Zerspanvorgang von einem Scheidkeil auf das Werkstück wirkende Gesamtkraft“.³⁸ Die Zerspankraft F_z setzt sich aus der vektoriellen Summe der Schnittkraft F_c , der Vorschubkraft F_f und der Passivkraft F_p zusammen. Abbildung 3.2.4 zeigt die Komponenten der Zerspankraft beim Drehen. Die Kraftkomponenten Schnittkraft und Vorschubkraft bestimmen den Leistungsbedarf einer Werkzeugmaschine, wobei die Passivkraft nicht an den Leistungen beim Zerspanen beteiligt ist.

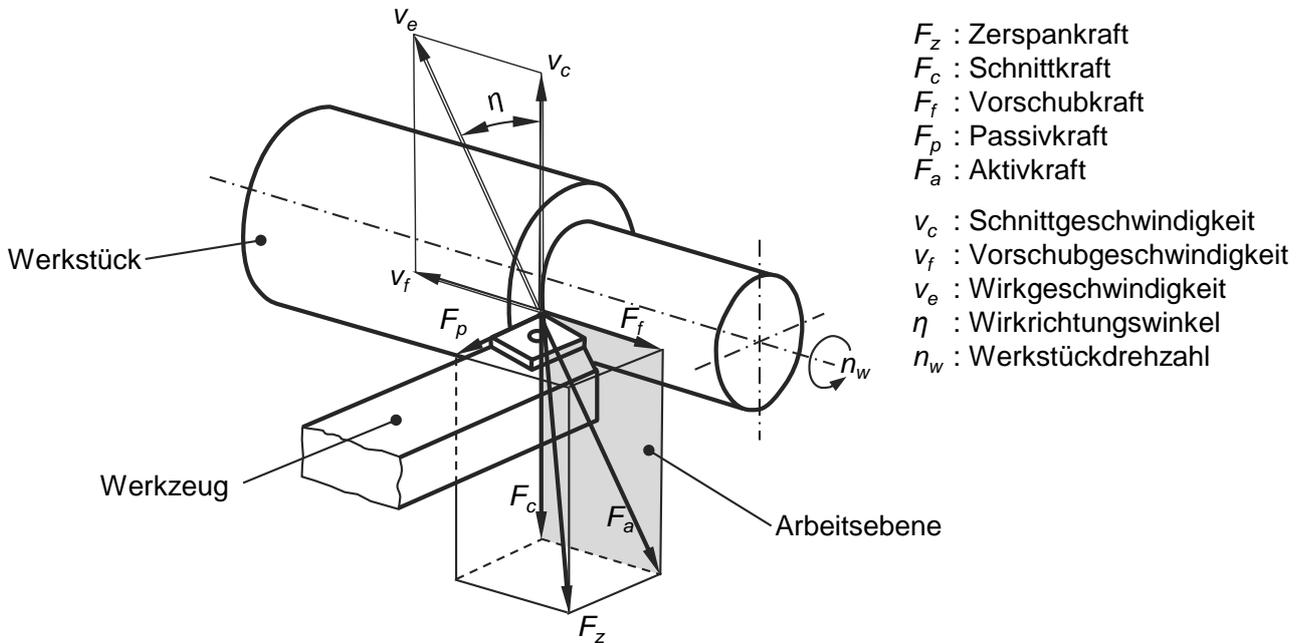


Abbildung 3.2.4: Zerspankraft und ihre Komponenten bei Drehen, Quelle: In Anlehnung an DIN 6584.

Die Stellgrößen, Schnittgeschwindigkeit v_c , Vorschubgeschwindigkeit v_f und Arbeitseingriff a_p , sind an der Werkzeugmaschine einstellbare Eingangsgrößen des Fertigungsprozesses und ergeben im Zusammenspiel mit den Systemgrößen die messbaren Ausgangsgrößen wie Kräfte, Leistungen, Temperaturen und Schwingungen. Die Kenntnis der Kräfte und Leistungen, die beim Zerspanungsprozess auftreten, ist Voraussetzung für die Auslegung des gesamten Prozesses.³⁹

³⁸DIN 6584, 1982, S.1.

³⁹Vgl. Denkena und Tönshoff, 2011, S.51ff.

Fräsen

Fräsen ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit drehender Schnittbewegung des Werkzeugs und einer senkrecht oder schräg zur Drehachse des Werkzeugs verlaufenden Vorschubbewegung. Das zumeist mehrschneidige Werkzeug ist in der Hauptspindel der Werkzeugmaschine aufgenommen und führt die Schnittbewegung aus. Die Werkzeugschneiden sind nicht ständig im Eingriff. Das Werkstück ist mit der Werkstückaufnahme mit dem Maschinentisch verbunden. Die Vorschubbewegung kann durch translatorisch und/oder rotatorisch bewegte Schlitten entweder durch die Hauptspindel oder durch den Maschinentisch erfolgen.

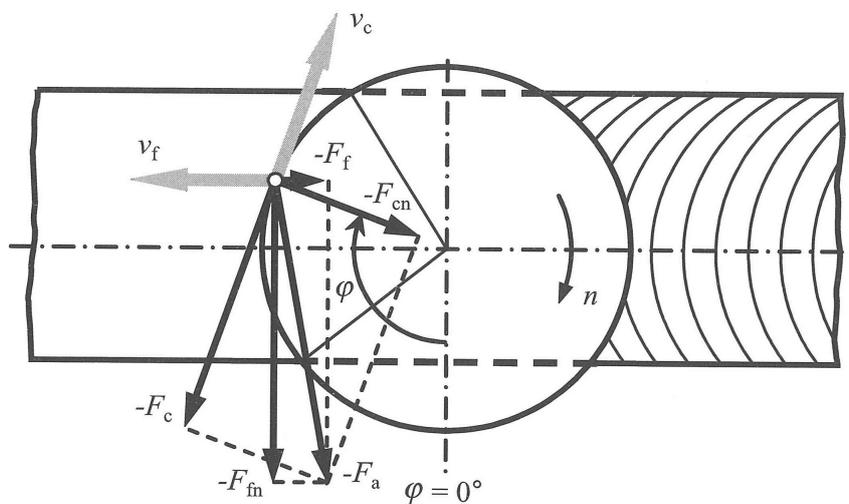


Abbildung 3.2.5: Zerspankraftkomponenten beim Fräsen, Quelle: Klocke und König (2008), S. 431.

Abbildung 3.2.5 zeigt die Zerspankraftkomponenten beim Fräsen. Die in ihre Komponenten zerlegbare Zerspankraft tritt an jeder Schneide des Werkzeugs auf. In Abhängigkeit des Vorschubrichtungswinkels φ ändert sich die Richtung der Aktivkraft. Die Spanungsdicke h ändert sich in Abhängigkeit der Position der Werkzeugschneide. Bei der Berechnung der Kräfte wird daher mit einer gemittelten Spanungsdicke gerechnet. „Für eine Abschätzung der Zerspankraft wird jedoch häufig auf Kennwerte, die beim Drehen ermittelt wurden, zurückgegriffen“.⁴⁰

⁴⁰Klocke und König, 2008, S.431.

Bohren

Bohren ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit drehender Schnittbewegung des Werkzeugs. Die Schnittgeschwindigkeit ändert sich über den Radius und ist in der Drehachse null. Die technologischen Kenngrößen sind die Schnittgeschwindigkeit v_c und der Vorschub je Schneide f_z . Mit diesen Kenngrößen und dem Radius des Bohrers r lässt sich die für die Bearbeitung einzustellende Spindeldrehzahl n_z gemäß Gleichung 3.2.4 berechnen.

Spindeldrehzahl n_z :

$$n_z = \frac{v_c}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (3.2.4)$$

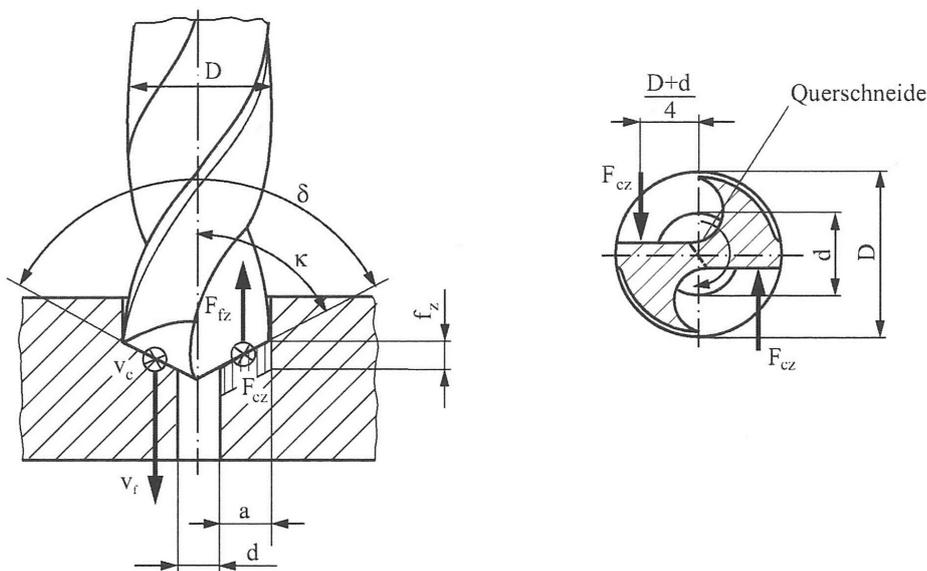


Abbildung 3.2.6: Zerspankraftkomponenten beim Bohren, Quelle: Hirsch (2012), S. 25.

Abbildung 3.2.6 zeigt die Zerspankraftkomponenten beim Bohren am Beispiel eines zweischneidigen Spiralbohrers. Wie für das Drehen beschrieben, lässt sich die Gleichung 3.2.2 unter Berücksichtigung der Bohrergeometrie (Gleichungen 3.2.5) zur Berechnung des Spanungsquerschnittes A für das Bohren verwenden.⁴¹

Spanungsgrößen beim Bohren ins Volle h und b :

$$h = f_z \cdot \sin \kappa \quad \text{und} \quad b = \frac{d_{\text{Bohrer}}}{2 \cdot \sin \kappa} \quad \text{mit Einstellwinkel } \kappa = \frac{1}{2} \delta \quad (3.2.5)$$

Die Berechnung von Schnittkraft und Vorschubkraft erfolgt pro Schneide.

⁴¹Vgl. Hirsch, 2012, S.24.

Berechnung der Leistungen beim Spanen

Die Zerspanungsleistung P_z berechnet sich gemäß Gleichung 3.2.6 aus der Zerspankraft F_z und der Zerspangeschwindigkeit v_z .

Zerspanungsleistung P_z :

$$P_z = F_z \cdot v_z \quad (3.2.6)$$

Da in Passivrichtung keine Geschwindigkeitskomponente vorhanden ist, berechnet sich die Wirkleistung der Zerspanung P_e durch die Summe der Schnittleistung P_c und der Vorschubleistung P_f (Gleichung 3.2.7).

Wirkleistung der Zerspanung P_e :

$$P_e = P_c + P_f \quad (3.2.7)$$

Die Schnitt- und Vorschubleistung werden durch das Produkt der Geschwindigkeitskomponente und der Komponente der Zerspankraft berechnet (Gleichung 3.2.8 und 3.2.9).

Schnittleistung P_c :

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (3.2.8)$$

Vorschubleistung P_f :

$$P_f = F_f \cdot v_f \quad (3.2.9)$$

Über die Prozessdauer im Zeitfenster von t_0 bis t_1 wird der Energiebedarf E_c und E_f aus der Schnittleistung P_c und aus der Vorschubleistung P_f ermittelt (Gleichung 3.2.10 und 3.2.11).

Schnittenergie E_c :

$$E_c = \int_{t_0}^{t_1} P_c(t) dt \quad (3.2.10)$$

Vorschubenergie E_f :

$$E_f = \int_{t_0}^{t_1} P_f(t) dt \quad (3.2.11)$$

Auf Basis von empirischen Modellen können Kräfte und Leistungen beim Zerspanen berechnet werden. „Bei der Auslegung moderner Werkzeugmaschinen spielen allerdings die erforderlichen Schnitt- und Vorschubleistungen...eine untergeordnete Rolle....Die installierten Beschleunigungsleistungen liegen deshalb teilweise um ein Vielfaches über der alleine für den Zerspanvorgang...ermittelten Leistungen P_c und P_f “.⁴²

Die spezifische Schnittkraft k_c berechnet sich gemäß Gleichung 3.2.12 über die Schnittkraft F_c bezogen auf den Spanungsquerschnitt A .

Spezifische Schnittkraft k_c :

$$k_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.2.12)$$

⁴²Denkena und Tönshoff, 2011, S.53.

Die von Denkena und Tönshoff im Grundlagenbuch Spanen beschriebenen experimentellen Untersuchungen verschiedener Fertigungsverfahren zeigen, dass der Faktor k_c nichtlinear von der Spanungsdicke h abhängig ist (Abbildung 3.2.7).

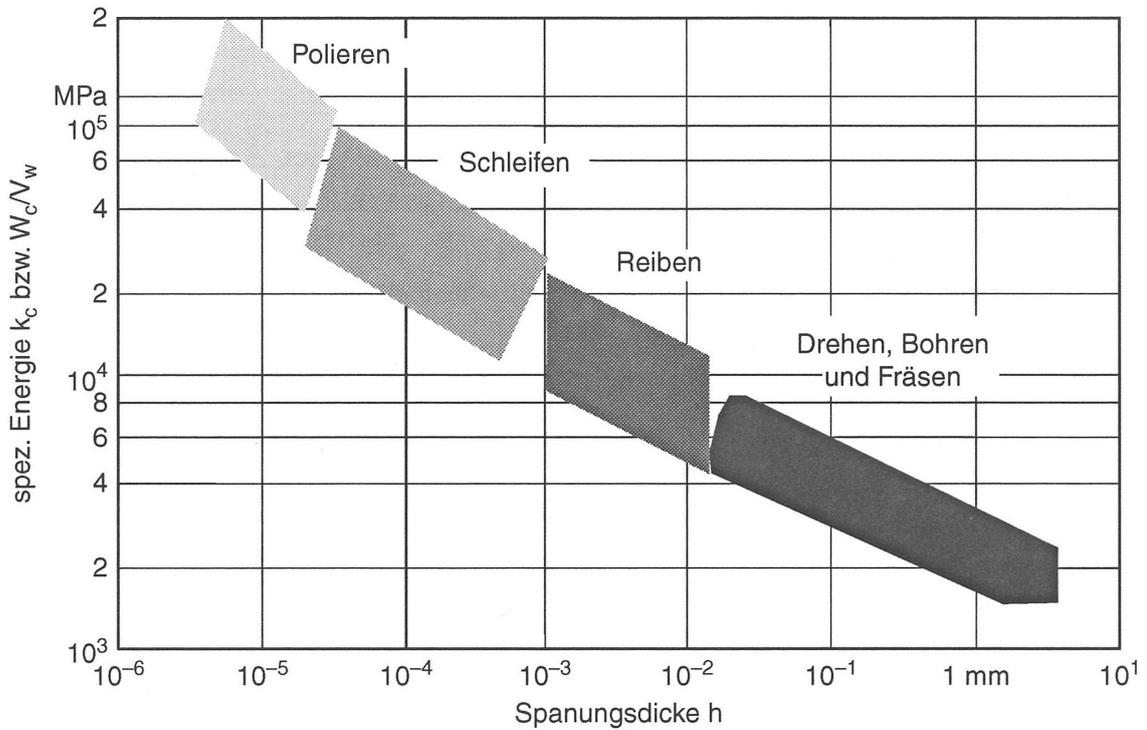


Abbildung 3.2.7: Spezifische Schnittkraft bzw. Schnittenergie, Quelle: Denkena und Tönshoff (2011), S. 55.

3.3 Leistungsmessung zur Ermittlung des Energiebedarfs

Die Wertstrommethode hat sich bei der Auslegung von Fertigungsprozessen in den letzten Jahren in der Praxis etabliert. Zur Einbeziehung des Energiebedarfs wird die Methode um den Faktor Energie erweitert. Durch die Wertstromperspektive kann der Energiebedarf nicht nur auf einzelne Anlagen bezogen werden, sondern ermöglicht die Betrachtung des Produktes im Fertigungsprozess.⁴³ Als Basis für die Analyse dienen Messungen der Leistungsverläufe direkt an den Anlagen in der Fertigung.

Im Mapal Technologiereport wird der Energiebedarf von spanenden Werkzeugmaschinen und von Zerspansprozessen aus Sicht eines Werkzeugherstellers analysiert. Durch die Optimierung der Mikro- und Makrogeometrie der Werkzeugschneiden und durch eine reibungsarme Beschichtung kann die Prozessenergie in einer Benchmarkuntersuchung um 24% gesenkt werden.⁴⁴ Die Energiebedarfsermittlung mit Hilfe der Leistungsmessung erlangt im produktionstechnischen Umfeld zunehmend an Bedeutung. Ziele, die mit der Durchführung von Leistungsmessungen erreicht werden sollen, sind:⁴⁵

- Erfassung des Gesamtenergiebedarfs zur Bestimmung der Anforderungen bei der Energiebereitstellung;
- Schaffung von Transparenz durch die Ermittlung der Energieverteilung;
- Zuordnung von Verbrauchern zu Kostenstellen;
- Ermittlung spezifischer Energiebedarfe zur Identifikation von Einsparpotenzialen;
- Sensibilisierung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern mit Hilfe der Visualisierung des Energiebedarfs der eingesetzten Maschinen;
- Messungen zum Nachweis der Verbrauchsmenge oder der Verbrauchsverläufe;
- Messungen zur Ermittlung von Kennzahlen.

Die SI-Einheit für Energie ist Joule. Neben der SI-Einheit sind in Abhängigkeit des Anwendungsgebietes auch andere Energieeinheiten im Gebrauch. 1 Joule ist identisch mit 1 Wattsekunde (Ws), 1 Newtonmeter (Nm), 1 Voltampere Sekunde (VAs). In Bezug auf die elektrische Energie werden häufig Wattsekunde, Wattstunde und deren dezimal Vielfache verwendet. Tabelle 3.3.1 gibt einen Überblick zur Umrechnung von Wattsekunde, Wattstunde in Joule inklusive deren dezimal Vielfache .

Wattsekunde, Wattstunde und dezimal Vielfache		Umrechnung in Joule und dezimal Vielfache	
1 Wattsekunde	= 1 Ws	= 1 J	= 1 Joule
1 Wattstunde	= 1 Wh	= 3600 J	= 3,6 Kilojoule = 3,6 kJ
1 Kilowattstunde	= 1 kWh	= 3600 kJ	= 3,6 Megajoule = 3,6 MJ
1 Megawattstunde	= 1 Mh	= 3600 MJ	= 3,6 Gigajoule = 3,6 GJ
1 Gigawattstunde	= 1 GWh	= 3600 GJ	= 3,6 Terajoule = 3,6 TJ
1 Terawattstunde	= 1 TWh	= 3600 TJ	= 3,6 Petajoule = 3,6 PJ

Tabelle 3.3.1: Umrechnungstabelle Wattsekunde und Wattstunde in Joule, Quelle: Eigene Darstellung.

⁴³Vgl. Erlach, 2013b, S.47ff.

⁴⁴Vgl. Kalhöfer und Kress, 2013, S.1ff.

⁴⁵Vgl. Richter, 2013, S.193ff.

3.3.1 Messung elektrischer Energie

Die Basis zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs sind Messungen elektrischer Größen. Strom I und Spannung U sind die Grundgrößen des elektrischen Stromkreises bei Gleich- und Wechselspannung. Bei Gleichspannung und Gleichstrom sind die Momentanwerte zu allen Zeitpunkten konstant (Abbildung 3.3.1 links). Wechselspannung und Wechselstrom haben zeitlich veränderliche Momentanwerte $u(t)$ und $i(t)$, die sich nach einem Zeitintervall wiederholen und deren arithmetische Mittelwerte gleich null sind (Abbildung 3.3.1 rechts). Für die Vergleichbarkeit mit Gleichstrom und -spannung müssen Effektivwerte berechnet werden.⁴⁶

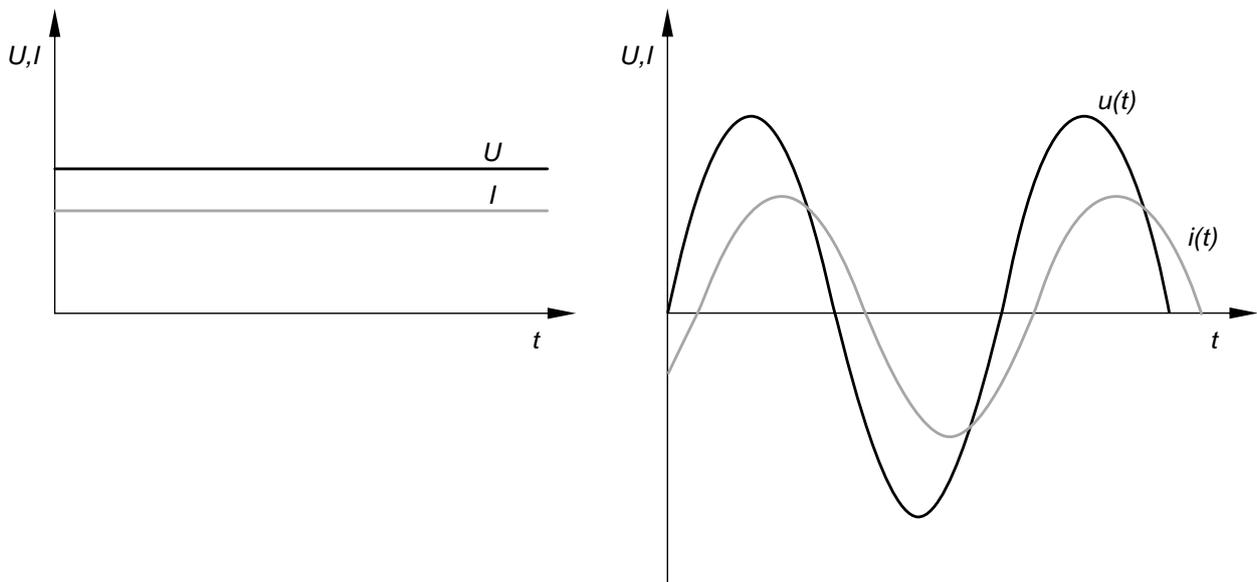


Abbildung 3.3.1: links - Verlauf von Gleichspannung und Gleichstrom, rechts- Verlauf von Wechselspannung und Wechselstrom, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch die Multiplikation von $u(t)$ und $i(t)$ errechnet sich gemäß Gleichung 3.3.1 die zu diesem Zeitpunkt aufgenommene bzw. abgegebene Momentanleistung $p(t)$.

Momentanleistung $p(t)$:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (3.3.1)$$

Die Wirkleistung P kann durch Integration der Momentanleistung $p(t)$ innerhalb einer Zeitperiode T gemäß Gleichung 3.3.2 berechnet werden.

Wirkleistung P :

$$P = \frac{1}{T} \int_T (u(t) \cdot i(t)) dt \quad (3.3.2)$$

⁴⁶Vgl. Hoffmann, 2007, S.54ff.

Die Wirkleistung P entspricht einer in einem Verbraucher im zeitlichen Mittelwert umgesetzten Leistung. Der Momentanwertleistungsverlauf $p(t)$ der Wirkleistung nimmt ohne Phasenverschiebung nur positive Werte an (Abbildung 3.3.2 links). In diesem Fall entsprechen sich Schein- und Wirkleistung $S = P$ und die Blindleistung Q ist Null. Bei einer Phasenverschiebung trägt der positive Momentanwertleistungsverlauf $p(t) > 0$ zur Wirkleistung P und der negative Momentanwertleistungsverlauf $p(t) < 0$ zur Blindleistung Q bei (Abbildung 3.3.2 rechts).⁴⁷

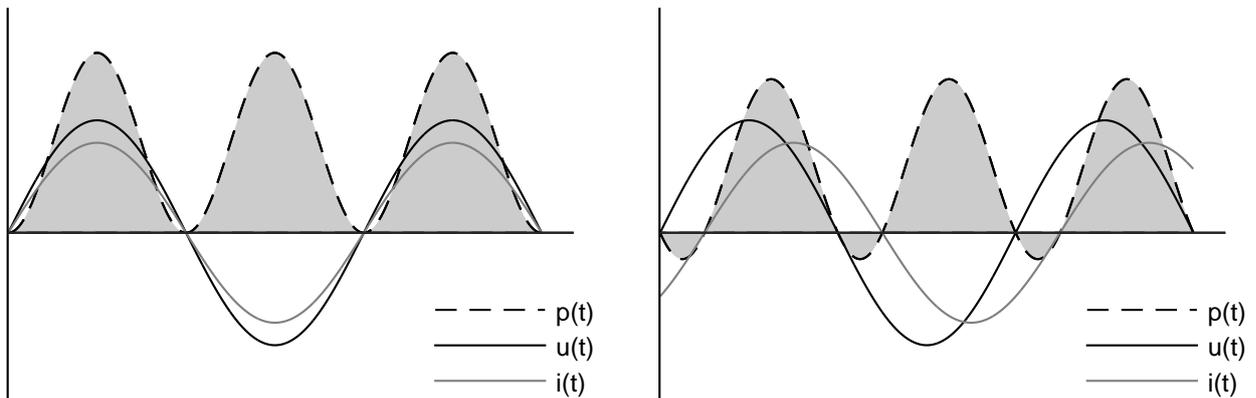


Abbildung 3.3.2: Wirkleistungsverlauf links - ohne Phasenverschiebung, rechts - mit Phasenverschiebung, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch Integration der Wirkleistung P erhält man die Wirkenergie E des betrachteten Zeitraums T_0 bis T_N (Gleichung 3.3.3).

Wirkenergie E :

$$E = \int_{T_0}^{T_N} P(t) dt \quad (3.3.3)$$

Die Energie ist in Abbildung 3.3.2 als graue Fläche unter der $p(t)$ Kurve dargestellt, wobei nur die im positiven Bereich liegende Fläche, die nutzbare Wirkenergie E liefert.

⁴⁷Vgl. Hoffmann, 2007, S.68ff.

3.3.2 Leistungsmessung zur Bewertung von Maschinen und Anlagen

Um Werkzeugmaschinen miteinander vergleichen zu können, muss ein standardisiertes Verfahren angewendet werden. Die Vergleichbarkeit von Komponenten einer Werkzeugmaschine hinsichtlich ihres Energiebedarfs ist mit einer Methode möglich, die am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung der ETH Zürich entwickelt wurde. Bei dieser Methode wird eine Werkzeugmaschine mit den zugehörigen Komponenten untersucht und der Retrofit Faktor I_R berechnet. Der Energiebedarf E_i der untersuchten Komponente wird bewertet und liefert Informationen über Effizienz und Notwendigkeit des Nachrüstens oder Modernisierens des Aggregates. Zur Ermittlung der Kennzahl werden Leistungsmessungen der verschiedenen Komponenten durchgeführt.⁴⁸ Abbildung 3.3.3 zeigt schematisch die Zusammensetzung des Gesamtenergiebedarfs aus den Anteilen der Werkzeugmaschinenkomponenten.

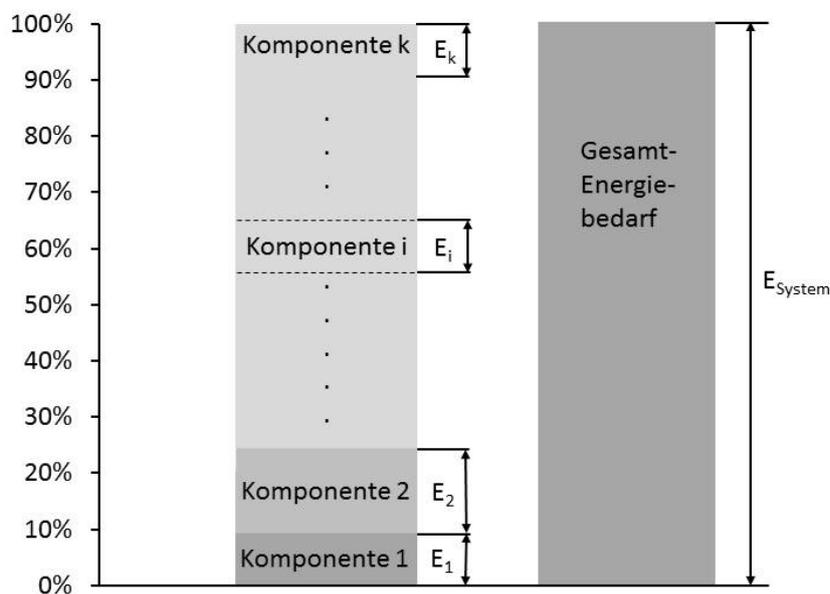


Abbildung 3.3.3: Energiebedarf von Werkzeugmaschinenkomponenten, Quelle: Eigene Darstellung.

Der dimensionslose Retrofit Faktor I_R errechnet sich gemäß Gleichung 3.3.4 aus den Gewichtungsfaktoren Energieanteil A_E und Lastkollektiv A_0 deren Ermittlung im Folgenden beschrieben ist.

Retrofit Faktor I_R :

$$I_R = A_E \cdot A_0 \quad (3.3.4)$$

Der Gewichtungsfaktor Energieanteil $A_{E,i}$ gibt das Verhältnis des Energiebedarfs E_i der betrachteten Komponente i der Werkzeugmaschine zum Gesamtenergiebedarf E_{System} der Werkzeugmaschine an. Der Energiebedarf wird über die aufgenommenen Leistungskurven der Werkzeugmaschinenkomponenten $p_i(t)$ und des Gesamtsystems $p_{System}(t)$ errechnet und zueinander ins Verhältnis gesetzt (Gleichung 3.3.5). Gewichtungsfaktor Energieanteil $A_{E,i}$:

$$A_{E,i} = \frac{E_i}{E_{System}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} p_i(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} p_{System}(t) dt} \quad (3.3.5)$$

⁴⁸Vgl. Gontarz u. a., 2012, S.131ff.

Der Gewichtungsfaktor Lastkollektiv $A_{0,i}$ der jeweiligen Werkzeugmaschinenkomponente i ist der zweite Gewichtungsfaktor zur Berechnung des Retrofit Faktors $I_{R,i}$, der in vier Schritten ermittelt wird. Zur Bestimmung des Gewichtungsfaktors Lastkollektiv $A_{0,i}$ muss zuerst das Betrachtungszeitfenster von t_0 bis t_1 definiert und darüber die Leistungsmessung gemäß Gleichung 3.3.6 und 3.3.7 normiert werden (Abbildung 3.3.4).

Normierte Zeit $t_{i,norm}$:

$$t_{i,norm} = \frac{t_i - t_0}{t_1 - t_0} \quad (3.3.6)$$

Normierte Leistung $P_{i,norm}(t_{i,norm})$:

$$P_{i,norm}(t_{i,norm}) = \frac{P_i(t_{i,norm} - P_{i,min})}{P_{i,max} - P_{i,min}} \quad (3.3.7)$$

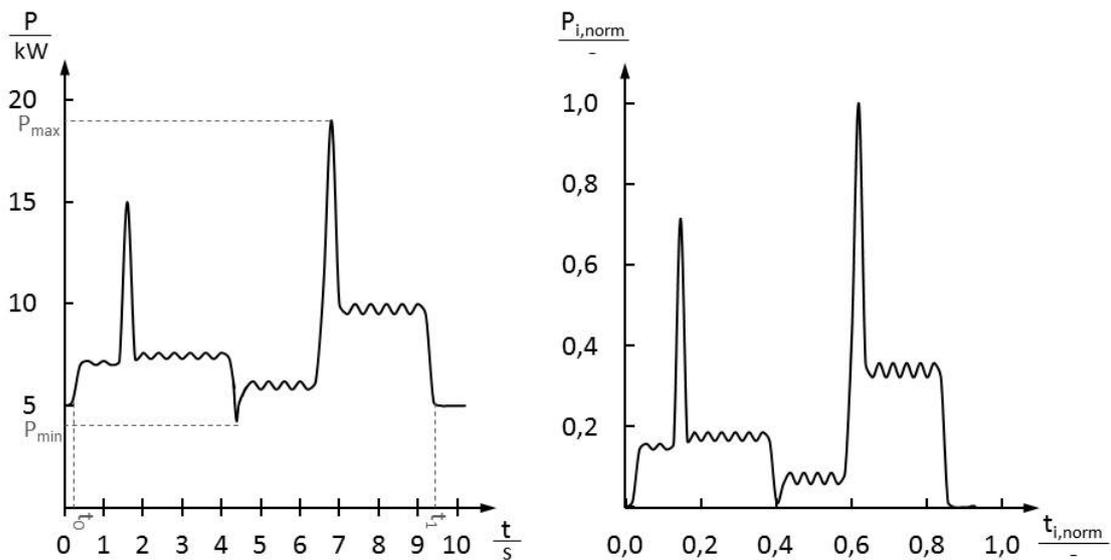


Abbildung 3.3.4: Normierung der Leistungsmessung, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach der Normierung der Leistung und der Zeit wird die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Leistungen gebildet. In die Häufigkeitsverteilung wird eine Regressionsgerade gelegt. Diese Gerade bestimmt den Regressionswinkel α_i , welcher zur Ermittlung von $A_{0,i}$ erforderlich ist (Abbildung 3.3.5).

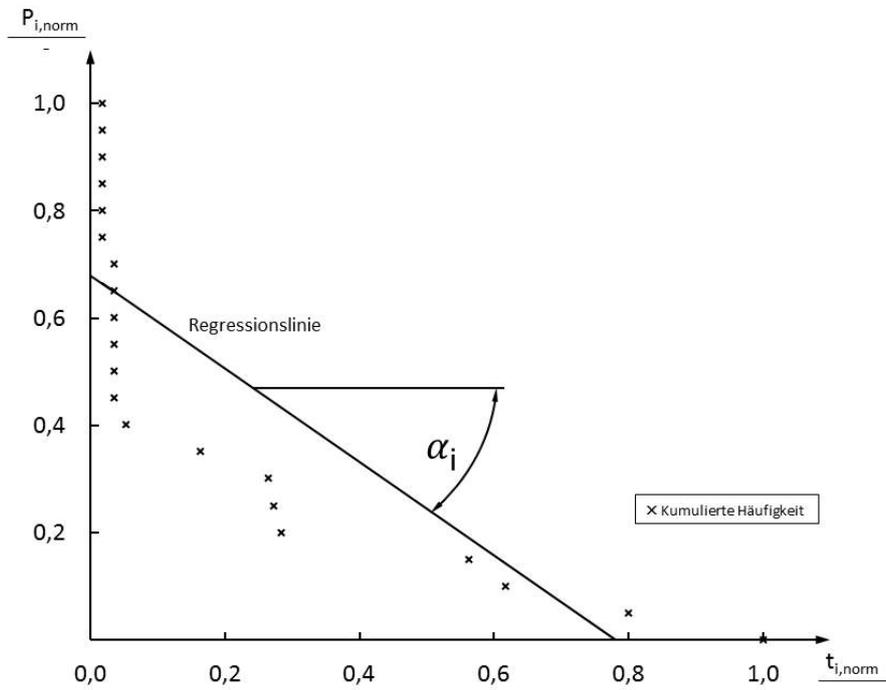


Abbildung 3.3.5: Ermittlung des Regressionswinkels, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Gewichtungsfaktor Lastkollektiv $A_{0,i}$ berechnet sich gemäß Gleichung 3.3.8 und beschreibt das Lastkollektivverhalten einer Komponente i der untersuchten Werkzeugmaschine. Bei konstantem Leistungsbedarf hat eine Komponente nur ein einziges Lastniveau in der untersuchten Zeitspanne. Die Regressionsgerade wäre für diese Komponente waagrecht und der Regressionswinkel 0° , wodurch der Faktor $A_{0,i}$ Eins werden würde.

Gewichtungsfaktor Lastkollektiv $A_{0,i}$:

$$A_{0,i} = \frac{90^\circ - |\alpha_i|}{90^\circ} \quad (3.3.8)$$

An Hand der Faktoren $A_{E,i}$ und $A_{0,i}$ wird der Retrofit-Faktor $I_{R,i}$ der Werkzeugmaschinenkomponente gemäß Gleichung 3.3.9 berechnet.

Retrofit-Faktor einer Werkzeugmaschinenkomponente $I_{R,i}$:

$$I_{R,i} = A_{E,i} \cdot A_{0,i} \quad (3.3.9)$$

Mit der vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung der ETH Zürich entwickelten Methode lassen sich Komponenten einer Werkzeugmaschine in einem Fertigungsprozess bewerten. Empfohlen wird die Einleitung von Maßnahmen ab Werten von $A_{E,i} \geq 5\%$.⁴⁹

⁴⁹Vgl. Gontarz u. a., 2011, S.4.

3.3.3 Ermittlung der Energieeffizienz

Energieeffizienz ist ein Überbegriff, der durch die Definition des politischen Zieles der Steigerung der Energieeffizienz, häufig verwendet wird. Es gibt kein eindeutiges quantitatives Maß der Energieeffizienz. Die einfachste Definition, beschrieben mit Gleichung 3.3.10, ist das Verhältnis der nutzbaren Ausbringung eines Prozesses zum Energieaufwand.⁵⁰

$$\eta = \frac{\text{nutzbare Ausbringung eines Prozesses}}{\text{Energieaufwand eines Prozesses}} \quad (3.3.10)$$

Tabelle 3.3.2 zeigt Beispiele für die zwei Klassen der Energieeffizienz Kenngrößen. Es wird zwischen den dimensionslosen Kenngrößen und den bezogenen Kenngrößen unterschieden.

Klassen der Energieeffizienz Kenngrößen	Bereich	Verhältnis	Einheit
Dimensionslose quantitative Verhältnisse	Thermodynamik	$\frac{\text{nutzbare Energieausbringung}}{\text{gesamter Energieaufwand}}$	-
	Thermodynamik	$\frac{\text{tatsächlicher Energieaufwand}}{\text{theoretischer Energieaufwand}}$	-
	Ökonomie	$\frac{\text{wirtschaftlicher Nutzwert}}{\text{Energiekosten}}$	-
Energieintensität oder spezifischer Energieverbrauch	Physik, Thermodynamik	$\frac{\text{Energieaufwand}}{\text{physikalische Größe}}$	z.B. J g ⁻¹
	Ökonomie, Thermodynamik	$\frac{\text{Energieaufwand}}{\text{wirtschaftlicher Nutzwert}}$	z.B. J € ⁻¹

Tabelle 3.3.2: Klassen der Energieeffizienz Kenngrößen, Quelle: In Anlehnung an Patterson (1996), S. 377ff.

Gemäß DIN EN ISO 9000 ist Effizienz das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen⁵¹. Um die Effizienz ermitteln zu können, muss eine Quantifizierung der eingesetzten Ressourcen und des erreichten Ergebnisses vorgenommen werden. Quantifizierungsmethoden für die Vergleichbarkeit sind:

- Definition eines Testwerkstücks;
- Vorgabe von Referenzteil und Referenzprozess;
- Schaffung von Bezugsgrößen wie z.B. Zerspanungsvolumen für spezifische Zerspanungsenergie.

⁵⁰ Vgl. Patterson, 1996, S.377.

⁵¹ Vgl. DIN EN ISO 9000, 2005, S.14.

4 Versuchs- und Messeinrichtung

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Versuchs- und Messeinrichtungen beschrieben. Bei den Versuchen werden verschiedene Werkzeugmaschinen, Versuchswerkstoffe und Versuchswerkzeuge verwendet, deren technische Daten im Folgenden dokumentiert sind. Die Messeinrichtungen und die Versuchsaufbauten werden schematisch skizziert.

4.1 Werkzeugmaschinen

Die Versuche werden auf drei unterschiedlichen Werkzeugmaschinen durchgeführt. Ein CNC-Bearbeitungszentrum EMCO Hyperturn-655MCPlus (technische Daten siehe Tabelle 4.1.1) und ein CNC-Drehzentrum WEIPERT WNC 500S (technische Daten siehe Tabelle 4.1.3) stehen am Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Graz für die Versuche zur Verfügung. Die Bohrversuche, bei denen eine Innenkühlung eingesetzt werden muss, werden im AEC Zerspanungslabor der Firma TCM in Stainz durchgeführt. Dort steht ein CNC-Bearbeitungszentrum HERMLE C50U (technische Daten siehe Tabelle 4.1.2) mit 80 bar Kühlmitteldruck für die Innenkühlung zur Verfügung.

CNC-Bearbeitungszentren

Kenngröße	Kennwert
Spannungsversorgung	3x400 V/PE
Frequenz	50/60 Hz
Anschlussleistung der Maschine	46 kVA
Hauptspindelantrieb: AC Hohlspindelmotor (100%, 40%ED)	21/29 kW
Drehzahlbereich (stufenlos regelbar)	0-5000 min ⁻¹
Verfahrweg X/Z - X2/Z2	270/750 - 205/750 mm
Maximales Drehmoment	250 Nm
Maximaler Drehdurchmesser	430 mm
Maximale Drehlänge	744 mm
Maximale Werkstückgröße mit Gegenspindel	Ø 200x200 mm
Vorschubantriebe Eilganggeschwindigkeit X/Y/Z	24/10/30 m min ⁻¹
Vorschubkraft X/X2	5000 N
Vorschubkraft Z/Z2	8000 N
Werkzeugwechselzeit	0,14 s
Maximaler Druck für Spannmittel (Hydraulik)	60 bar
Versorgungsdruck (Pneumatik)	6 bar
Versorgungsmenge (Pneumatik)	300 l h ⁻¹
Behälterinhalt Kühlmittel	300 l
Kühlmitteldruck	14 bar

Tabelle 4.1.1: Technische Daten der EMCO Hyperturn-655MCPlus, Quelle: Eigene Darstellung.

Kenngröße	Kennwert
Spannungsversorgung	3x400 V/PE
Frequenz	50/60 Hz
Anschlussleistung der Maschine	71 kVA
Hauptspindelantrieb: AC Servoantrieb (100%, 20% ED)	17,5/39 kW
Drehzahlbereich (stufenlos regelbar)	0-18000 min ⁻¹
Verfahrweg X/Y/Z	1000/1100/750 mm
Maximales Drehmoment	230 Nm
NC-Schwenkrundtisch Aufspannfläche	Ø 1150 mm
Maximale Tischbelastung	2000 kg
Vorschubantriebe Eilganggeschwindigkeit X/Y/Z	60/60/55 m min ⁻¹
Vorschubkraft X/Y/Z	16000 N
Span-zu-Spanzeit	7,0 s
Maximaler Druck für Spannmittel (Hydraulik)	120 bar
Behälterinhalt Kühlmittel	1500 l
Kühlmitteldruck (innere Kühlmittelzufuhr)	max. 80 bar
Versorgungsmenge (Kühlmittel)	26 l min ⁻¹
Versorgungsdruck (Pneumatik)	6 bar

Tabelle 4.1.2: Technische Daten der HERMLE C50U, Quelle: Eigene Darstellung.

CNC-Drehzentrum

Kenngröße	Kennwert
Spannungsversorgung	3x380 V/PE
Frequenz	50 Hz
Anschlussleistung der Maschine	42,2 kVA
Hauptspindelantrieb: DC-Nebenschlussmotor (100% ED)	35 kW
Drehzahlbereich (stufenlos regelbar)	25-4000 min ⁻¹
Verfahrweg X/Z	300/1200 mm
Maximales Drehmoment	1000 Nm
Maximaler Drehdurchmesser	380 mm
Vorschubantriebe Eilganggeschwindigkeit X/Y/Z	24/10/30 m min ⁻¹
Vorschubkraft X	8000 N
Vorschubkraft Z	12000 N
Taktzeit Werkzeugwechselsystem 30°	0,6 s
Maximaler Druck für Spannmittel (Hydraulik)	30 bar
Behälterinhalt Kühlmittel	150 l

Tabelle 4.1.3: Technische Daten der WEIPERT WNC 500S, Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Versuchswerkstoffe

Der Einfluss des Werkstoffes im Fertigungsprozess ist in der spanenden Fertigung unbestritten. Dem Streben nach verbesserten Werkstoffeigenschaften steht die Bearbeitbarkeit und oftmals die Zerspanbarkeit der Werkstoffe gegenüber. Der Werkstoffentwicklung folgt die Qualifizierung von Fertigungsprozessen. Als Versuchswerkstoffe dienen im konkreten Fall ein Vergütungsstahl und ein Einsatzstahl jeweils in der Standard Ausführung und mit reduziertem Schwefelgehalt. Der Einfluss des Werkstoffes bei der spanenden Bearbeitung auf den Energiebedarf wird im Rahmen der Versuche untersucht.

Vergütungsstahl 42CrMo4

42CrMo4 ist ein Vergütungsstahl, der sich zum Härten eignet. Der Werkstoff wird im Automobil- und Fahrzeugbau verwendet, da sich die hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Zähigkeit für hochbeanspruchte Bauteile eignet.

Einsatzgebiete: Zahnräder, Kurbelwellen, Achsschenkel, Pleuelstangen, Kaltfließpressteile.

Vergütungsstahl 42CrMo4 mit reduziertem Schwefelgehalt

Der reduzierte Schwefelgehalt wird durch das Elektroschlack-Umschmelzverfahren (ESU) erreicht. Die metallografische Analyse der Werkstoffe wurde von voestalpine Stahl Donawitz durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe ist in Tabelle 4.2.1 dargestellt.

Kurzbezeichnung	chemische Zusammensetzung der Werkstoffe in Prozent								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	O ₂
42CrMo4 (Standard)	0,42	0,27	0,83	0,021	0,033	1,04	0,19	0,05	0,0015
42CrMo4 (ESU)	0,42	0,24	0,84	0,014	0,010	1,05	0,20	0,03	0,0009

Tabelle 4.2.1: Chemische Zusammensetzung 42CrMo4, Quelle: voestalpine Stahl Donawitz.

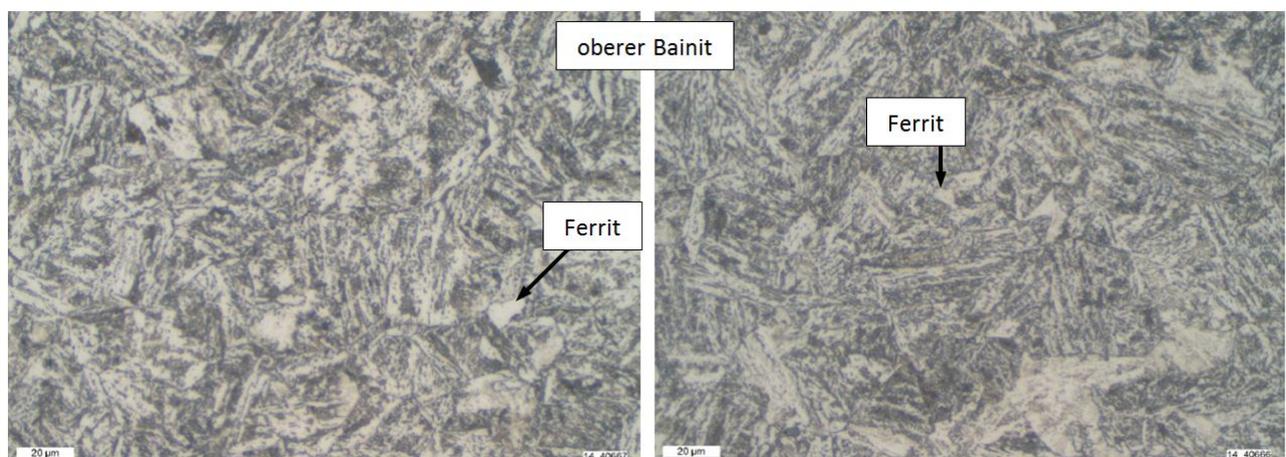


Abbildung 4.2.1: Mikrostruktur 42CrMo4 (Standard) links, 42CrMo4 (ESU) rechts, Quelle: voestalpine Stahl Donawitz.

Als Ätzmittel für die Querschliffe wird 3% Nital verwendet. Durch das Elektroschlacke-Umschmelzen bildet sich ein feineres Gefüge aus. Abbildung 4.2.1 links zeigt die Mikrostruktur des 42CrMo4 (Standard) und Abbildung 4.2.1 rechts zeigt die Mikrostruktur des 42CrMo4 (ESU). Das Gefüge besteht aus oberem Bainit mit Ferritinseleln und rund eingeformtem Zementit. Die Ferritinseleln sind bei der ESU-Variante kleiner ausgebildet.

Einsatzstahl 18CrNi8

18CrNi8 ist ein Chrom-Nickel Einsatzstahl. Er wird für hochbelastete Bauteile im Automobilbau und im allgemeinen Maschinenbau verwendet.

Einsatzgebiet: Einspritzdüsen, Wellen, Bolzen, Getriebeteile.

Einsatzstahl 18CrNi8 mit reduziertem Schwefelgehalt

Der reduzierte Schwefelgehalt wird durch das Elektroschlacke-Umschmelzverfahren (ESU) erreicht. Die metallografische Analyse der Werkstoffe wurde von voestalpine Stahl Donawitz durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe ist in Tabelle 4.2.2 dargestellt.

Kurzbezeichnung	chemische Zusammensetzung der Werkstoffe in Prozent								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	O ₂
18CrNi8 (Standard)	0,18	0,16	0,56	0,017	0,023	1,99	0,01	2,05	0,0014
18CrNi8 (ESU)	0,19	0,15	0,57	0,013	0,009	1,96	0,00	2,01	0,0009

Tabelle 4.2.2: Chemische Zusammensetzung 18CrNi8, Quelle: voestalpine Stahl Donawitz.

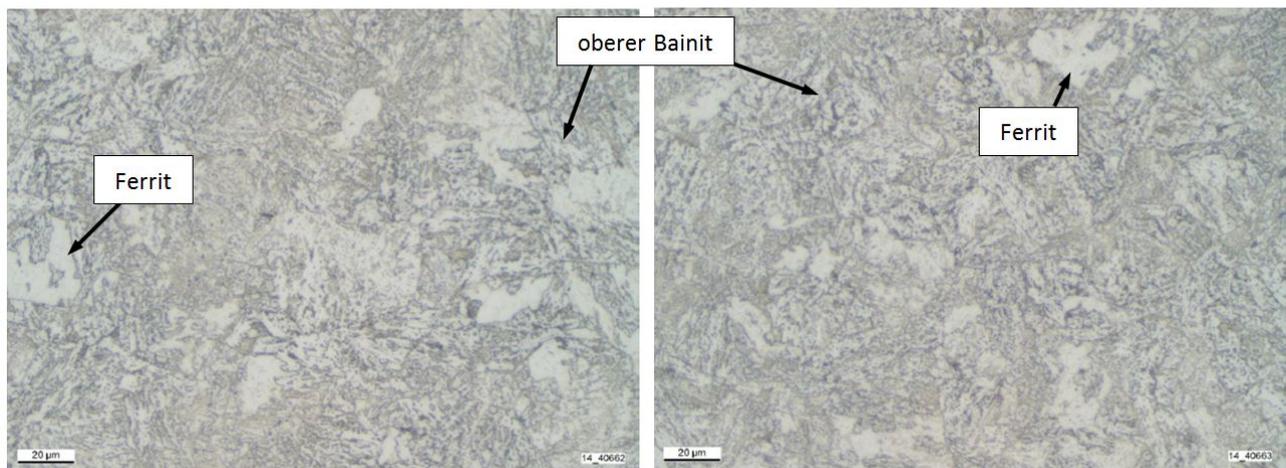


Abbildung 4.2.2: Mikrostruktur 18CrNi8 (Standard) links, 18CrNi8 (ESU) rechts, Quelle: voestalpine Stahl Donawitz.

Als Ätzmittel für die Querschliffe wird 3% Nital verwendet. Durch das Elektroschlacke-Umschmelzen bildet sich ein feineres Gefüge aus. Abbildung 4.2.2 links zeigt die Mikrostruktur des 18CrNi8 (Standard) und Abbildung 4.2.2 rechts zeigt die Mikrostruktur des 18CrNi8 (ESU). Das Gefüge besteht zum größten Teil aus oberem Bainit mit Ferritinseleln.

4.3 Versuchswerkzeuge

Für die Durchführung der Versuchsreihen werden jeweils neue Werkzeuge verwendet. In den folgenden Tabellen werden die technischen Daten der Dreh-, Bohr- und Fräswerkzeuge mit den empfohlenen Bearbeitungsparametern der Hersteller gelistet.

Drehwerkzeuge

Kenngröße	Kennwert
Cerazit Klemmhalter für Wendeschneidplatten DCLNL 2525 M12	
Ausführung	Anstellwinkel 95°
Cerazit Wendeschneidplatte CNMG 120412-M50 CTP115	
Plattengeometrie	M50
Eckenradius	1,2 mm
empfohlene Schnitttiefe a_p	0,5 - 5,0 mm
empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c	150 - 320 m min ⁻¹
empfohlener Vorschub f	0,15 - 0,60 mm pro Umdrehung

Tabelle 4.3.1: Technische Daten der Drehwerkzeuge, Quelle: Eigene Darstellung.

Bohrwerkzeuge

KenngroÙe	Kennwert
Spiralbohrer für Bohrung Testwerkstück - Dormer HSS Spiralbohrer A100	
Durchmesser	Ø 14,5 mm
Bohrerspezifikation	4xD
Anzahl der Schneiden	2
Spitzenwinkel	118°
Zylinderschaft	DIN 338
Einlippenbohrer für Bohrversuche Tiefbohren - TBT Einlippenbohrer	
Kühlmittelzufuhr	innen liegende Kühlkanäle
Durchmesser	Ø 6 mm
Gesamtlänge	220 mm
Bohrerspezifikation	L/D = 36,7
Anzahl der Schneiden	1
Spannelement	16x48 DIN1835 Form A
empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c	70 m min ⁻¹
empfohlene Vorschubgeschwindigkeit v_f	70 mm min ⁻¹
Startlochbohrung für Fräsversuche - Tungaloy Wendeplattenbohrer TDS360W40-3	
Kühlmittelzufuhr	innen liegende Kühlkanäle
Durchmesser	Ø 36 mm
Gesamtlänge	220 mm
Bohrerspezifikation	L/D = 3
Bestückung	Wendeschneidplatten mit Spanformstufe DS
Anzahl der Schneiden	2
empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c	140 m min ⁻¹
empfohlener Vorschub f	13 mm pro Umdrehung

Tabelle 4.3.2: Technische Daten der Bohrwerkzeuge, Quelle: Eigene Darstellung.

Fräswerkzeuge

Kenngröße	Kennwert
Auskammern - Vollhartmetallfräser HPC4000LFH-2000	
Durchmesser	Ø 20 mm
Anzahl der Schneiden	4
empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c	130 m min ⁻¹
empfohlener Vorschub pro Zahn f_z	0,13 mm pro Zahn
Rundplattenfräser - Tungaloy Rundplattenfräser TRC12R050M22.0E05	
Durchmesser	Ø 50 mm
Anzahl der Schneiden	5
Bestückung - Variante 1	runde Wendeschneidplatte
Bestückung - Variante 2	gewellte Wendeschneidplatte
empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c	150 m min ⁻¹
empfohlener Vorschub pro Zahn f_z	0,135 mm pro Zahn
Hochvorschubfräsen - Ingersoll Wendeplattenfräser DP5G050R00	
Durchmesser	Ø 50 mm
Anzahl der Schneiden	5
Bestückung	fünfeckige Wendeschneidplatten
empfohlene Schnittgeschwindigkeit v_c	175 m min ⁻¹
empfohlener Vorschub pro Zahn f_z	0,9 mm pro Zahn

Tabelle 4.3.3: Technische Daten der Fräswerkzeuge, Quelle: Eigene Darstellung.

4.4 Messeinrichtungen

Leistungsmessung

Die Leistungsmessung erfolgt mit einer mobilen Messeinrichtung der Firma Dewetron. Die Messeinrichtung kann zur jeweiligen Werkzeugmaschine transportiert werden, um Leistungsmessungen durchzuführen. In einem DEWE30 Gehäuse sind je sechs Messverstärkerkarten für die Strom- und Spannungsmessung verbaut, um insgesamt zwölf Messsignale aufnehmen zu können. Für die Strommessung werden Niederspannungskarten (HSI-LV - Low-Voltage Messverstärker) und für die Spannungsmessung Hochspannungskarten (HSI-HV - High-Voltage Messverstärker) verwendet. Die Spannungsmessung der Leiter bis maximal 1400 V erfolgt gegen Erde. Die Strommessung für Ströme bis zu 3000 A erfolgt mit Rogowskispulen und für Ströme bis zu 300 A mit Strommesszangen (Abbildung 4.4.1). Die technischen Daten des Leistungsmessgerätes von Dewetron und der verwendeten Strommesszangen und Rogowskispulen sind in Tabelle 4.4.1 zusammengefasst.

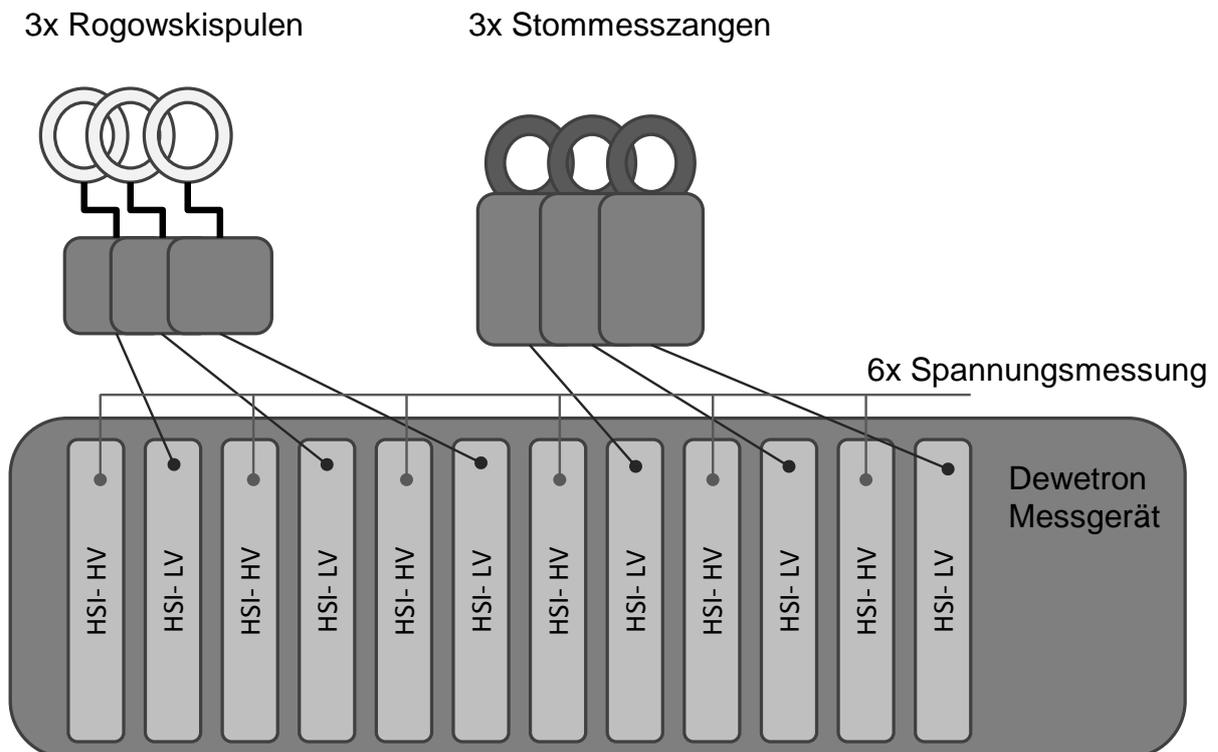


Abbildung 4.4.1: Leistungsmessgerät Dewetron, Quelle: Eigene Darstellung.

Kenngröße	Kennwert
Dewetron DEWE-ORION-1616-1000 A/D Karte	
Auflösung	16 Bit
Genauigkeit	$\pm 0.02\%$ vom Messwert
Maximale Abtastrate/Kanal	1 MSamples/s
Dewetron DEWE-30-16 Gehäuse	
Anzahl der Steckplätze	16
Signalausgang	68-polig Sub-D
Spannungsmessung Modul HSI-HV	
Messbereich	max. $0 - \pm 1400\text{ V}$, min. $0 - \pm 20\text{ V}$
Genauigkeit	$\pm 1\%$ vom Messbereich
Maximale Aufnahme­frequenz	2 MHz
Ausgangsspannung	$0 - \pm 5\text{ V}$
Strommessung Modul HSI-LV	
Messbereich	max. $0 - \pm 50\text{ V}$, min. $0 - \pm 10\text{ mV}$
Genauigkeit	$\pm 1\%$ vom Messbereich
Maximale Aufnahme­frequenz	2 MHz
Ausgangsspannung	$0 - \pm 5\text{ V}$
Strommesszange PNA-CLAMP-150-DC	
Messbereich	0,5-300 A
Genauigkeit	$< \pm 1\%$ vom Messwert
Ausgangsspannung	20 mV/A
Maximale Aufnahme­frequenz	100 kHz
Rogowskispule PNA-A100-300-45	
Messbereich	wählbar 0,5-300 A oder 0,5-3000 A
Genauigkeit	$< 1\%$ vom Messwert
Ausgangsspannung	10 mV/A oder 1 mV/A
Maximale Aufnahme­frequenz	20 kHz

Tabelle 4.4.1: Technische Daten der Dewetron Leistungsmesseinrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.

Drei Strommesszangen (Dewetron PNA-CLAMP-150-DC) und drei Rogowskispulen (Dewetron PNA-A100-300-45) werden zur Messung der Ströme eingesetzt. Strommessungen mit den Strommesszangen und den Rogowskispulen sind möglich, ohne den Stromkreis zu öffnen. Die Zangen und die Spulen können geöffnet werden und sind somit einfach um stromdurchflossene Leiter zu legen.

Für die Erfassung der Ströme wird das sich bildende Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter ausgenutzt. Die Strommesszange enthält einen weichmagnetischen Eisenkreis, der den stromführenden Leiter umfasst. Die Strommesszange (Dewetron PNA-CLAMP-150-DC) zur Gleich- und Wechselstrommessung enthält in einem Luftspalt des Eisenkreises eine Hallsonde, die eine dem zu messenden Strom proportionale Spannung erzeugt, die im HSI-LV Messverstärker in ein $0 - \pm 5\text{ V}$ Signal verstärkt und nachfolgend gewandelt und aufgezeichnet wird.

Abbildung 4.4.2 zeigt schematisch den Aufbau einer Strommesszange bei der Strommessung.

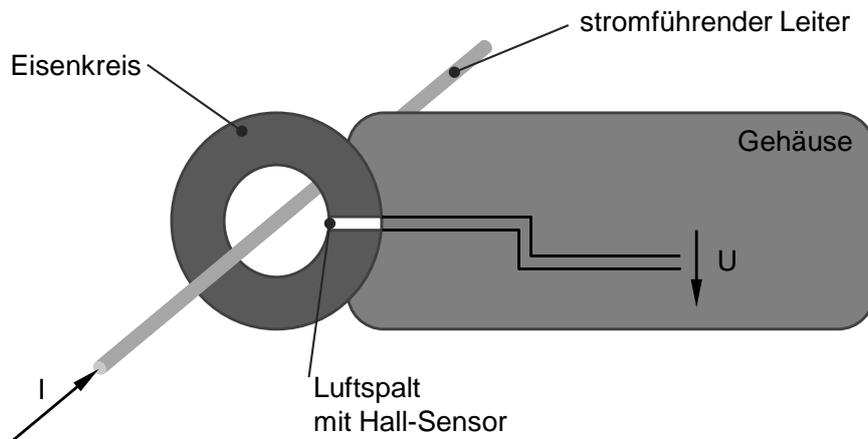


Abbildung 4.4.2: Strommessung mit Strommesszange, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Rogowskispule (Dewetron PNA-A100-300-45) besteht aus einer biegsamen und auftrennbaren Meßschleife, die durch ein geschirmtes Kabel mit einem kleinen Gehäuse verbunden ist, in dem die Meßelektronik untergebracht ist. Die Meßschleife ist aus einem nicht ferromagnetischen Kernmaterial aufgebaut, worauf ein Leiterdraht gleichmäßig aufgewickelt ist. Wird diese Spule um einen stromdurchflossenen Leiter gelegt, so induziert der Strom eine Spannung in der Spule. Diese Spannung wird abgegriffen und im HSI-LV Messverstärker in ein $0 - \pm 5 \text{ V}$ Signal verstärkt und nachfolgend gewandelt und aufgezeichnet. Abbildung 4.4.3 zeigt schematisch den Aufbau einer Rogowskispule bei der Strommessung.

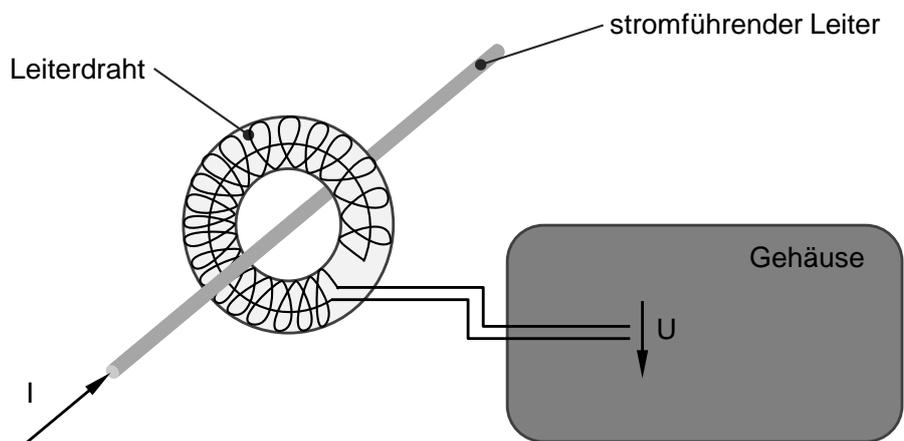


Abbildung 4.4.3: Strommessung mit Rogowskispule, Quelle: Eigene Darstellung.

Die mit der Messeinrichtung gemessenen physikalischen Größen Spannung U und Strom I sind die jeweiligen Momentanwerte für Spannung $u(t)$ und Strom $i(t)$. Für die Leistungsmessung werden zur Strommessung die Messzangen (Strommesszange oder Rogowskispule) um die elektrische Leitung der jeweiligen Phasen gelegt. Die Spannung wird an der jeweiligen Phase direkt abgegriffen.

In Abbildung 4.4.4 ist das Ersatzschaltbild für die Messung eines Antriebs bei den Bohr- und Fräsversuchen dargestellt. Es werden die Ströme I_1, I_2, I_3 , und die Spannungen U_1, U_2, U_3 , gegen Erde nach dem Frequenzumrichter über die Versuchsdauer T aufgenommen. Die Drehversuche werden auf einem Drehzentrum durchgeführt, das von Gleichstrommotoren angetrieben wird. Daher ist je Antrieb nur ein Strom und eine Spannung zu messen.

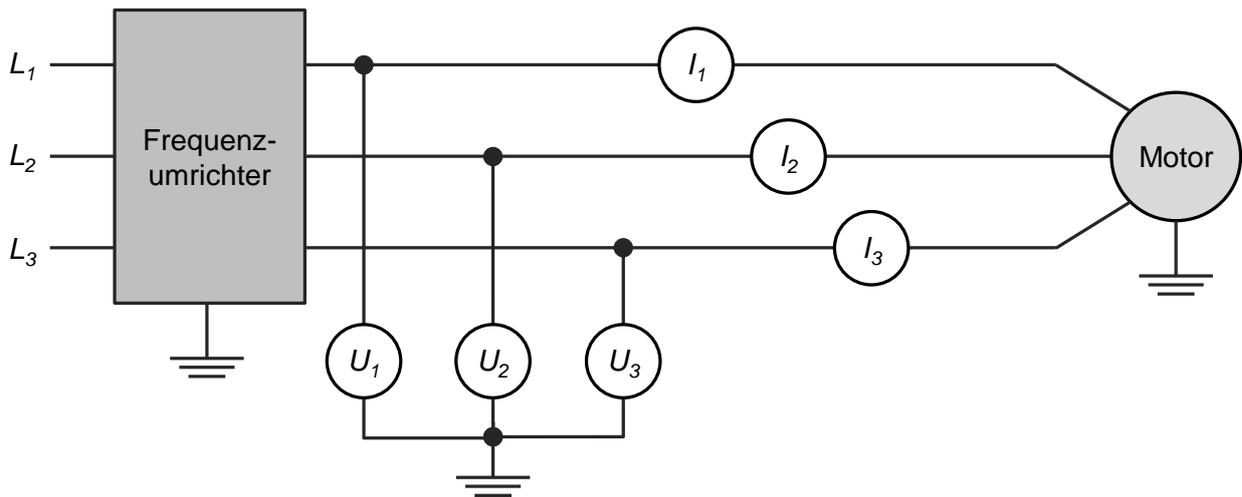


Abbildung 4.4.4: Ersatzschaltbild Messung eines Antriebs, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Anschließen und Entfernen der Messeinrichtung ist nur im abgeschalteten Zustand der Werkzeugmaschinen möglich. Mit der am IFT vorhandenen Messeinrichtung werden sechs Ströme und sechs Spannungen während einer Messung aufgenommen. Somit können bei einer Messung gleichzeitig zwei dreiphasige Verbraucher messtechnisch erfasst werden. Für Messaufgaben mit mehreren Verbrauchern muss die Messung wiederholt werden und zwischen den Versuchen die Anschlüsse der Komponenten bei abgeschalteter Werkzeugmaschine umgelegt werden. Im Rahmen der durchgeführten Dreh-, Fräs- und Bohrversuche wird der Leistungs- und Energiebedarf auf Basis der gemessenen elektrischen Größen $i(t)$ und $u(t)$ ermittelt.

Kraftmessung

Die bei der Bearbeitung wirkenden Kräfte werden mit einem Messsystem der Firma Kistler nach dem piezoelektrischen Prinzip gemessen. Für die Drehversuche wird ein Kistler Dynamometer Typ 9129AA mit einem Kistler Messverstärker Typ 5070A10100 verwendet. Diese Messplattform wird auf einer Adapterplatte im Werkzeugrevolver aufgenommen. Bei den Bohrversuchen wird mit einem Kistler Dynamometer Typ 9123C1011 zusätzlich zu den Kräften in den drei Raumrichtungen das Drehmoment auf der Bohrspindel gemessen. Hierbei wird ein Kistler Messverstärker Typ 5223B2 verwendet. Die technischen Daten sind in Tabelle 4.4.2 aufgelistet.

Kenngröße	Kennwert
Messverstärker Typ 5070A10100	
Anzahl der Messkanäle	4
Spannungsausgang	$\pm 10\text{ V}$
Messverstärker Typ 5223B	
Anzahl der Messkanäle	5
Spannungsausgang	$\pm 10\text{ V}$
Dynamometer Typ 9129AA	
Messbereich $F_{x,y,z}$	$\pm 10\text{ kN}$
Ansprechschwelle $F_{x,y,z}$	$< 0,01\text{ N}$
Linearität	$< \pm 0,3\% \text{ FSO}$
Hysterese	$< \pm 0,3\% \text{ FSO}$
Eigenfrequenz	3,5 kHz
Dynamometer Typ 9123C1011	
Messbereich F_z	$\pm 20\text{ kN}$
Messbereich M_z	$\pm 200\text{ Nm}$
Ansprechschwelle F_z	$< 4\text{ N}$
Ansprechschwelle M_z	0,04 Nm
Linearität	$< \pm 1\% \text{ FSO}$
Hysterese	$< \pm 1\% \text{ FSO}$
Eigenfrequenz	2,0 kHz

Tabelle 4.4.2: Technische Daten der Kistler Kraftmesskomponenten, Quelle: Eigene Darstellung.

An den Kistler Messverstärker wird mit einem 15-poligen Sub-D Stecker ein National Instruments cDAQ-9178 Chassis mit 8 Einschubplätzen angeschlossen. Ein Messmodul National Instruments 9223 wandelt das $\pm 10\text{ V}$ Messsignal in digitale Werte, die per USB-Schnittstelle an die LabView Messdatenerfassung übergeben werden. Tabelle 4.4.3 fasst die technischen Daten der National Instruments Messdatenerfassung zusammen.

Kenngröße	Kennwert
CompactDAQ Chassis cDAQ-9178	
Anzahl der Steckplätze	8
Schnittstelle	USB
A/D Wandler 4-Kanal Messmodul 9223	
Anzahl der analogen Eingangskanäle	4
Eingangsbereich	$\pm 10\text{ V}$
Auflösung	16 Bit
Genauigkeit	$\pm 0,02\% \text{ vom Messwert}$
Maximale Abtastrate/Kanal	1 MSamples/s

Tabelle 4.4.3: Technische Daten der National Instruments Messdatenerfassung, Quelle: Eigene Darstellung.

4.5 Versuchsaufbau

Abbildung 4.5.1 zeigt schematisch den Messaufbau, der bei den Versuchen verwendet wird.

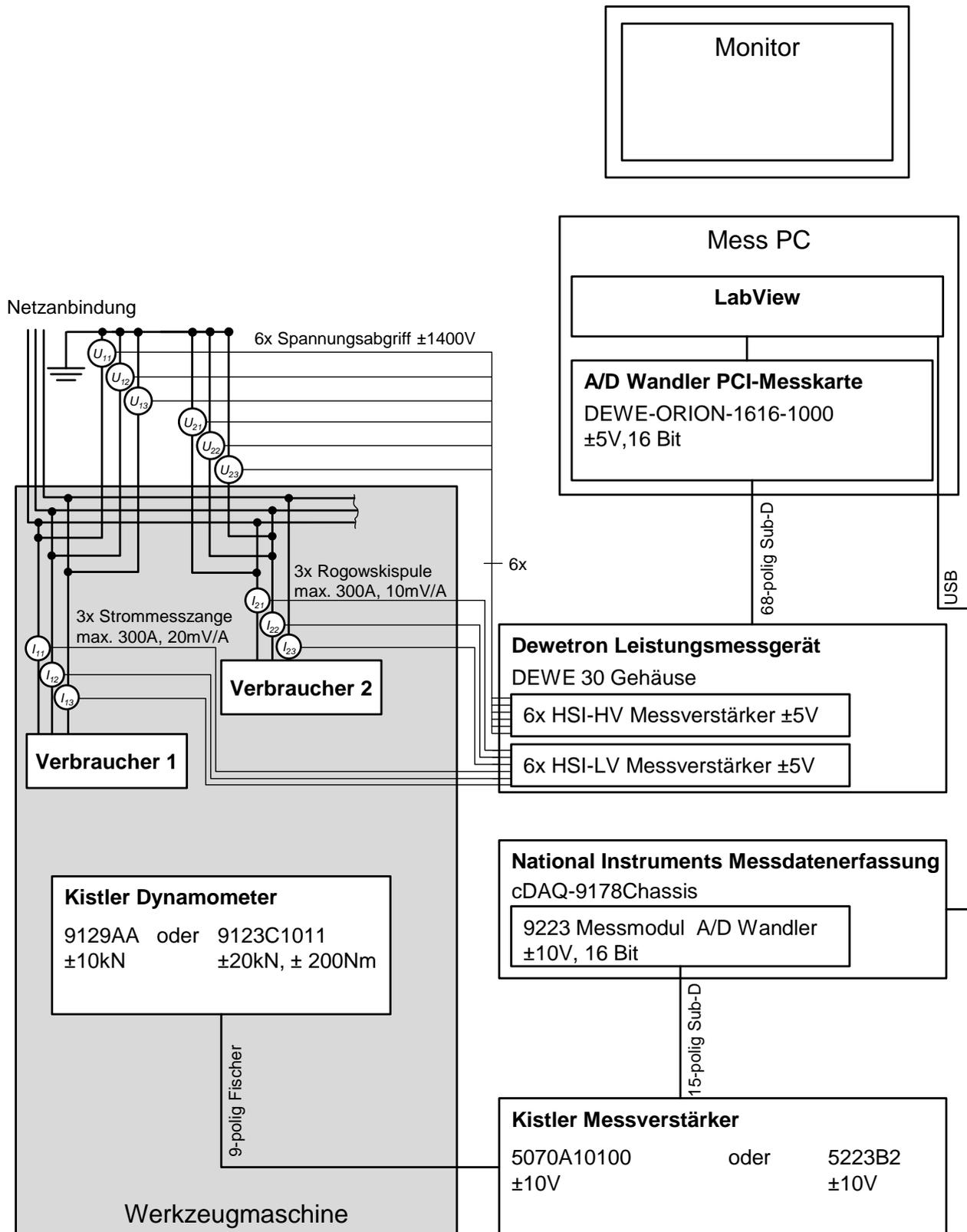


Abbildung 4.5.1: Schematischer Messaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei allen Versuchen werden, an ausgewählten Verbrauchern, die bei der Bearbeitung auftretenden Ströme und Spannungen gemessen. Bei einer Reihe von Versuchen werden auch die bei der Bearbeitung auftretenden Schnittkräfte und bei den Bohrversuchen das auftretende Drehmoment gemessen.

Zur Leistungsmessung werden die elektrischen Ströme und die Spannungen aufgenommen und im Dewetron Leistungsmessgerät in ein +/-5V Analogsignal gewandelt. Dieses Signal wird an die DEWE-ORION-1616-1000 PCI-Karte im Mess PC übertragen und dort analog digital gewandelt (A/D).

Die analogen Messsignale eines Kistler Dynamometers zur Messung der auftretenden Kräfte in den drei Raumrichtungen und des Drehmoments an der Bohrspindel werden in einem Kistler Messverstärker verstärkt und anschließend in einem A/D-Wandler von National Instruments in ein digitales Signal umgewandelt, welches via USB-Schnittstelle an den Mess PC übermittelt wird. In diesem werden sowohl die Signale der Kraft- als auch die der Leistungsmessung mit Hilfe des Programms LabView in ein (.tdms) Messfile geschrieben, welches auf einem NAS (Network Attached Storage) gespeichert wird.

Die Auswertung der Messdaten erfolgt nach der Durchführung der Versuche. Die Datenverarbeitung greift mit der Software Matlab auf das NAS zu. Abbildung 4.5.2 zeigt schematisch die Datenerfassung und Auswertung.

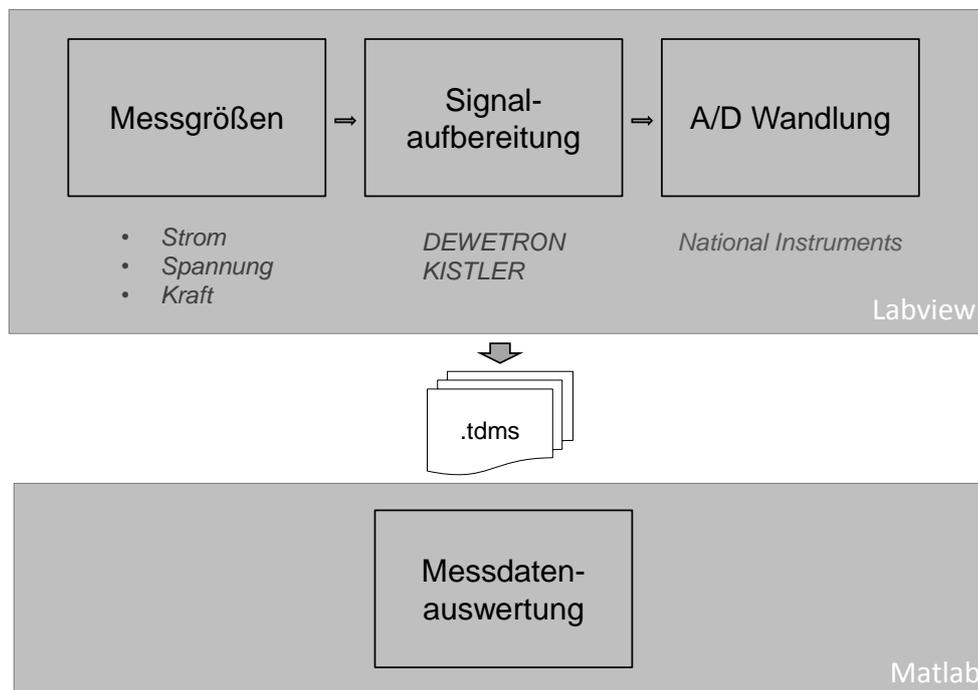


Abbildung 4.5.2: Datenerfassung und Auswertung, Quelle: Eigene Darstellung.

5 Versuchsdurchführung und Auswertung der Ergebnisse

Die Basis für die Erarbeitung von Kenngrößen ist die Datenerfassung an Werkzeugmaschinen in der Produktion. Die Erfassung des Energiebedarfs erfolgt in verschiedenen Versuchsreihen, bei denen zuerst Werkzeugmaschinen mit den dazugehörigen Werkzeugmaschinenkomponenten und dann die Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen und Bohren untersucht werden. Die durchgeführten Versuche sind als Überblick in Tabelle 5.0.1 dargestellt.

Verfahren	Werkzeugmaschine	Einflussfaktor
Drehen/Bohren	Bearbeitungszentrum EMCO Hyperturn-655MCPlus	Werkzeugmaschine
Drehen	Drehzentrum WEIPERT WNC 500S	Werkzeugmaschine
Drehen	Bearbeitungszentrum EMCO Hyperturn-655MCPlus	Werkzeugmaschine
Fräsen	Bearbeitungszentrum HERMLE C50 U	Werkzeug/Prozessstrategie
Drehen	Drehzentrum WEIPERT WNC 500S	Werkstoff/Prozessparameter
Bohren	Bearbeitungszentrum HERMLE C50 U	Werkstoff/Werkzeugverschleiß

Tabelle 5.0.1: Versuchsübersicht, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Analyse des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen wird an Hand der Verfahren Drehen und Bohren mit Hilfe eines Testwerkstücks in Kapitel 5.1 durchgeführt. In Kapitel 5.2 ist die Analyse der Fertigungsprozesse beschrieben. Beim Fräsen werden verschiedene Werkzeuge und Prozessstrategien eingesetzt und untersucht. Beim Drehen und Bohren wird der Werkstoffeinfluss im Fertigungsprozess untersucht. Betrachtet werden die Prozessparameter beim Drehen und der Werkzeugverschleiß beim Bohren. Abbildung 5.0.1 stellt den Versuchsplan als Übersicht dar.

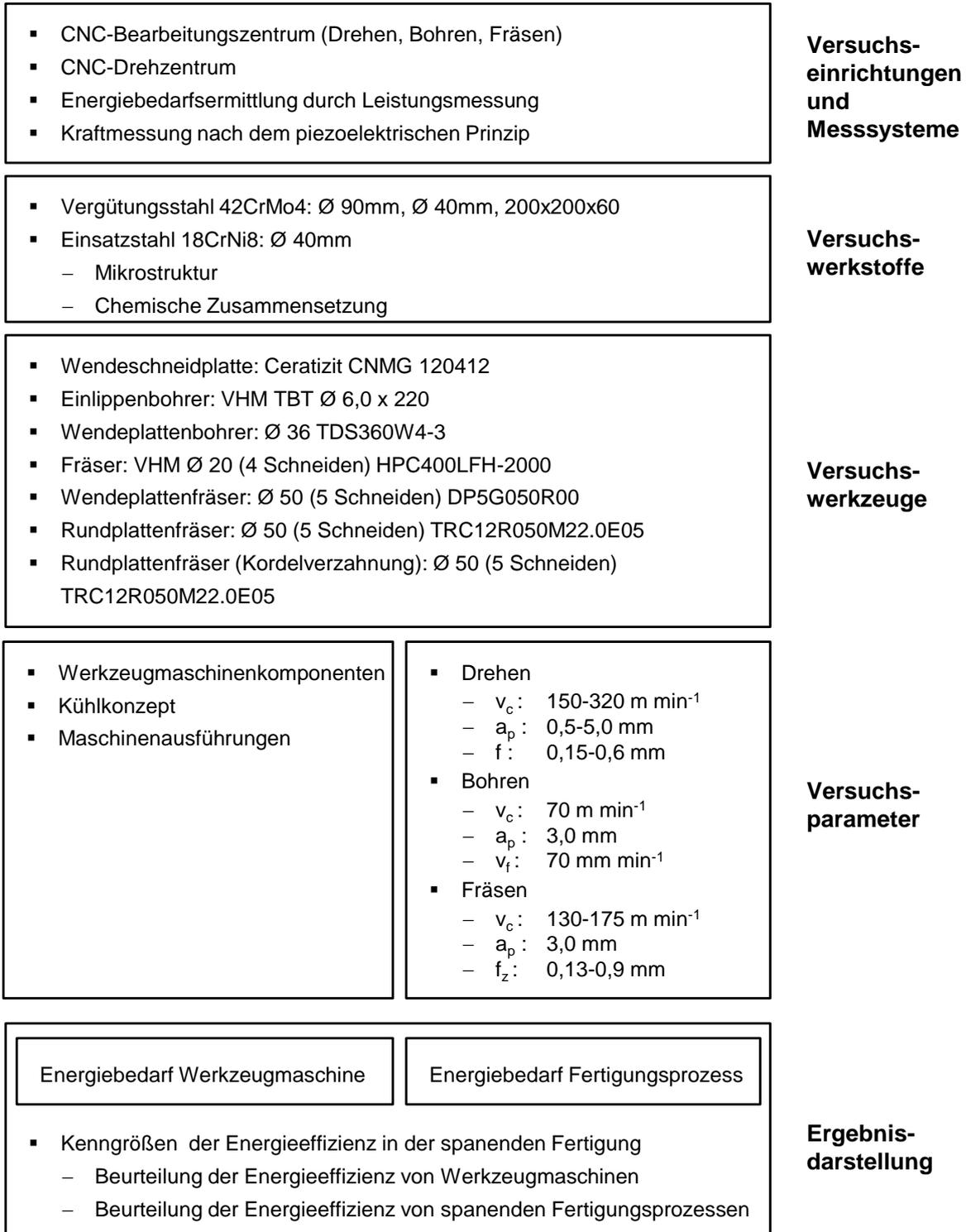


Abbildung 5.0.1: Versuchsplan, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1 Analyse des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen

Am Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Graz stehen Werkzeugmaschinen zur Fertigung von Prototypen und Kleinserien zur Verfügung. Um Informationen über den Energiebedarf der Komponenten einer Werkzeugmaschine zu erhalten, wird das CNC-Bearbeitungszentrum EMCO Hyperturn-655MCPlus untersucht. Es werden jene Komponenten vermessen, die zur Bearbeitung des Testwerkstücks eingesetzt werden. Mit den am Institut vorhandenen Messmitteln können bei jeder durchgeführten Messung die Ströme und Spannungen von je zwei Komponenten aufgenommen werden. Für folgende Komponenten werden Messungen durchgeführt:

- Hauptspindel;
- Frässpindel;
- Hydraulik;
- B-Achse;
- Werkzeugmagazin;
- Werkzeugwechsler;
- Kühlmittelpumpe des Werkzeugwechslers;
- Kühlmittelpumpe der Frässpindel;
- Kühlaggregat;
- X1-Achse;
- Z1-Achse;
- X2-Achse;
- Z2-Achse.

5.1.1 Testwerkstück

Zur Untersuchung der am Institut für Fertigungstechnik vorhandenen Drehbearbeitungszentren wurde ein Testwerkstück mit einfacher Geometrie entwickelt. In acht Bearbeitungsschritten wird ein Rohling aus dem Werkstoff 42CrMo4 von Durchmesser 90 mm auf Durchmesser 40 mm gedreht. Nach der Drehbearbeitung wird eine Bohrung mit Durchmesser 14,5 mm eingebracht, um eine Nebenachse der Werkzeugmaschine in die Bearbeitung mit einzubeziehen. Abbildung 5.1.1 zeigt das Testwerkstück oben vor und unten nach der Dreh- und Bohrbearbeitung.

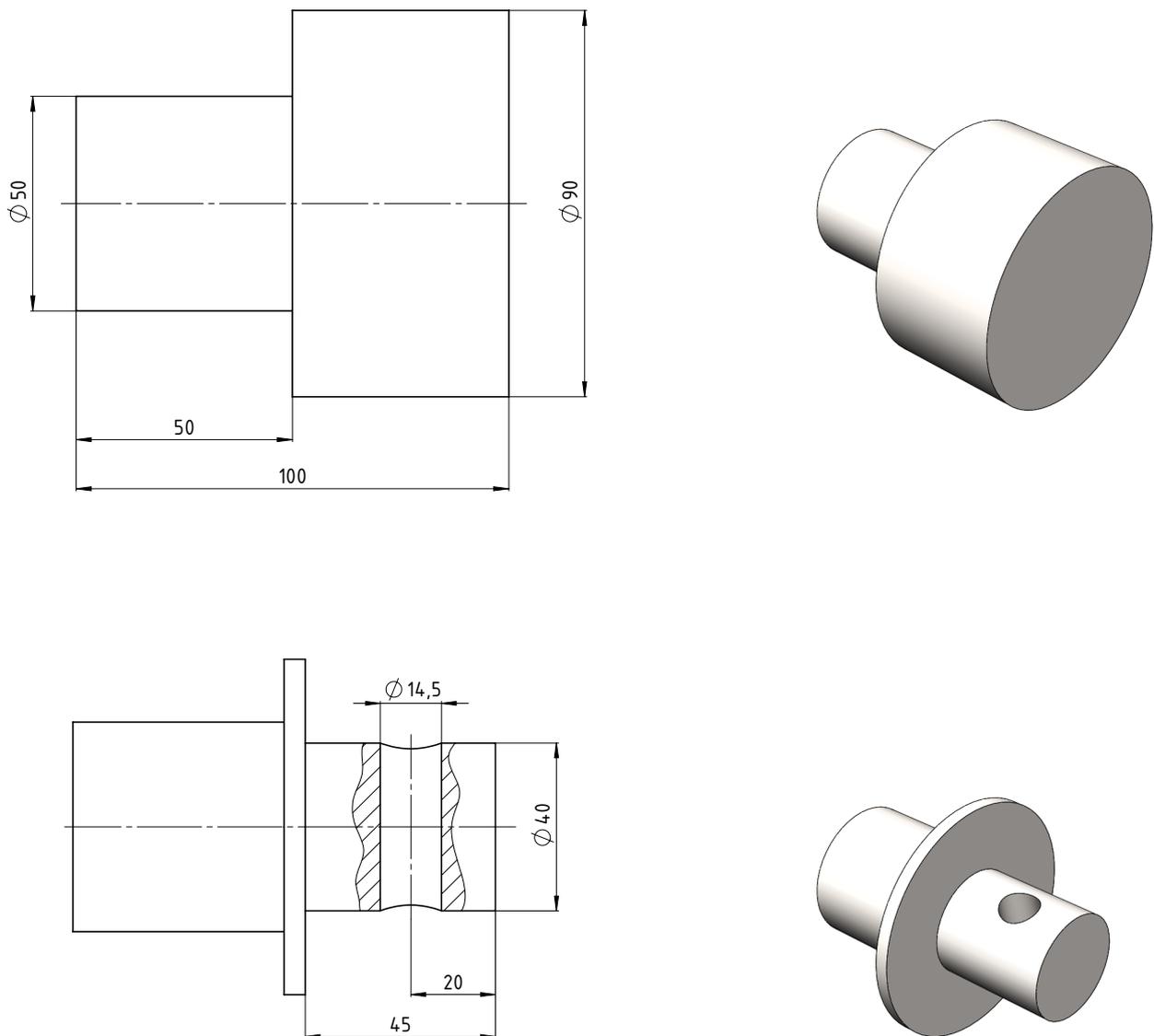


Abbildung 5.1.1: Testwerkstück, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Prozessablauf bei der Bearbeitung des Testwerkstücks ist folgender:

- Werkstück ist eingespannt;
- Werkzeugrevolver auf Z-Achse ist in Ausgangsposition;
- Werkzeugrevolver positioniert sich für Bearbeitungsbeginn;
- Spindel startet und beschleunigt auf Schnittparameter des jeweiligen Bearbeitungsschritts;
- Kühlmittel Werkzeugrevolver ein;
- Plandrehen;
- Längsdrehen 1.-8. Stufe;
- Spindel stoppt;
- Kühlmittel Werkzeugrevolver aus;
- Werkzeugrevolver auf Z-Achse fährt im Eilgang auf Ausgangsposition;
- Werkzeugwechsel Zentrierbohrer;
- Frässpindel positioniert sich für Bearbeitungsbeginn;
- Kühlmittel Frässpindel ein;
- Zentrierbohrung;
- Kühlmittel Frässpindel aus;
- Werkzeugwechsel Spiralbohrer $\varnothing 14,5$ mm;
- Frässpindel positioniert sich für Bearbeitungsbeginn;
- Kühlmittel Frässpindel ein;
- Bohrbearbeitung mit $v_c 15 \text{ m min}^{-1}$ und $v_f 33 \text{ mm min}^{-1}$;
- Kühlmittel Frässpindel aus;
- Frässpindel fährt zurück auf Werkzeugwechselposition.

Die Zerspanungsparameter der einzelnen Bearbeitungsstufen beim Längsdrehen des Testwerkstücks sind in Tabelle 5.1.1 dargestellt. Charakteristisch für den Drehprozess sind die Parameter Schnitttiefe a_p für die radiale Zustellung des Drehmeißels in das Werkstück, Vorschub f für die Bewegung des Drehmeißels pro Umdrehung in Längsrichtung und Schnittgeschwindigkeit v_c für die Geschwindigkeit, mit der der Drehmeißel durch den zu bearbeitenden Werkstoff geführt wird. Bei der Bearbeitung des Testwerkstücks wird die Schnittgeschwindigkeit konstant bei 150 m min^{-1} und der Vorschub konstant bei $0,3 \text{ mm pro Umdrehung}$ gehalten. Das Zeitspanvolumen \dot{V} errechnet sich beim Außenlängsdrehen gemäß Gleichung 5.1.1.

Zeitspanvolumen \dot{V} :

$$\dot{V} = A \cdot v_c \quad (5.1.1)$$

Der Spanungsquerschnitt A für 5.1.1 berechnet sich mit Gleichung 5.1.2.

Spanungsquerschnitt A :

$$A = f \cdot a_p \quad (5.1.2)$$

Stufe	Schnitttiefe a_p in mm	Vorschub f in mm	Schnittgeschwindigkeit v_c in m min ⁻¹	Zeitspanvolumen \dot{V} in mm ³ s ⁻¹
1.	5	0,3	150	3750
2.	5	0,3	150	3750
3.	4,5	0,3	150	3375
4.	4	0,3	150	3000
5.	3	0,3	150	2250
6.	2	0,3	150	1500
7.	1	0,3	150	750
8.	0,5	0,3	150	375

Tabelle 5.1.1: Zerspanungsparameter Drehbearbeitung Testwerkstück, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der ersten Bearbeitungsstufe wird die Walzhaut abgedreht, wodurch deutliche Schwingungen während der Bearbeitung auftreten. Die zweite Bearbeitungsstufe hat die gleichen Zerspanungsparameter wie die erste Stufe, um eine Messung ohne Walzhauteneinflüsse zu erhalten. Die weiteren Bearbeitungsstufen (3.-8. Stufe) werden mit von Stufe zu Stufe abnehmender Schnitttiefe bei gleichem Vorschub und gleicher Schnittgeschwindigkeit durchgeführt.

Für die Bohrung im Testwerkstück wird ein Spiralbohrer mit zwei Schneiden verwendet. Das Zeitspanvolumen \dot{V} beim Vollbohren berechnet sich gemäß Gleichung 5.1.3.

Zeitspanvolumen \dot{V} :

$$\dot{V} = A \cdot v_f \quad (5.1.3)$$

Der Spanungsquerschnitt A in Gleichung 5.1.3 berechnet sich mit Gleichung 5.1.4.

Spanungsquerschnitt A :

$$A = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi \cdot d_{Bohrer}^2}{4} \quad (5.1.4)$$

Die Zerspanungsparameter der Bohrbearbeitung sind in Tabelle 5.1.2 dargestellt.

Parameter	Wert
Schnittgeschwindigkeit v_c	15 m min ⁻¹
Vorschubgeschwindigkeit v_f	33 mm min ⁻¹
Bohrerdurchmesser d_{Bohrer}	14,5 mm
Zeitspanvolumen \dot{V}	90,8 mm ³ s ⁻¹

Tabelle 5.1.2: Zerspanungsparameter Bohrbearbeitung Testwerkstück, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.2 Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine und deren Komponenten

Mit dem in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Testwerkstück und mit den definierten Prozessparametern werden Leistungsmessungen durchgeführt und ausgewertet. Abbildung 5.1.2 zeigt den Leistungsverlauf des Bearbeitungszentrums EMCO Hyperturn-665MCPlus während der Bearbeitung des Testwerkstücks.

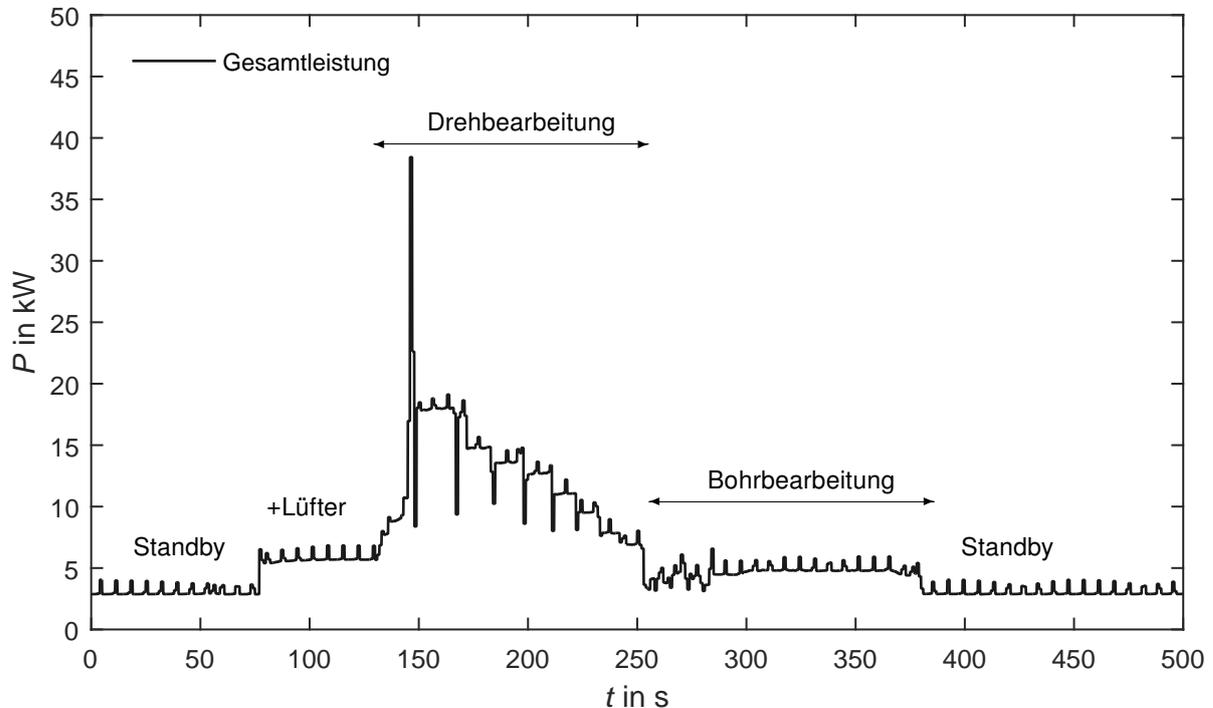


Abbildung 5.1.2: Gesamtleistungsaufnahme EMCO Hyperturn Bearbeitung Testwerkstück, Quelle: Eigene Darstellung.

Zu Beginn wird die Maschine in den Operational-Mode versetzt. Hier werden die über die Werkzeugmaschine gesteuerten Komponenten, wie Spindeln, Vorschubantriebe und Pumpen, mit Energie versorgt. Ersichtlich ist die Standby-Leistung von zirka 3 kW und die gleichmäßigen, periodischen Schwankungen, die von der Hydraulik eingebracht werden. Die Hydraulik versorgt das Backenfutter und die hydrostatischen Lager der Spindel. Der nächste Anstieg des Leistungsbedarfs ist auf das Einschalten des Lüfters des Kühlaggregates zurückzuführen. Hierbei wird die Prozesswärme mit dem Kühlschmierstoff über einen Wärmetauscher abtransportiert. Bei zugeschaltetem Lüfter steigt die Leistungsaufnahme auf 5,5 kW.

Beim Starten des Bearbeitungsprogrammes wird die Stirnseite des Testwerkstücks mit konstanter Schnittgeschwindigkeit plangedreht. Sowohl beim Plandrehen als auch beim nachfolgenden Längsdrehen wird mit einer Wasser-Öl Emulsion als Kühlschmierstoff (KSS) gekühlt. Das Plandrehen ist mit einer Leistungsspitze von 38,5 kW zu erkennen, die durch das Beschleunigen der Hauptspindel zu erklären ist. Im Weiteren ist zu erkennen, dass der Leistungsbedarf stufenartig abnimmt. Hier werden die zuvor beschriebenen acht Stufen mit verschiedenen Zeitspanvolumina längsgedreht.

Im weiteren Verlauf wird ein Zentrierbohrer eingewechselt, um die Bohrung in der Welle zu zentrieren. Beim folgenden Werkzeugwechsel wird ein Spiralbohrer mit Durchmesser 14,5 mm eingewechselt. Durch den gewählten Bohrvorschub von 0,1 mm pro Umdrehung ergibt sich während der Bohrdauer ein kon-

stanter Leistungsbedarf überlagert von den periodischen Schwankungen verursacht durch die Hydraulik. Auch der Bohrvorgang wird mit KSS gekühlt, um die Späneabfuhr zu unterstützen und die Bearbeitung zu kühlen. Am Ende des Bearbeitungsprogrammes wird die Frässpindel mit dem eingespannten Bohrer in die Ausgangsposition verfahren und der Leistungsbedarf der Maschine entspricht der anfänglichen Grundlast (Standby).

In Tabelle 5.1.3 sind die im Rahmen der Versuche berechneten Werte der einzelnen Stufen dargestellt. Aus den aufgezeichneten Strömen und Spannungen wird die Wirkleistung berechnet und durch Integration über die Dauer der einzelnen Prozessstufen erhält man den gesamt Energiebedarf E_{gesamt} für jede Stufe beim Längsdrehen. Der Energiebedarf sinkt erwartungsgemäß mit abnehmendem Zeitspanvolumen \dot{V} .

Stufe	Schnitttiefe a_p in mm	Zeitspanvolumen \dot{V} in $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$	Volumen V in mm^3	Energiebedarf E_{gesamt} in kJ
1.	5	3750	60083	262,8
2.	5	3750	53014	230,4
3.	4,5	3375	41669	187,2
4.	4	3000	32233	151,2
5.	3	2250	21206	118,8
6.	2	1500	12723	97,2
7.	1	750	5938	79,2
8.	0,5	375	2863	61,2

Tabelle 5.1.3: Energiebedarf Drehbearbeitung Testwerkstück EMCO Hyperturn, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Untersuchung der Maschinenkomponenten wird die Bearbeitung wiederholt durchgeführt und ein Zeitfenster von 360 Sekunden betrachtet. Das Zeitfenster wird an Hand der Leistungsspitze beim Beschleunigen der Hauptspindel positioniert. Betrachtet werden 60 Sekunden zuvor und 300 Sekunden danach. Abbildung 5.1.3 zeigt das Zeitfenster und neben dem Gesamtleistungsverlauf den Leistungsverlauf der Hauptspindel. Die Hauptspindel muss bei der Bearbeitung der acht Stufen die Zerspanungsleistung aufbringen und innere Verlustleistungen überwinden. Die Leistungsspitze entsteht beim Plandrehen des Testwerkstücks, da die Hauptspindel beschleunigt werden muss, um die Schnittgeschwindigkeit konstant zu halten.

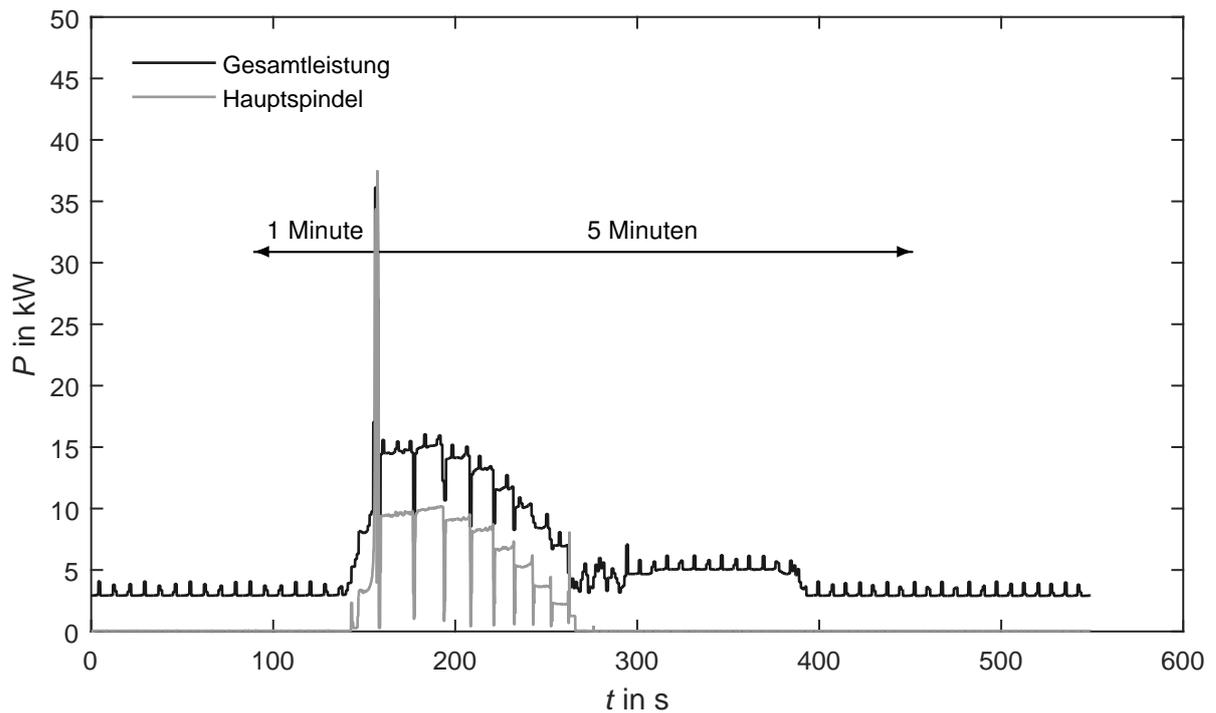


Abbildung 5.1.3: Leistungsverlauf Gesamtleistung und Hauptspindel EMCO Hyperturn, Quelle: Eigene Darstellung.

Insgesamt wurden Messungen an dreizehn Maschinenkomponenten durchgeführt. Zwei ausgewertete Messungen zeigen die folgenden Abbildungen 5.1.4 und 5.1.5. Zwischen den Bearbeitungen muss die Maschine ausgeschaltet werden, um die Stromzangen, die Rogowskispulen und den Spannungsabgriff an den jeweiligen Komponenten im Schaltschrank anzuschließen.

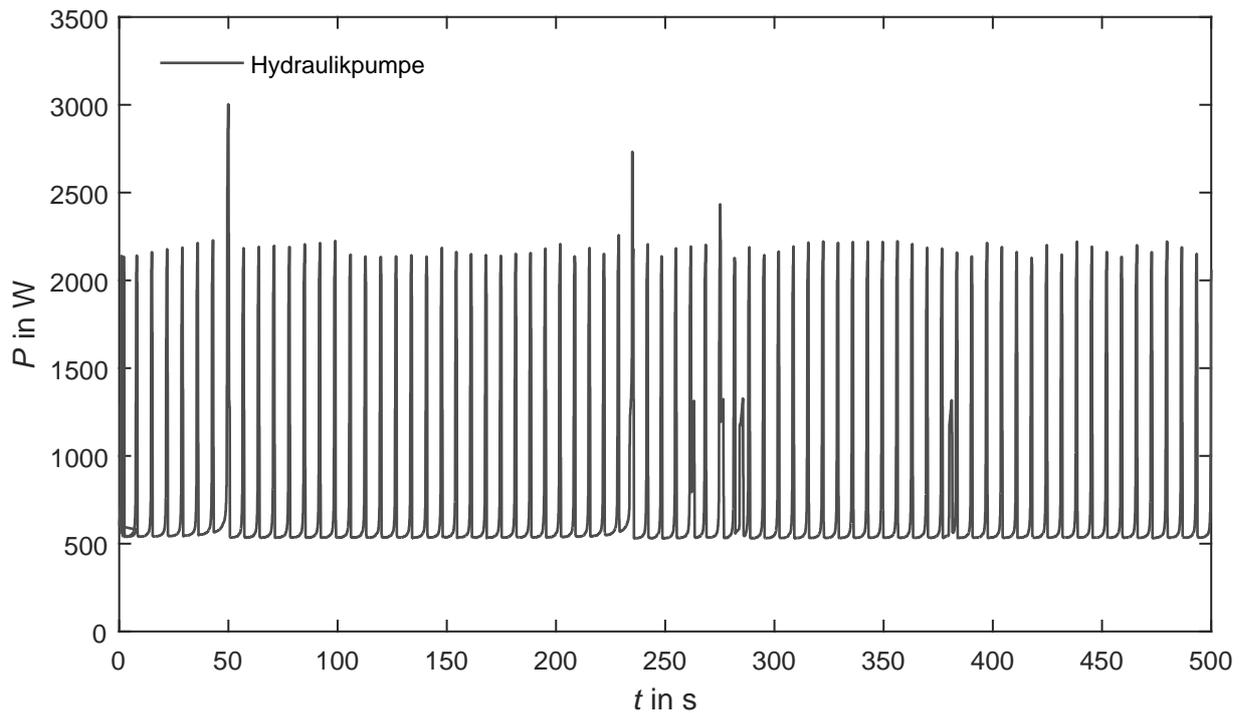


Abbildung 5.1.4: Leistungsaufnahme Hydraulikpumpe EMCO Hyperturn, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.1.4 zeigt die Leistungsaufnahme der Hydraulikpumpe. Die Hydraulikpumpe stellt einen konstanten Druck zur Versorgung hydrostatischer Lager, zum Betätigen der Werkzeugverriegelung und zur Betätigung des Backenfutters zur Verfügung. Die Hydraulikpumpe hat einen periodisch schwankenden Leistungsverlauf. Die durchschnittlichen Leistungsspitzen liegen bei 2,2 kW, entsprechend der angegebenen Nennleistung der Pumpe von 2,2 kW. Durch die Hydraulikpumpe wird ein Druck von 60 bar im Druckspeicher aufgebaut. Sobald dieser Druck im Bearbeitungszentrum verwendet wird, schaltet sich die Pumpe wieder an. Die Pumpe ist im gesamten betrachteten Zeitfenster aktiv.

Die periodisch schwankende Leistungsaufnahme der Hydraulikpumpe ist auch im Gesamtleistungsverlauf zu erkennen (Abbildung 5.1.3). Das Einschalten der Hydraulikpumpe alle sieben Sekunden lässt auf einen zu schnellen Druckabfall im System schließen. Nach den Versuchen wurde der Spannzylinder untersucht und eine beschädigte Dichtung entdeckt. Nach dem Einbau einer neuen Dichtung bleibt der Versorgungsdruck länger erhalten und die Hydraulikpumpe schaltet sich in größeren Abständen an.

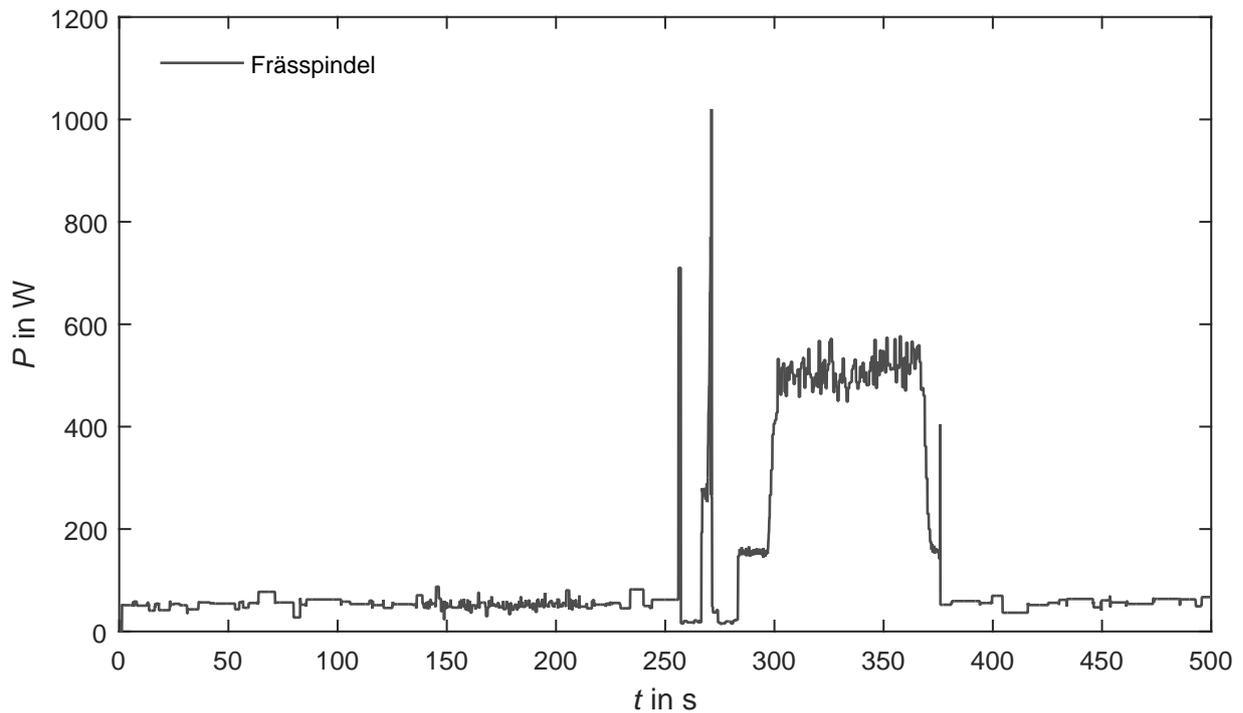


Abbildung 5.1.5: Leistungsaufnahme Frässpindel EMCO Hyperturn, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.1.5 zeigt die Leistungsaufnahme der Frässpindel. Die Frässpindel wird bei der Bearbeitung des Testwerkstücks für das Zentrierbohren und für die Bohrung $\varnothing 14,5$ mm verwendet. Die Leistungsaufnahme der Frässpindel ist im Vergleich zur Gesamtleistungsaufnahme deutlich geringer.

An Hand der Messungen ergibt sich eine Aufteilung der Leistungsaufnahme auf die untersuchten Maschinenkomponenten. Die Messdaten werden ausgewertet und der Energiebedarf der Komponente $E_{Komponente}$ für die Bearbeitung des Testwerkstücks berechnet. In Tabelle 5.1.4 sind alle Verbraucher aufgelistet, die vermessen wurden. Dort ist der prozentual und absolute Energiebedarf der Komponenten für die Bearbeitung des Testwerkstücks aufgezeigt. Der größte Verbraucher ist mit einem Anteil von 30,1% die Hauptspindel. Viele Komponenten haben nur einen geringen Energiebedarf, da sie bei dieser Bearbeitung nur kurz im Einsatz sind.

Komponente	prozentualer Energiebedarf $E_{Komponente}$ in %	absoluter Energiebedarf $E_{Komponente}$ in kJ
Hauptspindel	30,1	759,6
Hydraulikpumpe	10,4	262,8
Z2-Achse	1,4	36,6
X2-Achse	2,0	50,4
Z1-Achse (Frässpindel)	1,7	43,2
X1-Achse (Frässpindel)	2,3	57,6
1. Kühlmittelpumpe (Frässpindel)	5,7	144,0
2. Kühlmittelpumpe (Werkzeugwender)	6,6	165,6
Werkzeugmagazin	0,4	10,8
B-Achse	0,3	7,2
Frässpindel	0,6	14,4
Werkzeugwechsler	0,7	18,0
Kühlaggregat	7,4	187,2
sonstige Komponenten	30,5	770,4
Summe	100	2527,2

Tabelle 5.1.4: Energiebedarf der Maschinenkomponenten EMCO Hyperturn, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 5.1.6 ist in einem Tortendiagramm der Energiebedarf der untersuchten Maschinenkomponenten aufgezeigt.

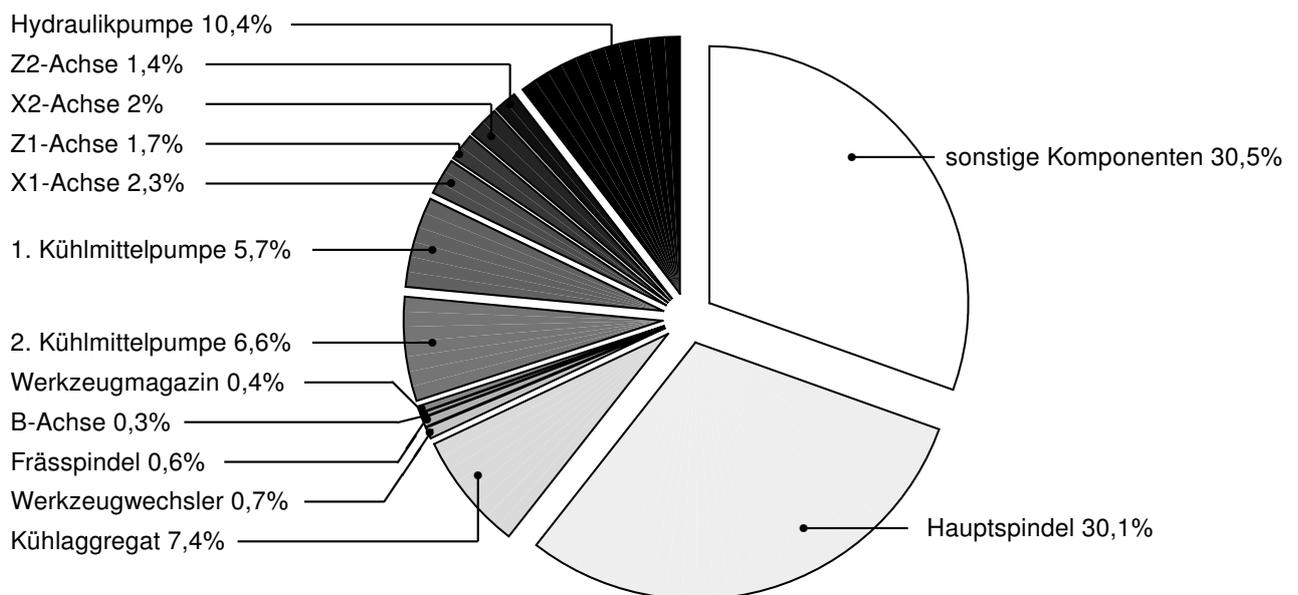


Abbildung 5.1.6: Energiebedarf der Maschinenkomponenten EMCO Hyperturn, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.3 Vergleich von Werkzeugmaschinen

An Hand des Testwerkstücks werden zwei Werkzeugmaschinen des Institutes für Fertigungstechnik beim Drehen der acht Stufen miteinander verglichen. Zur Verfügung steht das CNC-Bearbeitungszentrum EMCO Hyperturn-655MCPlus und das CNC-Drehzentrum WEIPERT WNC 500S. Für die Betrachtung der beiden Werkzeugmaschinen müssen vergleichbare Voraussetzungen geschaffen werden. Dazu wird ein am Institut entwickeltes Testwerkstück (siehe Kapitel 5.1.1) verwendet. Da das CNC-Drehzentrum WEIPERT WNC 500S nicht über eine angetriebene Nebenachse verfügt, kann nur die Drehbearbeitung durchgeführt und auf den beiden Werkzeugmaschinen verglichen werden. Das Zeitfenster verringert sich dadurch auf 200 Sekunden.

Es werden sowohl die Gesamt- als auch die Hauptspindelleistung gemessen. Abbildung 5.1.7 zeigt den Vergleich des Gesamtleistungsverlaufs beider Werkzeugmaschinen. Das Leistungslevel im StandBy Betrieb liegt mit 2 kW bei der WEIPERT WNC deutlich unter dem Standby Leistungslevel der EMCO Hyperturn, das bei 3 kW liegt. Die Leistungsspitzen sind bei der WEIPERT WNC stärker ausgeprägt, als bei der EMCO Hyperturn.

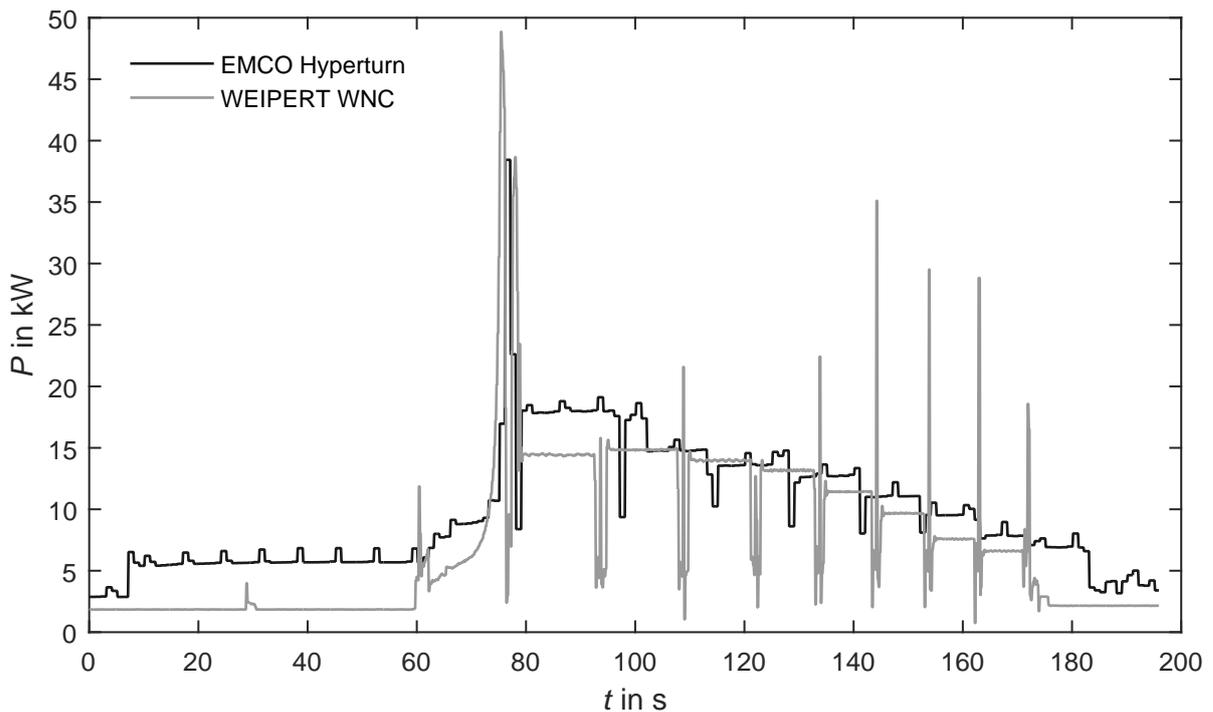


Abbildung 5.1.7: Gesamtleistungsverlauf Werkzeugmaschinenvergleich, Quelle: Eigene Darstellung.

Stufe	Schnitttiefe a_p in mm	Energiebedarf EMCO E_{EMCO} in kJ	Energiebedarf WEIPERT $E_{WEIPERT}$ in kJ
1.	5	262,8	194,4
2.	5	230,4	190,8
3.	4,5	187,2	158,4
4.	4	151,2	126,0
5.	3	118,8	97,2
6.	2	97,2	75,6
7.	1	79,2	57,6
8.	0,5	61,2	50,4

Tabelle 5.1.5: Energiebedarf Werkzeugmaschinenvergleich, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.1.5 zeigt den benötigten Energiebedarf der jeweiligen Werkzeugmaschinen für die Bearbeitung der acht Stufen des Testwerkstücks. In Abbildung 5.1.8 ist der jeweilige Energiebedarf bezogen auf das Zeitspanvolumen \dot{V} dargestellt. Der erhöhte Energiebedarf bei der Bearbeitung der 1. Stufe (Abdrehen der Walzhaut) ist bei beiden Werkzeugmaschinen ersichtlich.

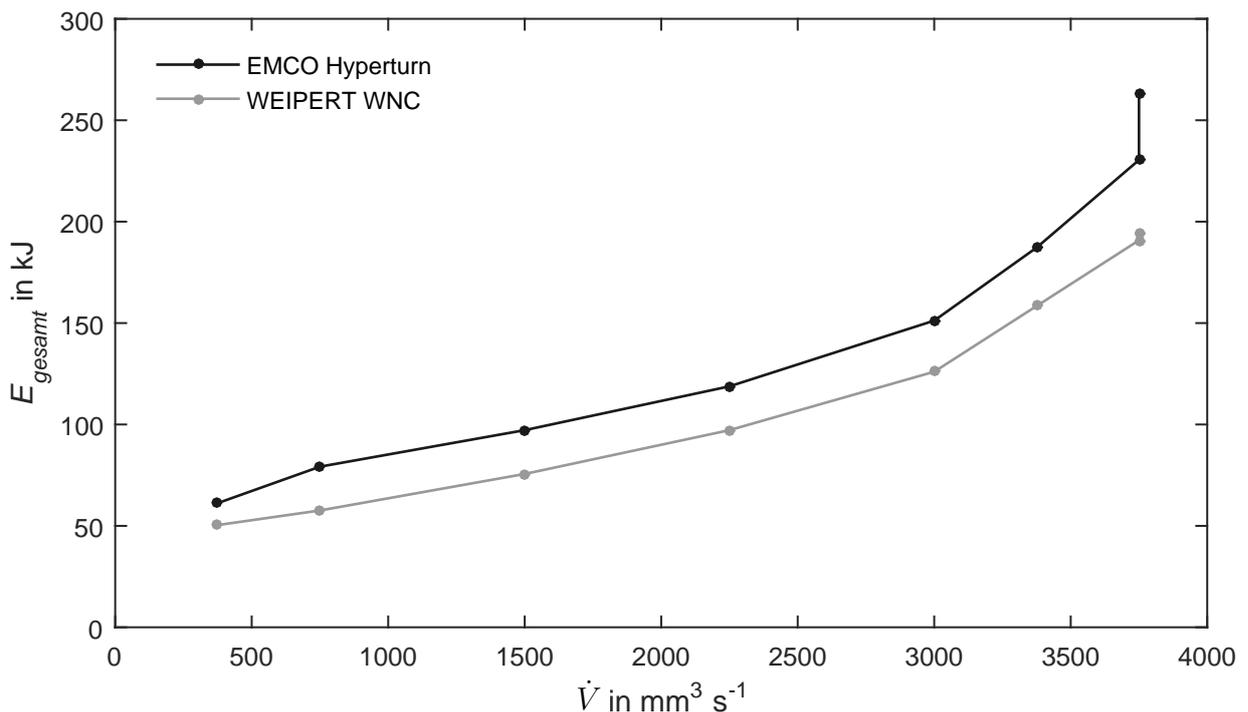


Abbildung 5.1.8: Werkzeugmaschinenvergleich - Energiebedarf bezogen auf das Zeitspanvolumen, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2 Analyse des Energiebedarfs spanender Fertigungsprozesse

Zur Analyse des Energiebedarfs werden Fertigungsprozesse der Fertigungsverfahren Drehen, Bohren und Fräsen betrachtet. Je nach Ausprägung des Fertigungsprozesses, durch die verwendeten System- und Stellgrößen, ändert sich der Energiebedarf. Der Energiebedarf der Antriebe, Maschinenkomponenten und der Prozesskühlung wird für die Herstellung des Endproduktes benötigt und es entstehen zudem Späne und Wärme (Abbildung 5.2.1).

In den folgenden Versuchsreihen wird der Einfluss der Prozessstrategie beim Fräsen (Kapitel 5.2.1) und der Einfluss der Prozessparameter bei der Untersuchung neuer Werkstoffe beim Drehen (Kapitel 5.2.2) und die Werkzeugstandzeit beim Bohren (Kapitel 5.2.3) analysiert.

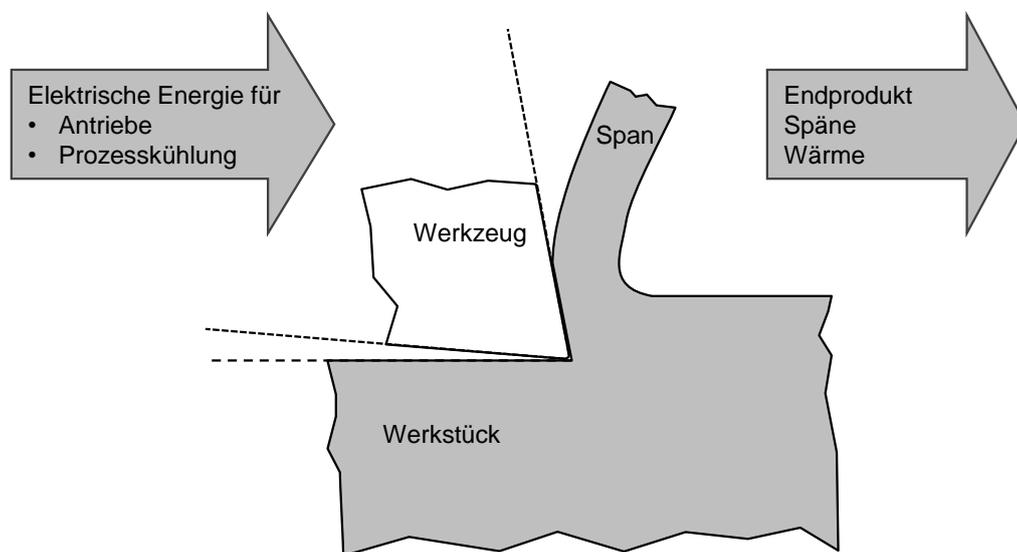


Abbildung 5.2.1: Energieumsetzung spanender Fertigungsprozess, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.1 Untersuchung des Einflusses der Prozessstrategie

Die Fräsversuche werden auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum HERMLE C50 U durchgeführt. Dabei wird die Gesamtleistungsaufnahme der Werkzeugmaschine bei der Bearbeitung eines Werkstückes mit unterschiedlichen Werkzeugen und Kühlkonzepten ermittelt. In ein Werkstück aus 42CrMo4 werden Kreisfaschen von 90 mm Durchmesser und einer Tiefe von 60 mm mit vier verschiedenen Prozessstrategien eingefräst. Abbildung 5.2.2 zeigt das bearbeitete Werkstück mit den vier gefrästen Taschen. Die aufgenommenen Messdaten für die Berechnung der Leistungsaufnahme sind die Ströme und Spannungen der Werkzeugmaschine und der Kühlmittelpumpe, bzw. der Druckluftaufbereitung.

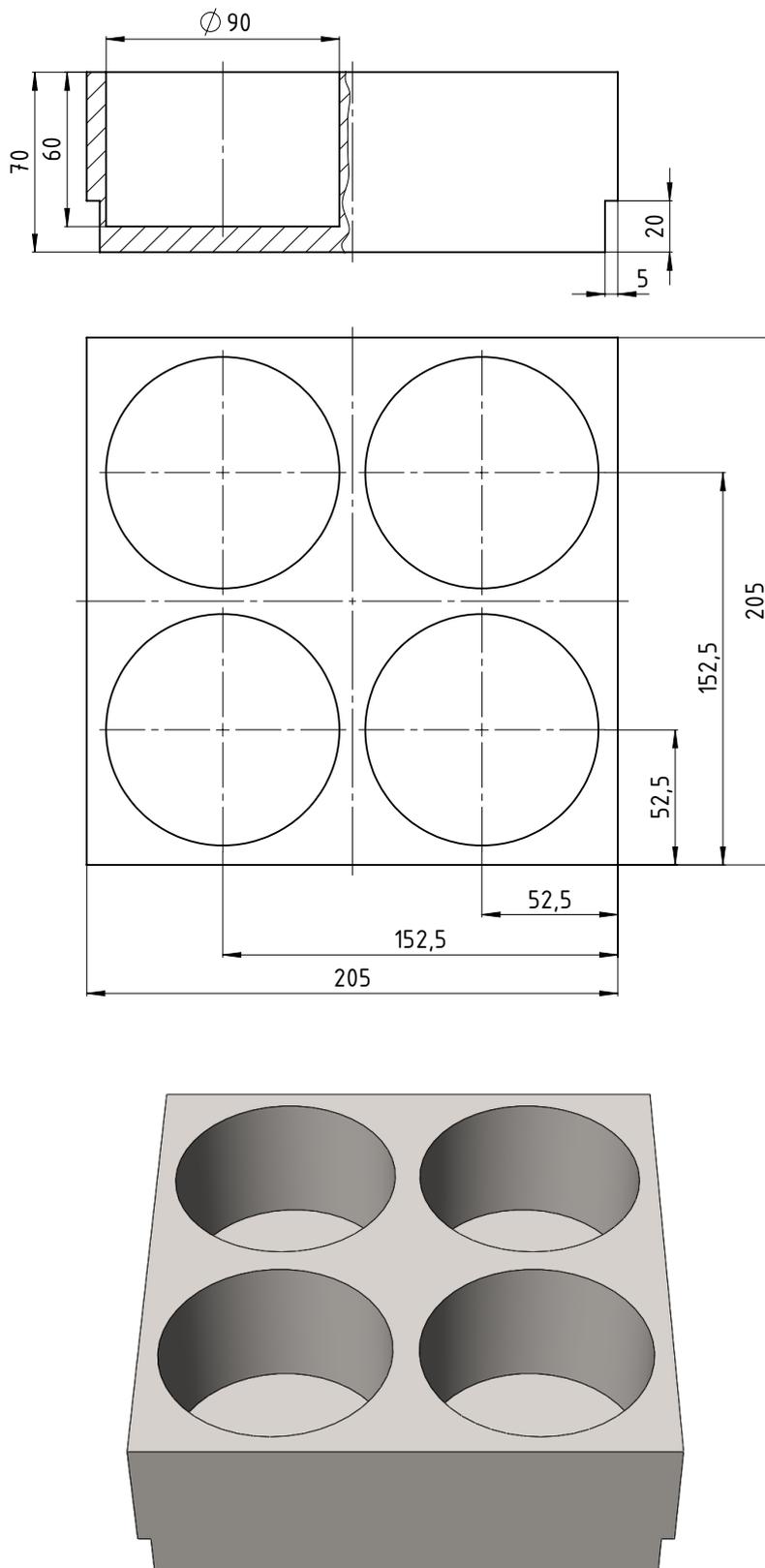


Abbildung 5.2.2: Zeichnung und 3D-Ansicht Versuchsteil Fräsversuche, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.2.1 zeigt die Prozessparameter der Fräsversuche. Ziel der Versuche ist es, bei gleichem Prozessergebnis - eine Kreistasche mit Durchmesser 90 mm und Taschentiefe 60 mm - die verschiedenen Prozessstrategien untereinander vergleichen zu können. Die 1. Strategie stellt den standardmäßig verwendeten Prozess mit Kühlmittel dar. Bei der 2. Strategie kommt unter Druckluftkühlung ein Rundplattenfräser mit Standard Wendeschneidplatten zum Einsatz. Die 3. Strategie kopiert die 2. Strategie unter Verwendung von gewellten Wendeschneidplatten. Bei der 4. Strategie wird das Hochvorschubfräsen mit mehr als sechsfach höherem Vorschub pro Zahn untersucht.

Ablauf	Werkzeug	v_c	f
1. Strategie - mit Kühlmittel 80 bar			
1. Startlochbohrung Tiefe 59,5 mm	Wendeplattenbohrer	140 m min ⁻¹	0,13 mm/U
2. Auskammern 3 Stufen zu 20 mm, seitliche Zustellung 5 mm	Vollhartmetallfräser	130 m min ⁻¹	0,13 mm/z
2. Strategie - mit Druckluft			
1. Fräsbearbeitung in Helixbahn Ø 39,4 mm 3 mm Zustellung pro Runde	Rundplattenfräser mit Standard Wendeschneidplatten	150 m min ⁻¹	0,135 mm/z
2. Restmaterial in 2 Stufen zu 30 mm, seitliche Zustellung 0,3 mm	Vollhartmetallfräser	130 m min ⁻¹	0,13 mm/z
3. Strategie - mit Druckluft			
1. Fräsbearbeitung in Helixbahn Ø 39,4 mm 3 mm Zustellung pro Runde	Rundplattenfräser mit gewellten Wendeschneidplatten	150 m min ⁻¹	0,135 mm/z
2. Restmaterial in 2 Stufen zu 30 mm, seitliche Zustellung 0,3 mm	Vollhartmetallfräser	130 m min ⁻¹	0,13 mm/z
4. Strategie - mit Druckluft			
1. Hochvorschubfräsen in Helixbahn Ø 39,4 mm 0,45 mm Zustellung pro Runde	Wendeplattenfräser mit fünfeckigen Wendeschneidplatten	175 m min ⁻¹	0,9 mm/z
2. Restmaterial in 2 Stufen zu 30 mm, seitliche Zustellung 0,3 mm	Vollhartmetallfräser	130 m min ⁻¹	0,13 mm/z

Tabelle 5.2.1: Prozessparameter Fräsversuche, Quelle: Eigene Darstellung.

1. Strategie

Bei der 1. Strategie wird mit einer Pilotbohrung mit Bohrtiefe 59,5 mm begonnen. Hierzu wird ein Wendplattenbohrer $\varnothing 36$ mm mit Schnittgeschwindigkeit 140 m min^{-1} und Vorschub $0,13 \text{ mm}$ pro Umdrehung verwendet. Das Auskammern auf das Taschenmaß $\varnothing 90 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ erfolgt in drei Tiefenzustellungen je 20 mm mit einer seitlichen Zustellung von 5 mm unter Verwendung eines Vollhartmetallfräsers $\varnothing 20 \text{ mm}$ mit Schnittgeschwindigkeit 130 m min^{-1} und Vorschub $0,13 \text{ mm}$ pro Zahn (Abbildung 5.2.3).

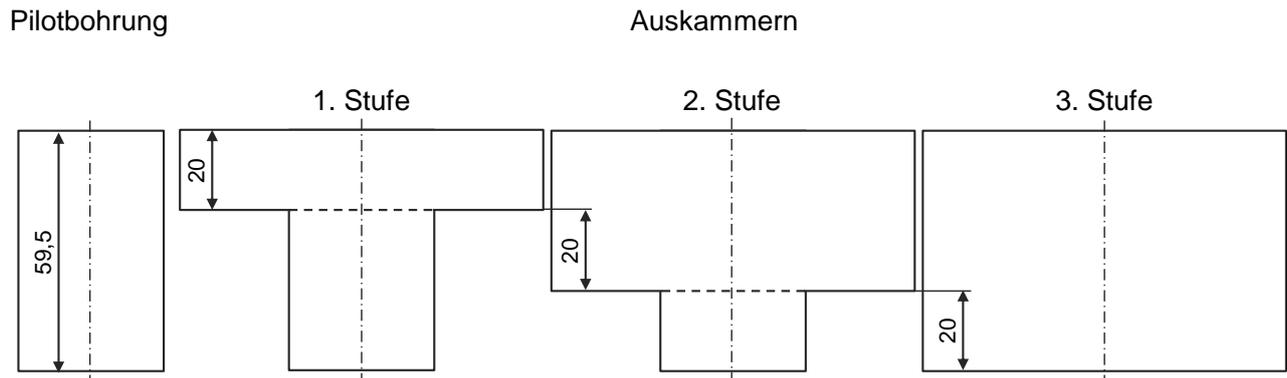


Abbildung 5.2.3: Bearbeitungsschritte 1. Strategie, Quelle: Eigene Darstellung.

Über die gesamte Bearbeitungszeit wird mit einer Wasser-Öl Kühlemulsion gekühlt. Der Werkzeugwechsel (WZW) erfolgt automatisiert aus dem Werkzeugmagazin des Bearbeitungszentrums.

Abbildung 5.2.4 zeigt den Leistungsverlauf des Bearbeitungszentrums HERMLE C50 U, den Leistungsverlauf der bei diesem Versuch verwendeten Kühlmittelpumpe und den Gesamtleistungsverlauf für die Bearbeitung bei der 1. Strategie.

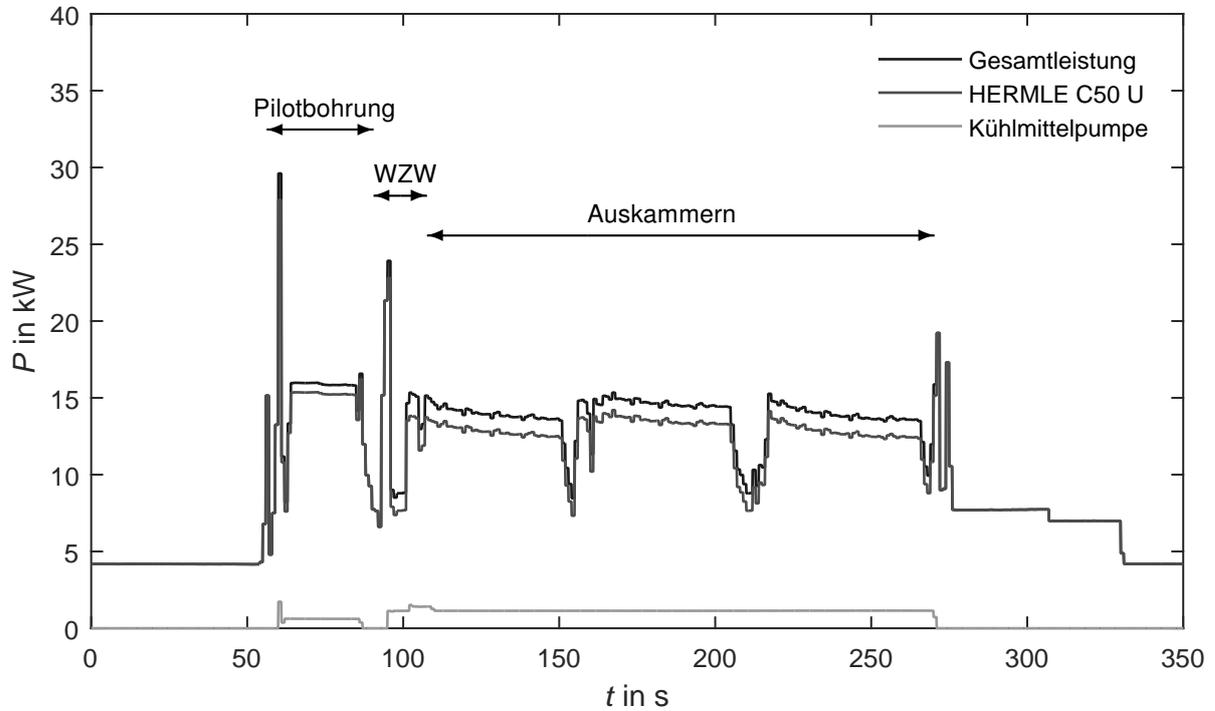


Abbildung 5.2.4: Leistungsverlauf Fräsversuche 1. Strategie, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.2.2 fasst die Prozessdaten der 1. Strategie zusammen. Die Leistungsspitze P_{max} von 29,61 kW entsteht zu Beginn der Bearbeitung beim Beschleunigen der Spindel. Der Energiebedarf für die Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ beträgt 3620,5 kJ. Die Kühlmittelpumpe, die die Wasser-Öl Emulsion zur Kühlung des Bearbeitungsvorgangs fördert, benötigt 218,1 kJ. Im Leistungsverlauf in Abbildung 5.2.4 ist ersichtlich, dass die Pumpe nur während der Werkzeugeingriffszeiten aktiv ist und diesen geringen Energiebedarf hat.

Versuch	Zeitfenster t in s	Leistungsspitze P_{max} in kW	durchschnittliche Leistung P_{mean} in kW	Energiebedarf Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ in kJ	Energiebedarf Kühlung $E_{Kuehlung}$ in kJ
1. Strategie	350	29,61	10,75	3620,50	218,10

Tabelle 5.2.2: Prozessdaten 1. Strategie - Kühlkonzept: nass, Quelle: Eigene Darstellung.

2. Strategie

Die 2. Strategie verwendet keine Pilotbohrung. Bei dieser Bearbeitung wird ein konventioneller Rundplattenfräser $\varnothing 50$ mm bestückt mit 5 Schneiden mit Standard Wendeschneidplatten verwendet. Die Fräsbewegung erfolgt in einer helixförmigen Bearbeitungsbewegung. Der Mittelpunkt des Rundplattenfräasers bewegt sich auf einer Helixbahn mit $\varnothing 39,4$ mm und 3 mm Zustellung pro Runde mit Schnittgeschwindigkeit 150 m min^{-1} und Vorschub $0,135$ mm pro Zahn. Somit ergibt sich ein Taschendurchmesser von $\varnothing 89,4$ mm nach der ersten Bearbeitung.

Der restliche Werkstoff wird in zwei Stufen mit Tiefenzustellung 30 mm und seitlicher Zustellung 0,3 mm auf das Taschenmaß $\varnothing 90 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ zerspant. Hierbei wird ein Vollhartmetallfräser $\varnothing 20$ mm mit Schnittgeschwindigkeit 130 m min^{-1} und Vorschub $0,13$ mm pro Zahn verwendet (Abbildung 5.2.5). Die Kühlung dieses Bearbeitungsprozesses erfolgt mittels Druckluft.

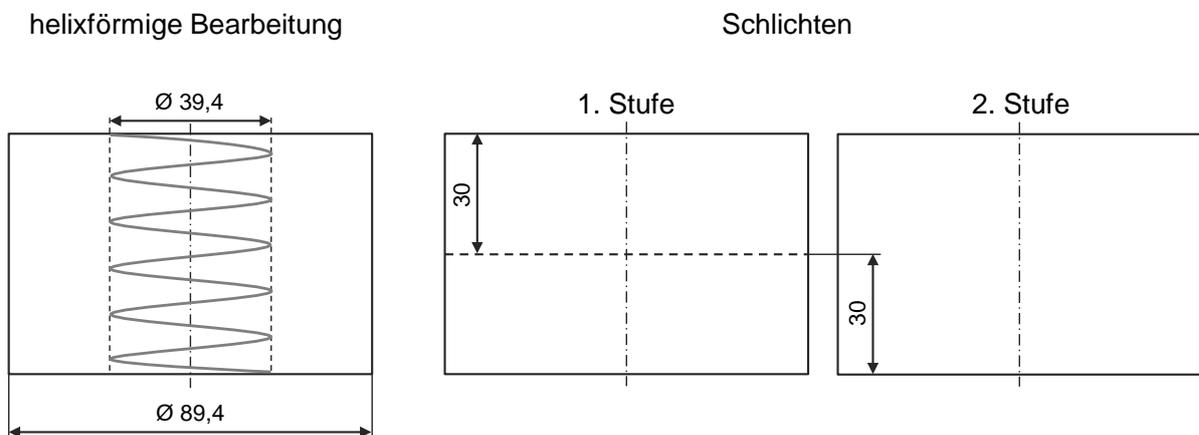


Abbildung 5.2.5: Bearbeitungsschritte 2. Strategie, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.2.6 zeigt den Leistungsverlauf des Bearbeitungszentrums HERMLE C50 U, den Leistungsverlauf der bei diesem Versuch verwendeten Druckluftaufbereitungsanlage und den Gesamtleistungsverlauf für die Bearbeitung bei der 2. Strategie.

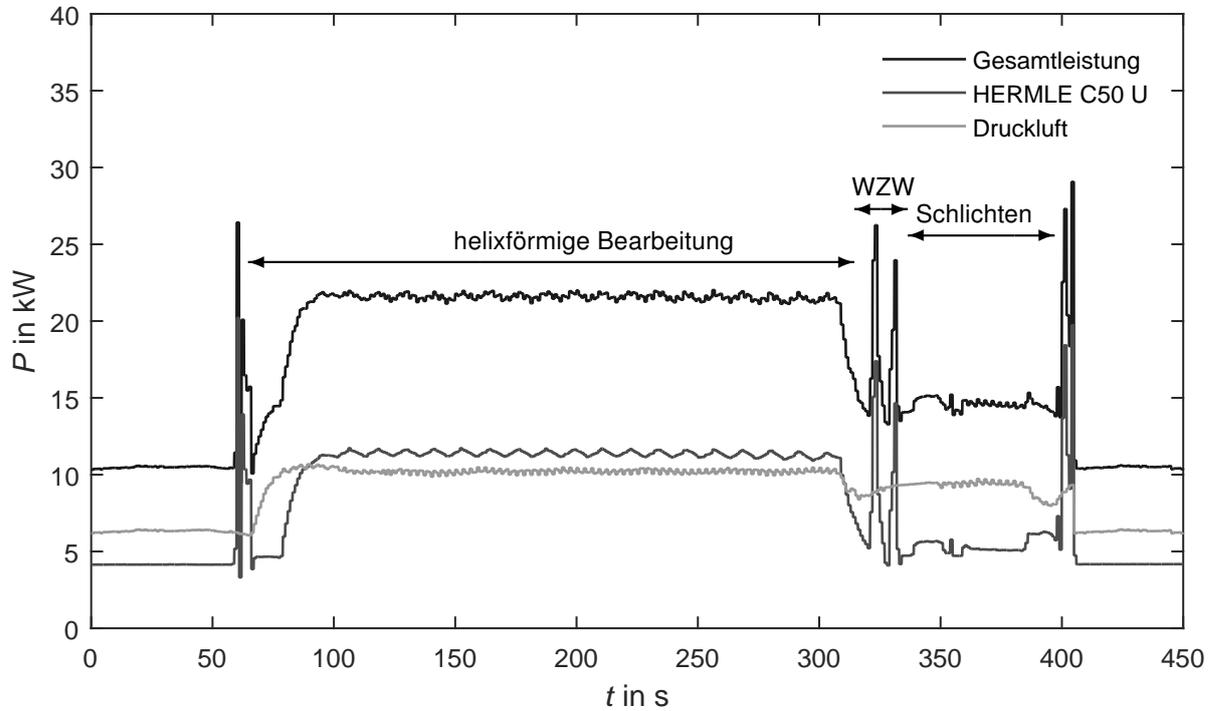


Abbildung 5.2.6: Leistungsverlauf Fräsversuche 2. Strategie, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.2.3 fasst die Prozessdaten der 2. Strategie zusammen. Die Leistungsspitze P_{max} von 29,06 kW liegt am Ende des Schichtvorgangs. Der Energiebedarf für die Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ beträgt 3779,79 kJ. Die Druckluftaufbereitung, die zur Kühlung eingesetzt wird, benötigt 4222,33 kJ. Damit liegt bei dieser Bearbeitungsstrategie der Energiebedarf für die Kühlung $E_{Kuehlung}$ mittels Druckluft über dem Energiebedarf der Bearbeitung. Auffällig ist der hohe Standby Wert der Druckluftaufbereitung von über 6 kW.

Versuch	Zeitfenster t in s	Leistungsspitze P_{max} in kW	durchschnittliche Leistung P_{mean} in kW	Energiebedarf Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ in kJ	Energiebedarf Kühlung $E_{Kuehlung}$ in kJ
2. Strategie	450	29,06	17,37	3779,97	4222,33

Tabelle 5.2.3: Prozessdaten 2. Strategie - Kühlkonzept: trocken, Quelle: Eigene Darstellung.

3. Strategie

Die 3. Strategie verwendet anstatt der Standard Wendeschneidplatten gewellte Wendeschneidplatten im selben Rundplattenfräser wie zuvor. Die gewellten Wendeschneidplatten werden eingesetzt, um die Schnittkraft zu reduzieren. Es wird der gleiche Prozessablauf mit dem veränderten Werkzeug gefahren. Die Fräsbewegung erfolgt wieder in einer Helixbahn mit $\varnothing 39,4$ mm und 3 mm Zustellung pro Runde mit Schnittgeschwindigkeit 150 m min^{-1} und Vorschub $0,135$ mm pro Zahn. Der restliche Werkstoff wird wie auch zuvor bei der 2. Strategie in zwei Stufen mit Tiefenzustellung 30 mm und seitlicher Zustellung $0,3$ mm auf das Taschenmaß $\varnothing 90$ mm x 60 mm zerspant. Hierbei wird wieder der Vollhartmetallfräser $\varnothing 20$ mm mit Schnittgeschwindigkeit 130 m min^{-1} und Vorschub $0,13$ mm pro Zahn verwendet. Die Kühlung dieses Bearbeitungsprozesses erfolgt mittels Druckluft. Abbildung 5.2.7 zeigt den Leistungsverlauf des Bearbeitungszentrums HERMLE C50 U, den Leistungsverlauf der bei diesem Versuch verwendeten Druckluftaufbereitungsanlage und den Gesamtleistungsverlauf für die Bearbeitung bei der 3. Strategie.

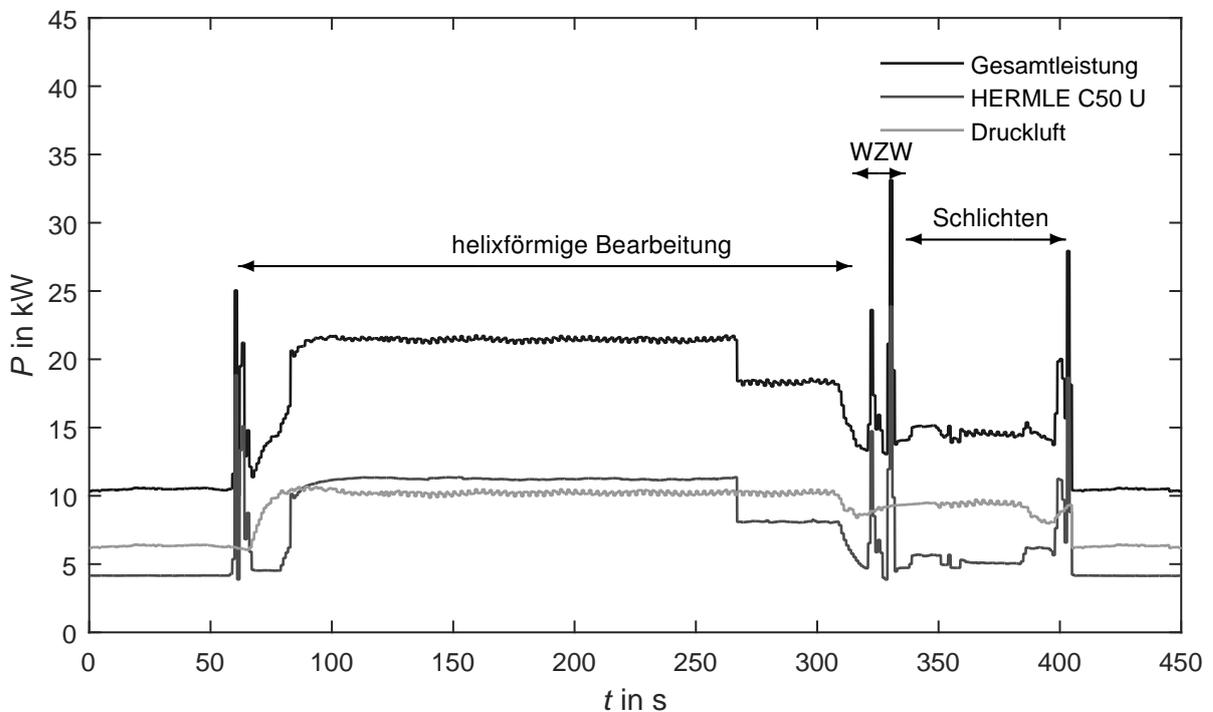


Abbildung 5.2.7: Leistungsverlauf Fräsversuche 3. Strategie, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.2.4 fasst die Prozessdaten der 3. Strategie zusammen. Durch die gewellten Wendeschneidplatten zeigt sich eine leicht verringerte Leistungsaufnahme während der Bearbeitung.

	Zeitfenster	Leistungsspitze	durchschnittliche Leistung	Energiebedarf Bearbeitung	Energiebedarf Kühlung
Versuch	t in s	P_{max} in kW	P_{mean} in kW	$E_{Bearbeitung}$ in kJ	$E_{Kuehlung}$ in kJ
3. Strategie	450	33,13	16,95	3674,27	4222,33

Tabelle 5.2.4: Prozessdaten 3. Strategie - Kühlkonzept: trocken, Quelle: Eigene Darstellung.

4. Strategie

Bei der 4. Prozessstrategie wird das Hochvorschubfräsen untersucht. Es wird ein Wendepplattenfräser $\varnothing 50$ mm bestückt mit fünfeckigen Wendeschneidplatten verwendet. Die Fräsbewegung erfolgt wieder in einer Helixbahn mit $\varnothing 39,4$ mm jetzt jedoch mit $0,45$ mm Zustellung pro Runde mit Schnittgeschwindigkeit 175 m min^{-1} und Vorschub $0,9$ mm pro Zahn. Der restliche Werkstoff wird wie auch zuvor in zwei Stufen mit Tiefenzustellung 30 mm und seitlicher Zustellung $0,3$ mm auf das Taschenmaß $\varnothing 90$ mm x 60 mm zerspant. Hierbei wird wieder der Vollhartmetallfräser $\varnothing 20$ mm mit Schnittgeschwindigkeit 130 m min^{-1} und Vorschub $0,13$ mm pro Zahn verwendet. Die Kühlung dieses Bearbeitungsprozesses erfolgt mittels Druckluft. Abbildung 5.2.8 zeigt den Leistungsverlauf des Bearbeitungszentrums HERMLE C50 U, den Leistungsverlauf der bei diesem Versuch verwendeten Druckluftaufbereitungsanlage und den Gesamtleistungsverlauf für die Bearbeitung bei der 4. Strategie.

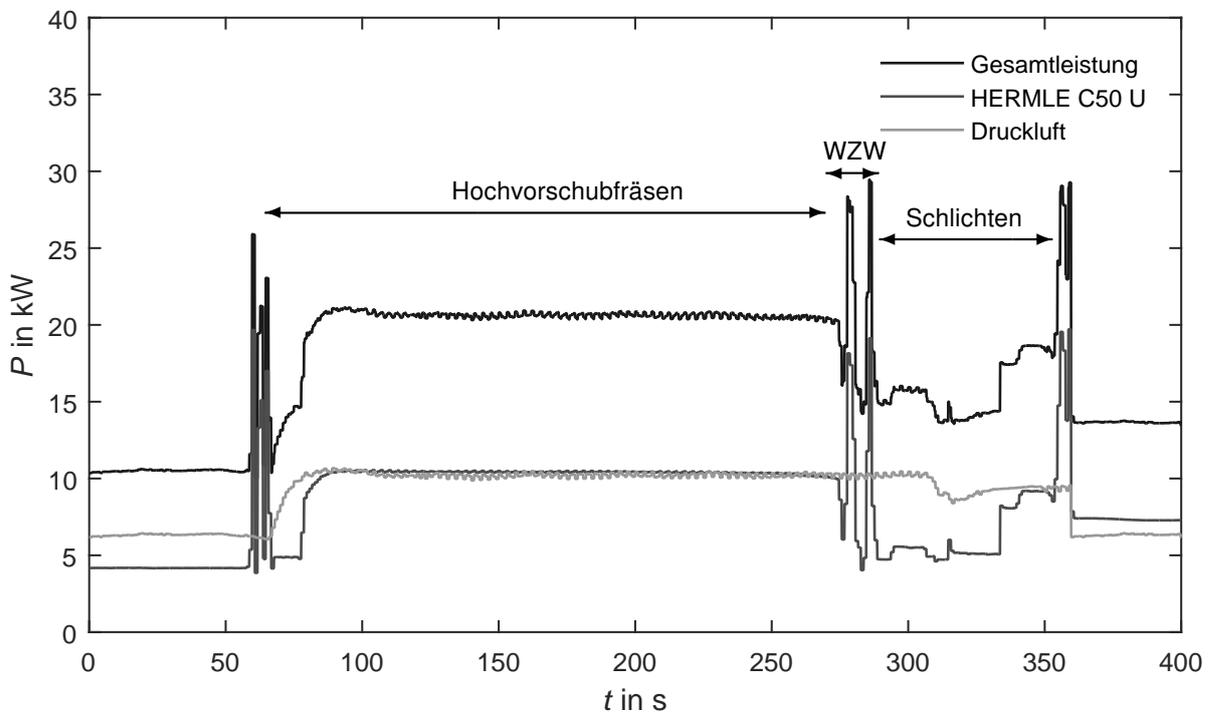


Abbildung 5.2.8: Leistungsverlauf Fräsversuche 4. Strategie, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.2.5 fasst die Prozessdaten der 4. Strategie zusammen. Die Leistungsspitze P_{max} von $29,46$ kW ergibt sich beim Beschleunigen der Spindel nach dem Werkzeugwechsel. Auch bei dieser Prozessstrategie ist der Energiebedarf für die Kühlung $E_{Kuehlung}$ mittels Druckluft mit $3717,83$ kJ über dem Energiebedarf der Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ mit $3295,79$ kJ.

Versuch	Zeitfenster t in s	Leistungsspitze P_{max} in kW	durchschnittliche Leistung P_{mean} in kW	Energiebedarf Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ in kJ	Energiebedarf Kühlung $E_{Kuehlung}$ in kJ
4. Strategie	400	29,46	17,40	3295,79	3717,83

Tabelle 5.2.5: Prozessdaten 4. Strategie - Kühlkonzept: trocken, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.2.6 und Abbildung 5.2.9 stellen die vier beschriebenen Strategien vergleichend dar. Die kürzeste Prozessdauer und den geringsten Energiebedarf E_{gesamt} hat die 1. Strategie mit 3838,6 kJ. Die Leistungsspitzen P_{max} durch das Beschleunigen der Spindel und durch das Beschleunigen beim Verfahren der Achsen liegen zwischen 29,06 und 33,13 kW und damit auf einem ähnlichen Niveau. Den höchsten Energiebedarf E_{gesamt} hat die 2. Strategie mit 8002,3 kJ.

Betrachtet man den Energiebedarf der Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ fällt auf, dass die 4. Strategie mit dem Hochvorschubfräsen den geringsten Energiebedarf hat. Durch die Druckluft als verwendetes Kühlmittel liegt der Gesamtenergiebedarf E_{gesamt} jedoch höher als bei der 1. Strategie.

Versuch	Leistungs- spitze P_{max} in kW	Energiebedarf gesamt E_{gesamt} in kJ	Energiebedarf Bearbeitung $E_{Bearbeitung}$ in kJ	Energiebedarf Kühlung $E_{Kuehlung}$ in kJ
1. Strategie	29,61	3838,6	3620,50	218,10
2. Strategie	29,06	8002,3	3779,97	4222,33
3. Strategie	33,13	7896,6	3674,27	4222,33
4. Strategie	29,46	7013,6	3295,79	3717,83

Tabelle 5.2.6: Leistungs- und Energievergleich Fräsversuche, Quelle: Eigene Darstellung.

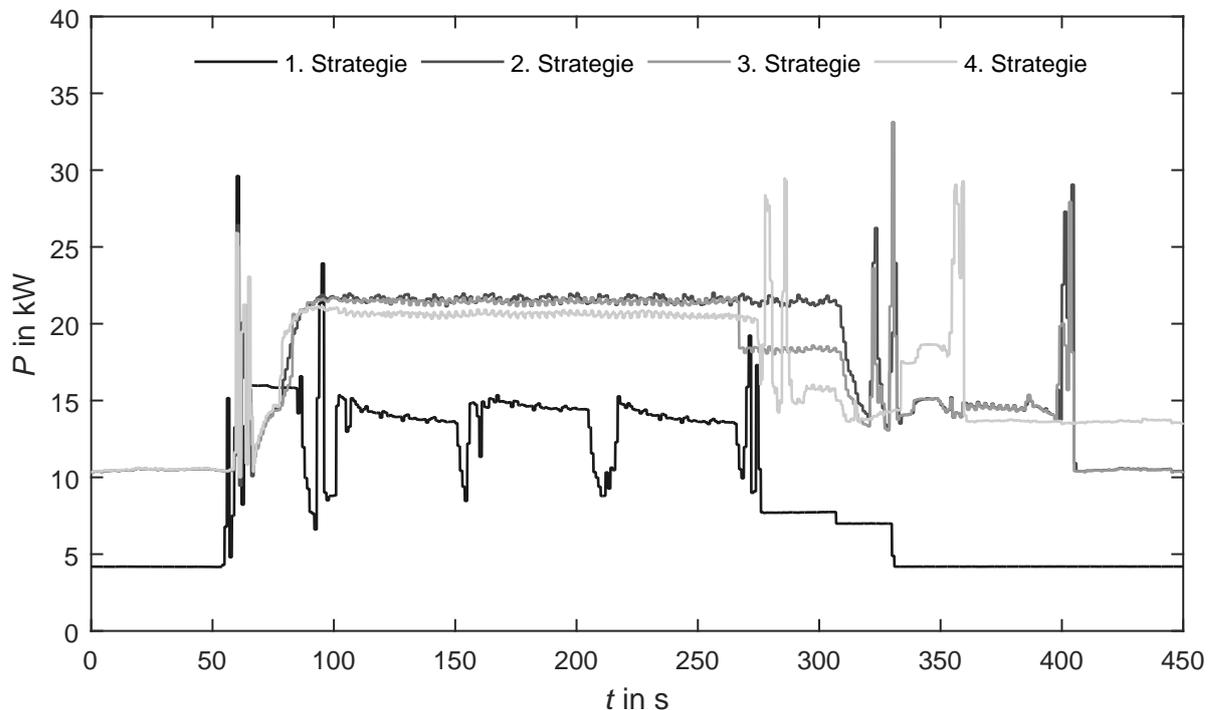


Abbildung 5.2.9: Vergleich der Fräsversuche, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Vergleich der Kühlstrategie in Abbildung 5.2.10 zeigt die deutlich höhere Leistungsaufnahme der Druckluftaufbereitung im Bearbeitungsprozess. Durch die kürzere Prozessdauer der 1. Strategie und der Leistungsaufnahme bei ungefähr 1 kW ist der Energiebedarf der Kühlmittelversorgung mit Wasser-Öl Emulsion um den Faktor 20 geringer als bei der 2. und 3. Strategie mit Druckluft.

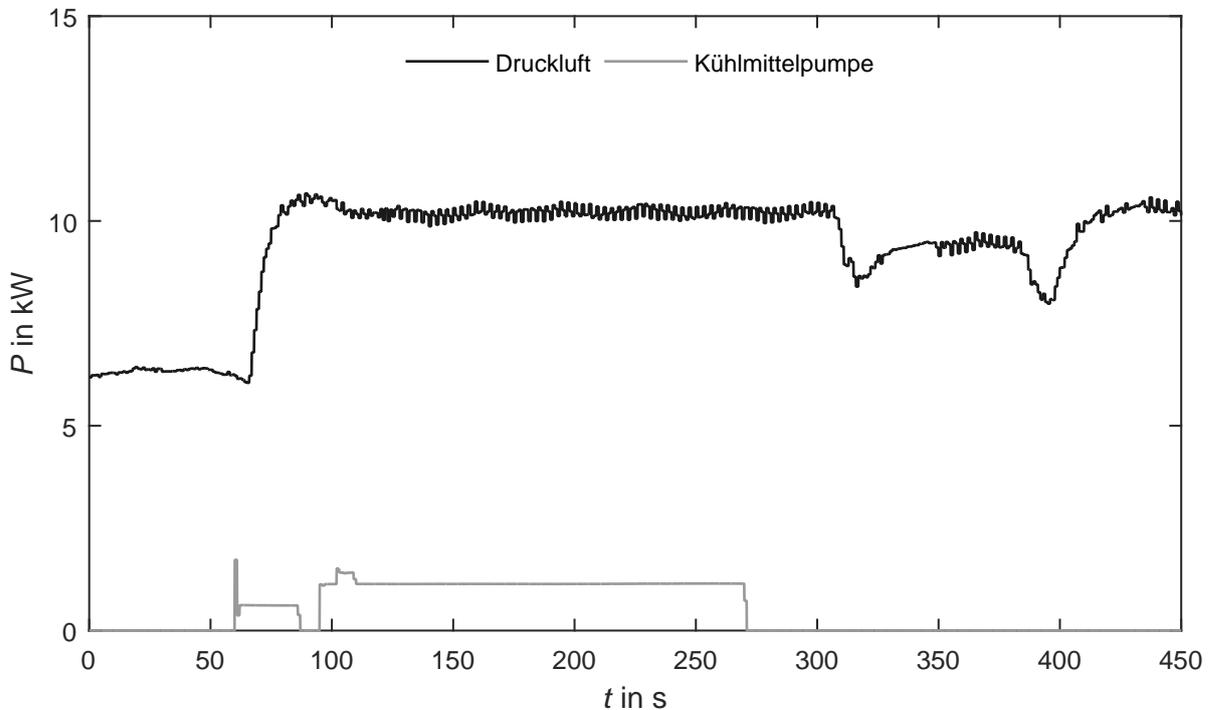


Abbildung 5.2.10: Vergleich der Kühlstrategie, Quelle: Eigene Darstellung.

Um zu einer abschließenden Bewertung der Kühlstrategie zu kommen, darf beim Vergleich Druckluft zu Wasser-Öl Emulsion nicht nur der Energiebedarf im Prozess herangezogen werden. Das Kühlmedium Druckluft kann aus der Umgebungsluft entnommen und dorthin zurück geführt werden. Bei den Kühlschmierstoffen müssen die Beschaffungs- und Entsorgungskosten und der Arbeitsschutz als weitere Bewertungskriterien berücksichtigt werden. Eine weitere Technologie, neben Druckluft und Kühlschmierstoffen, ist die Minimalmengen-Schmierung, die mit geringen Schmierstoff Mengen bis maximal 50 ml pro Stunde arbeitet. Im Rahmen der durchgeführten Versuche in der vorliegenden Arbeit war diese Technologie bei keiner der verwendeten Werkzeugmaschinen verfügbar.

5.2.2 Ermittlung des Einflusses der Schnittparameter

Bei der Ermittlung des Einflusses der Schnittparameter werden ein Vergütungsstahl und ein Einsatzstahl mit verbesserter Dauerfestigkeit hinsichtlich ihrer Bearbeitbarkeit im Vergleich zum jeweiligen Standardwerkstoffen untersucht. Die aufgenommenen Messdaten sind die Schnittkräfte am Werkzeug und die Ströme und Spannungen der Hauptspindel und des Werkzeugschlittens zur Berechnung der Leistungsaufnahme.

Drehversuche

Die Drehversuche mit den Werkstoffen 42CrMo4 (Standard) im Vergleich zu 42CrMo4 (ESU) und 18CrNi8 (Standard) im Vergleich zu 18CrNi8 (ESU) werden auf dem CNC-Drehzentrum WEIPERT WNC 500S durchgeführt. Für die Drehversuche werden Probenkörper mit Durchmesser 40 mm und 80 mm Länge verwendet. Die Werkstoffproben werden in einem Bereich von 40 mm längs gedreht. Im Fall der maximalen Schnitttiefe von 5 mm wird die Drehprobe auf einen Durchmesser 30 mm abgedreht (Abbildung 5.2.11). Für jeden Drehversuch wird eine neue Werkstoffprobe und eine neue Schneide verwendet, so dass jeder Versuch mit den gleichen Randbedingungen startet.

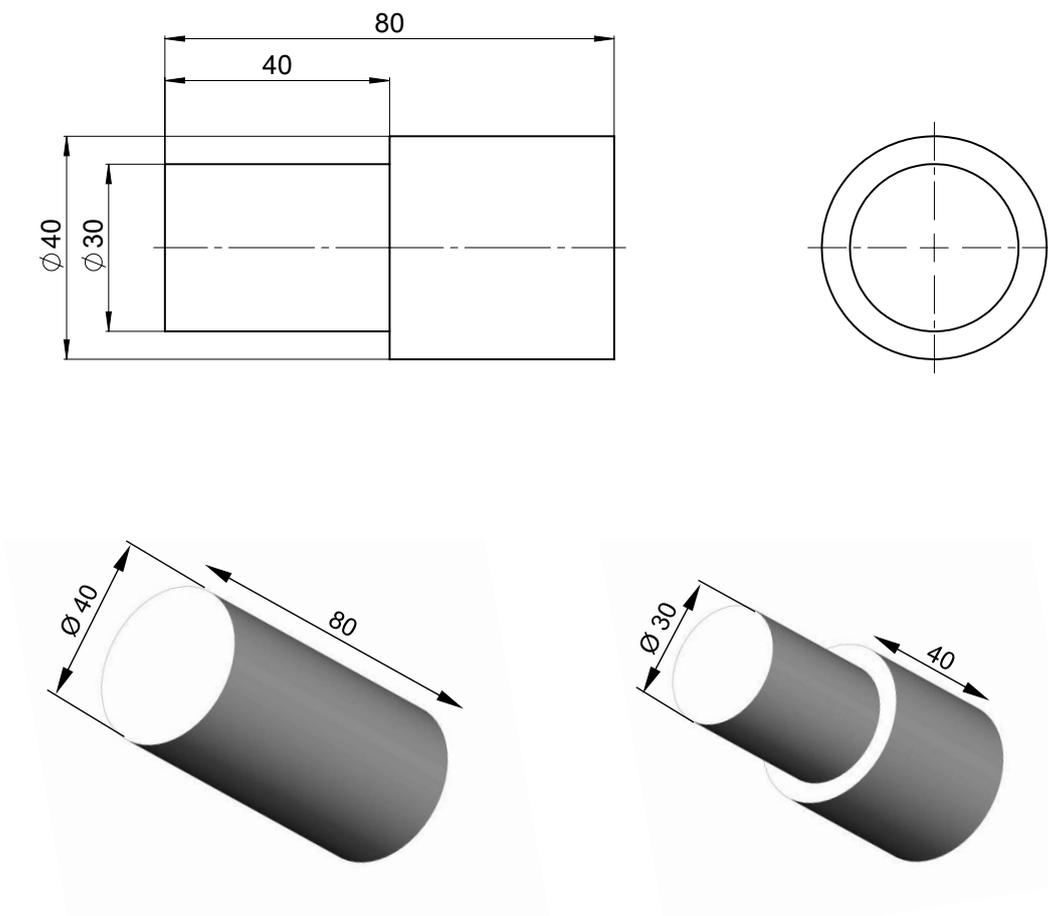


Abbildung 5.2.11: Zeichnung und 3D-Ansicht der Drehprobe, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Versuchsmatrix deckt das empfohlene Prozessfenster des Wendeschneidplattenherstellers mit 38 Versuchspunkten ab und legt weiter 5 Versuchspunkte außerhalb dieses. In Orientierung an das Bearbeitungsprozessfenster des Wendeschneidplattenherstellers werden 43 Versuchspunkte je Schnittgeschwindigkeit definiert (siehe Abbildung 5.2.12 links). Diese Versuchspunkte, die sich über die Schnitttiefe a_p und den Vorschub f ergeben, werden je Werkstoff bei vier Schnittgeschwindigkeiten durchgeführt (siehe Abbildung 5.2.12 rechts). Die Schnitttiefe wird von 1,0 - 5,0 mm in Schritten von 1 mm und der Vorschub von 0,15 - 0,6 mm pro Umdrehung in Schritten von 0,05 mm variiert. Für den Werkstoff 42CrMo4 (Standard) und 42CrMo4 (ESU) wird der empfohlene Bereich der Schnittgeschwindigkeit in 150, 190, 240 und 280 m min^{-1} für die Durchführung der Versuche aufgeteilt. Der empfohlene Bereich der Schnittgeschwindigkeit liegt für den Einsatzstahl höher, so dass für 18CrNi8 (Standard) und 18CrNi8 (ESU) die Schnittgeschwindigkeiten 200, 240, 280 und 320 m min^{-1} gewählt werden.

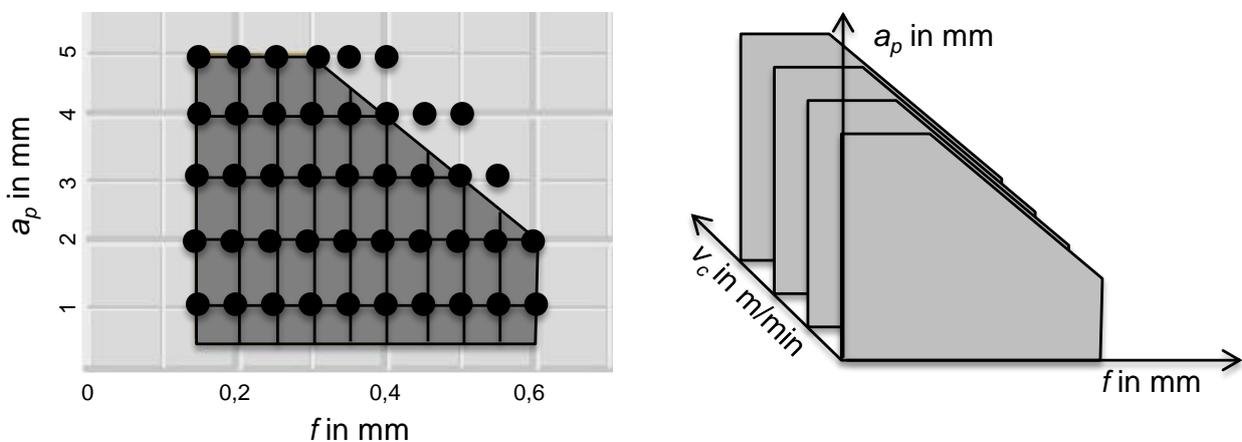


Abbildung 5.2.12: Versuchsmatrix Drehversuche, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Prozessablauf beim Drehen mit den Wendeschneidplatten ist folgender:

- Werkstück ist eingespannt;
- Werkzeugschlitten in Ausgangsposition X 320 mm, Z 250 mm;
- Spindel startet und beschleunigt in 1 s auf Schnittparameter des jeweiligen Versuchs;
- Werkzeugschlitten fährt im Eilgang auf Z 5 mm ;
- Werkzeugschlitten fährt im Eilgang auf X entsprechend den jeweiligen Versuchsparametern;
- Kühlmittel ein;
- Werkzeugschlitten fährt mit dem Vorschubwert des jeweiligen Versuchs auf Z -40 mm;
- Längsdrehen beendet, Werkzeugschlitten fährt mit f 0,2 m min^{-1} aus dem Werkstück;
- Kühlmittel aus;
- Spindel stoppt;
- Werkzeugschlitten fährt im Eilgang auf Ausgangsposition X 320 mm, Z 250 mm;
- Wendeschneidplatte wechseln;
- Späne des Drehversuchs sammeln und dokumentieren.

Das bei einem Versuch zerspannte Volumen V ist abhängig von der Schnitttiefe a_p . Durch die fünf Schnitttiefen ergeben sich die in Tabelle 5.2.7 gelisteten fünf Volumina je Versuch.

	Schnitttiefe a_p in mm				
	1	2	3	4	5
Volumen V in mm³	4901	9550	13949	18096	21991

Tabelle 5.2.7: Zerspantes Volumen beim Längsdrehen, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Zeitspanvolumen \dot{V} ist von den Schnittgrößen a_p und f und von der Schnittgeschwindigkeit v_c abhängig. Mit den 43 Versuchspunkten je Schnittgeschwindigkeit ergeben sich somit eine Vielzahl verschiedener Werte. In den folgenden Tabellen 5.2.8 bis 5.2.13 ist das Zeitspanvolumen \dot{V} je Versuch gelistet. Bei allen Werkstoffen werden Versuche bei Schnittgeschwindigkeit 240 und 280 m min⁻¹ durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit 150 und 190 m min⁻¹ werden nur für 42CrMo4 (Standard) und (ESU) und die Schnittgeschwindigkeiten 200 und 320 m min⁻¹ werden nur für 18CrNi8 (Standard) und (ESU) verwendet.

Das geringste Zeitspanvolumen mit 375 mm³ s⁻¹ tritt bei der kleinsten Schnittgeschwindigkeit von 150 m min⁻¹ auf (Tabelle 5.2.8). Das höchste Zeitspanvolumen mit 10667 mm³ s⁻¹ tritt bei der größten Schnittgeschwindigkeit von 320 m min⁻¹ auf (Tabelle 5.2.13).

Vorschub f in mm	Schnitttiefe a_p in mm				
	1	2	3	4	5
	\dot{V} in mm ³ s ⁻¹				
0,15	375	750	1125	1500	1875
0,20	500	1000	1500	2000	2500
0,25	625	1250	1875	2500	3125
0,30	750	1500	2250	3000	3750
0,35	875	1750	2650	3500	4375
0,40	1000	2000	3000	4000	5000
0,45	1125	2250	3375	4500	
0,50	1250	2500	3750	5000	
0,55	1375	2750	4125		
0,60	1500	3000			

Tabelle 5.2.8: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 150 m min⁻¹, Quelle: Eigene Darstellung.

Vorschub f in mm	Schnitttiefe a_p in mm				
	1	2	3	4	5
	\dot{V} in $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$				
0,15	475	950	1425	1900	2375
0,20	633	1267	1900	2533	3167
0,25	792	1583	2375	3167	3958
0,30	950	1900	2850	3800	4750
0,35	1108	2217	3325	4433	5542
0,40	1267	2533	3800	5067	6333
0,45	1425	2850	4275	5700	
0,50	1583	3167	4750	6333	
0,55	1742	3483	5225		
0,60	1900	3800			

Tabelle 5.2.9: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 190 m min^{-1} , Quelle: Eigene Darstellung.

Vorschub f in mm	Schnitttiefe a_p in mm				
	1	2	3	4	5
	\dot{V} in $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$				
0,15	500	1000	1500	2000	2500
0,20	667	1333	2000	2667	3333
0,25	833	1667	2500	3333	4167
0,30	1000	2000	3000	4000	5000
0,35	1167	2333	3500	4667	5833
0,40	1333	2667	4000	5333	6667
0,45	1500	3000	4500	6000	
0,50	1667	3333	5000	6667	
0,55	1833	3667	5500		
0,60	2000	4000			

Tabelle 5.2.10: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 200 m min^{-1} , Quelle: Eigene Darstellung.

Vorschub f in mm	Schnitttiefe a_p in mm				
	1	2	3	4	5
	\dot{V} in $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$				
0,15	600	1200	1800	2400	3000
0,20	800	1600	2400	3200	4000
0,25	1000	2000	3000	4000	5000
0,30	1200	2400	3600	4800	6000
0,35	1400	2800	4200	5600	7000
0,40	1600	3200	4800	6400	8000
0,45	1800	3600	5400	7200	
0,50	2000	4000	6000	8000	
0,55	2200	4400	6600		
0,60	2400	4800			

Tabelle 5.2.11: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 240 m min^{-1} , Quelle: Eigene Darstellung.

Vorschub f in mm	Schnitttiefe a_p in mm				
	1	2	3	4	5
	\dot{V} in $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$				
0,15	700	1400	2100	2800	3500
0,20	933	1867	2800	3733	4667
0,25	1167	2333	3500	4667	5833
0,30	1400	2800	4200	5600	7000
0,35	1633	3267	4900	6533	8167
0,40	1867	3733	5600	7467	9333
0,45	2100	4200	6300	8400	
0,50	2333	4667	7000	9333	
0,55	2567	5133	7700		
0,60	2800	5600			

Tabelle 5.2.12: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 280 m min^{-1} , Quelle: Eigene Darstellung.

Vorschub f in mm	Schnitttiefe a_p in mm				
	1	2	3	4	5
	\dot{V} in $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$				
0,15	800	1600	2400	3200	4000
0,20	1067	2133	3200	4267	5333
0,25	1333	2667	4000	5333	6667
0,30	1600	3200	4800	6400	8000
0,35	1867	3733	5600	7467	9333
0,40	2133	4267	6400	8533	10667
0,45	2400	4800	7200	9600	
0,50	2667	5333	8000	10667	
0,55	2933	5867	8800		
0,60	3200	6400			

Tabelle 5.2.13: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 320 m min^{-1} , Quelle: Eigene Darstellung.

In Tabelle 5.2.13 ist das Zeitspanvolumen $3200 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ durch Fettdruck hervorgehoben. Es zeigt am Beispiel der $3200 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$, dass das gleiche Zeitspanvolumen durch verschiedene Parameterkombinationen erreicht werden kann. In der gewählten Versuchsmatrix ergeben sich somit Vergleichsmöglichkeiten mit Bezug auf das Zeitspanvolumen sowohl innerhalb einer Schnittgeschwindigkeit, als auch zwischen Schnittgeschwindigkeiten.

Abbildung 5.2.13 zeigt den Leistungsverlauf der Hauptspindel und des Werkzeugschlittens beim Längsdrehen des 42CrMo4 (Standard) bei v_c 150 m min⁻¹, f 0,15 mm und a_p 1 mm. Die Dauer des beschriebenen Prozessablaufs ist bei diesen Schnittparametern 25 Sekunden und steht in Abhängigkeit zur Schnittgeschwindigkeit und zum Vorschub.

Es zeigt sich, dass die Leistungsaufnahme des Schlittens deutlich geringer ist als die Leistungsaufnahme der Spindel. Der Werkzeugschlitten positioniert das Werkzeug und setzt die Vorschubbewegung beim Längsdrehen um. Die Leistungsspitzen treten beim Verfahren im Eilgang auf. Die Hauptspindel nimmt das Werkstück auf und setzt die Schnittbewegung durch die Spindeldrehzahl um. Die Leistungsspitzen treten beim Beschleunigen, beim Werkzeugeingriff und beim Abbremsen der Spindel auf. Während des Längsdrehvorgangs stellt sich eine gleichmäßiger Leistungsverlauf ein.

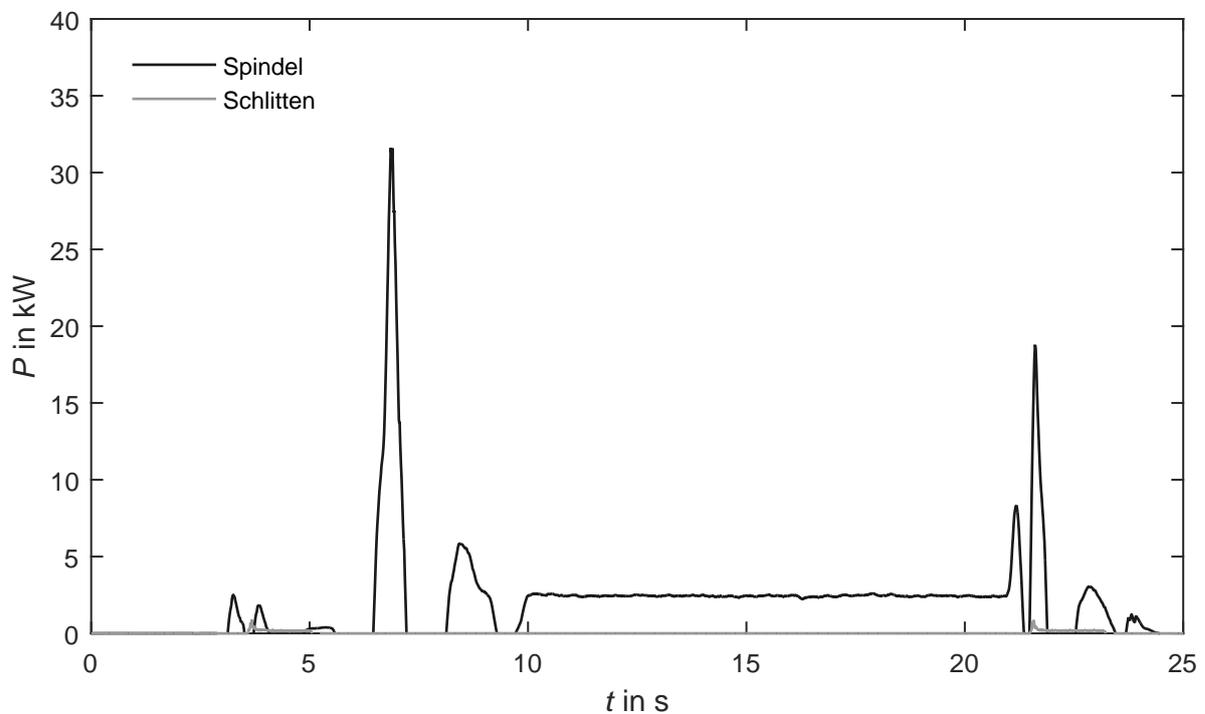


Abbildung 5.2.13: Leistungsverlauf Hauptspindel und Werkzeugschlitten 42CrMo4 (Standard) bei v_c 150 m min⁻¹ f 0,15 mm und a_p 1 mm, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.2.14 zeigt den Leistungsverlauf der Hauptspindel im Vergleich zum Schnittkraftverlauf beim Längsdrehen des 42CrMo4 (Standard) bei v_c 150 m min^{-1} , f $0,15 \text{ mm}$ und a_p 1 mm . Durch den Schnittkraftverlauf ist ersichtlich, wann sich das Werkzeug im Eingriff befindet. Der Längsdrehvorgang dauert circa 13 Sekunden. Nach dem Werkzeugeingriff ist die Regelung des Gleichstrommotors zu erkennen bis sich das gleichmäßige Leistungsniveau einstellt. Auch bei Werkzeugaustritt ist ein Regelungsvorgang des Antriebs im Leistungsverlauf zu erkennen.

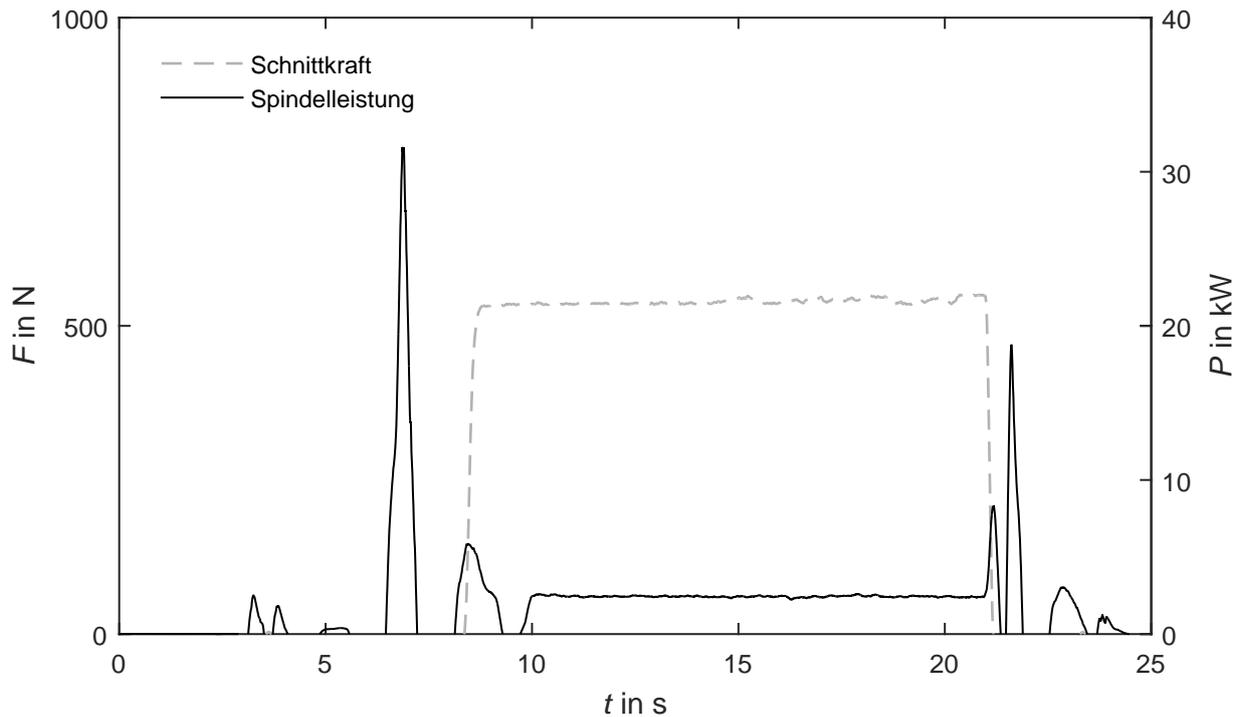


Abbildung 5.2.14: Spindelleistungs- und Schnittkraftverlauf 42CrMo4 (Standard) bei v_c 150 m min^{-1} , f $0,15 \text{ mm}$ und a_p 1 mm , Quelle: Eigene Darstellung.

Für die vier Werkstoffe 42CrMo4 (Standard), 42CrMo4 (ESU), 18CrNi8 (Standard) und 18CrNi8 (ESU) werden die Längsdrehversuche mit den beschriebenen Parametern durchgeführt. Insgesamt sind dies 688 Versuche. Für jeden Punkt der Versuchsmatrix wird der Energiebedarf von Hauptspindel und Werkzeugschlitten über die Dauer des Prozessablaufs ermittelt.

Abbildung 5.2.15 zeigt den Energiebedarf des 42CrMo4 (Standard) bei v_c 150 m min⁻¹ an den 43 Punkten der Versuchsmatrix. Zwei Abhängigkeiten sind aus dem Diagramm ersichtlich.

1. Mit abnehmender Schnitttiefe sinkt der Energiebedarf.
2. Je höher der Vorschub, desto geringer der Energiebedarf.

Die Diagrammfläche ist in zwei Raumrichtungen geneigt. Den höchsten Energiebedarf von 30,87 kJ hat der am längsten dauernde Versuch bei f 0,15 mm mit der größten Schnitttiefe a_p 5 mm. Den geringsten Energiebedarf von 20,58 kJ hat der Versuch mit dem höchsten Vorschub f 0,60 mm und der kleinsten Schnitttiefe a_p 1 mm.

Die Fragestellung nach der Zerspanung in einem Schritt oder in zwei Schritten lässt sich mit Blick auf die Auswertung des Energiebedarfs eindeutig beantworten. Eine Zerspanung in einem Schritt benötigt weniger Energie, als eine Aufteilung auf zwei Schritte.

Beispielbetrachtung - Werkstoffabtrag 2 mm:

Einmal Prozess mit a_p 2 mm und f 0,60 mm benötigt 21,30 kJ;

Zweimal Prozess mit a_p 1 mm und f 0,60 mm benötigt $2 \times 20,58$ kJ = 41,16 kJ.

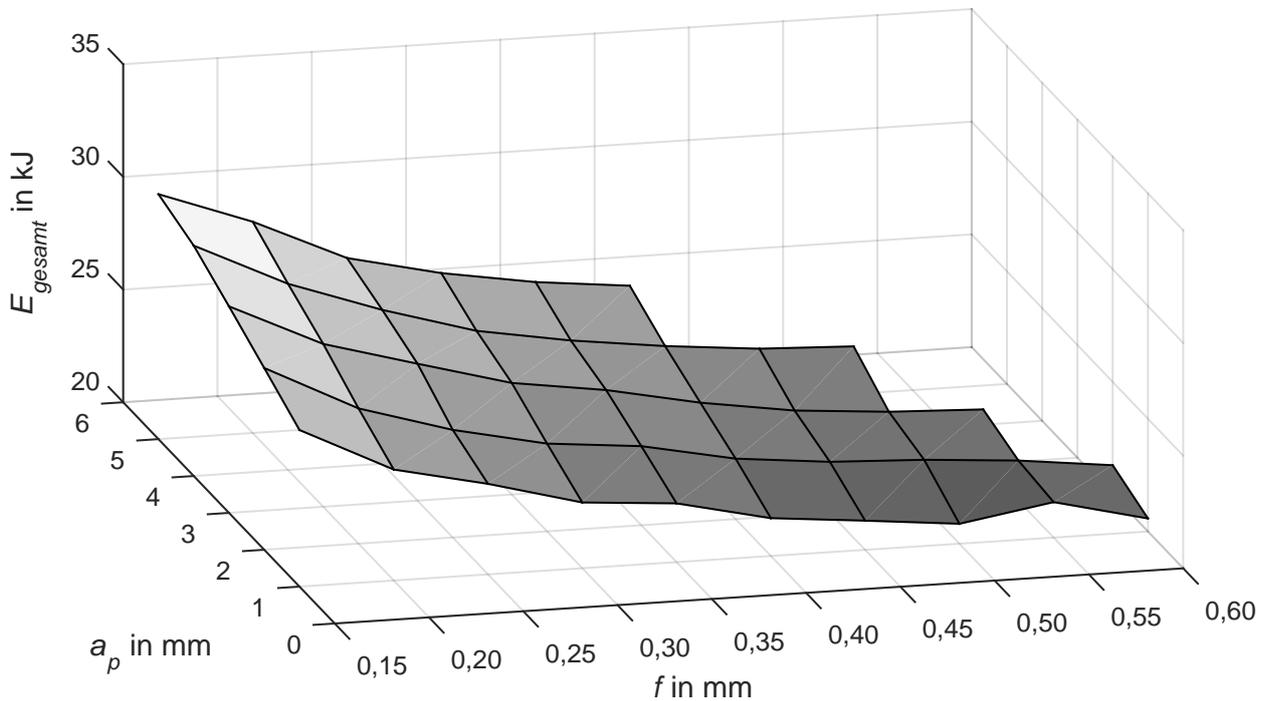


Abbildung 5.2.15: Energiebedarf 42CrMo4 (Standard) bei v_c 150 m min⁻¹, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.2.16 zeigt den Energiebedarf in Abhängigkeit der Parametervariation bei den vier gewählten Schnittgeschwindigkeiten 150, 190, 240 und 280 m min^{-1} für den Werkstoff 42CrMo4 (Standard). Mit steigender Schnittgeschwindigkeit wird die Neigung der Diagrammfläche, die in Abhängigkeit zur Schnitttiefe steht, geringer.

Bei v_c 150 m min^{-1} und f 0,15 mm beträgt der Unterschied zwischen a_p 1 mm und 5 mm 3,92 kJ. Bei v_c 240 m min^{-1} und f 0,15 mm verringert sich der Unterschied zwischen a_p 1 mm und 5 mm auf 2,57 kJ.

Bei der höchsten gewählten Schnittgeschwindigkeit v_c 280 m min^{-1} ist der Energiebedarf im Vergleich zu v_c 240 m min^{-1} höher.

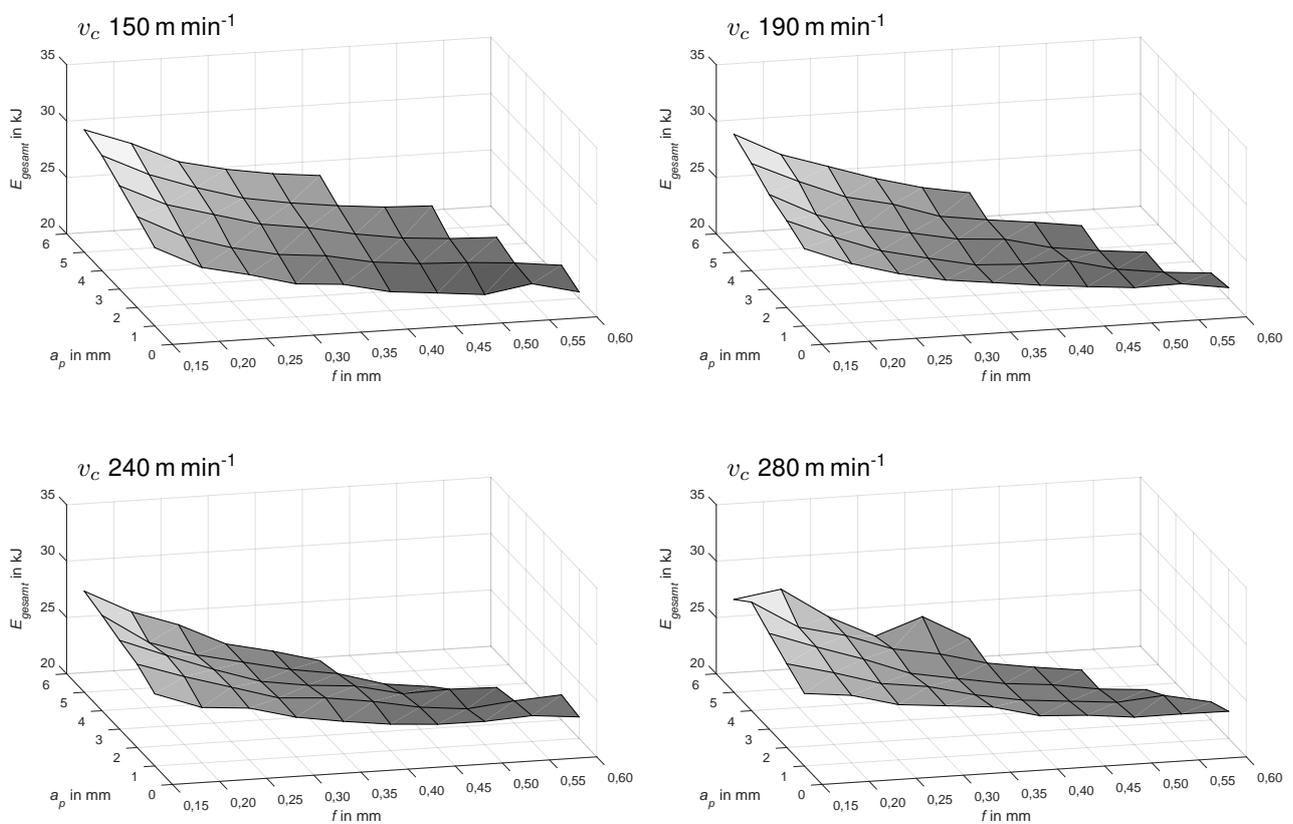


Abbildung 5.2.16: Energiebedarf 42CrMo4 (Standard) Parametervariation bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Auswertung der aufgezeichneten Schnittkräfte zeigt keine Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit. Die Untersuchung der Spanform zeigt ebenso, dass der Übergang von Fließ- zu Scherspan kaum von der Schnittgeschwindigkeit, sondern vom Vorschub und von der Schnitttiefe abhängig ist.

Der Vergleich des Standardwerkstoffs 42CrMo4 mit 42CrMo4 (ESU) zeigt bei den aufgezeichneten Schnittkräften keinen Unterschied. Der Übergangsbereich von Fließ- zu Scherspan verschiebt sich beim 42CrMo4 (ESU) hin zu höheren Vorschüben. Mit dem Energiebedarf betrachtet, ist diese Veränderung positiv zu bewerten.

Abbildung 5.2.17 zeigt den Energiebedarf in Abhängigkeit der Parametervariation bei den vier gewählten Schnittgeschwindigkeiten 150, 190, 240 und 280 m min^{-1} für den Werkstoff 42CrMo4 (ESU).

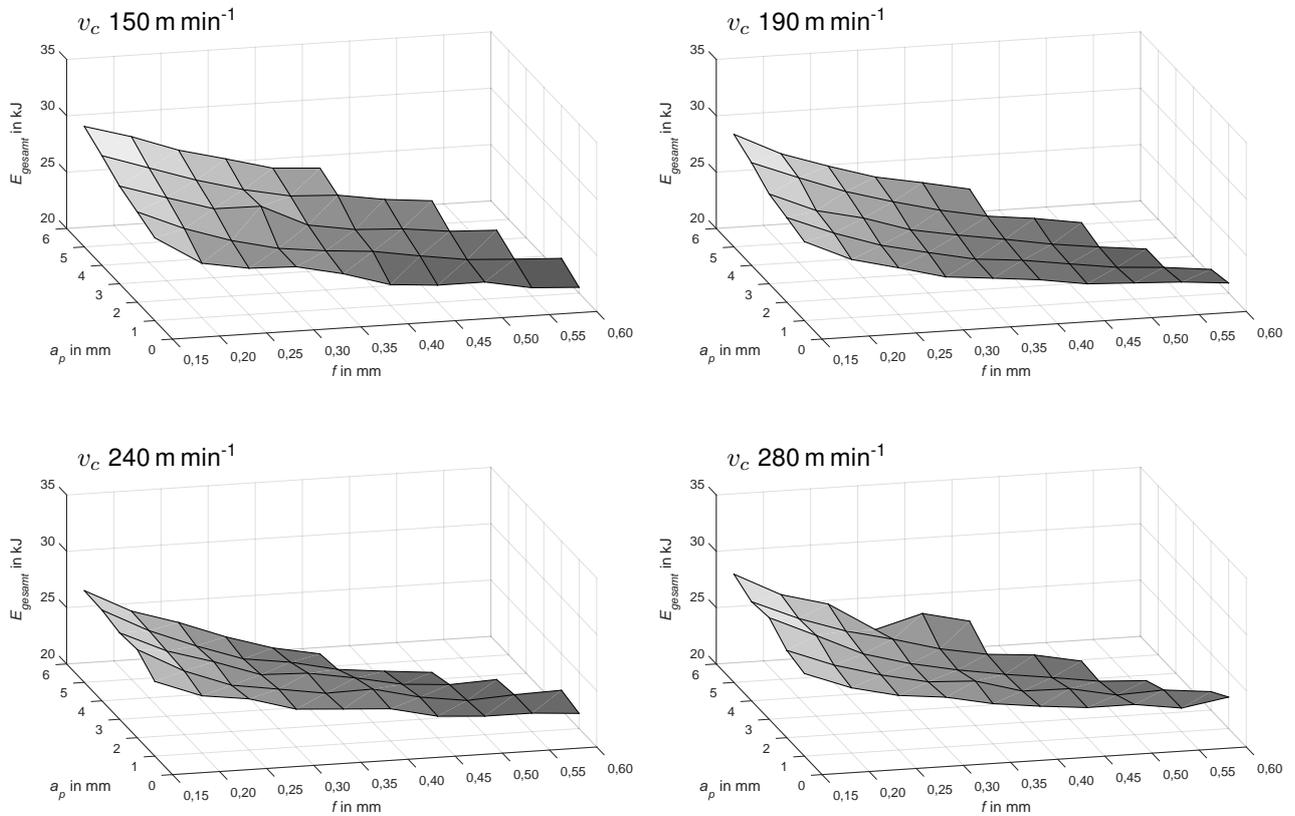


Abbildung 5.2.17: Energiebedarf 42CrMo4 (ESU) Parametervariation bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus den ausgewerteten Messdaten der Kräfte und der Beurteilung der Späne ergibt sich ein Prozessfenster innerhalb der Grenzen der Versuchsmatrix. Der in Abbildung 5.2.18 eingezeichnete Übergang von Fließ- zu Scherspan verschiebt sich beim 42CrMo4 (ESU) im Vergleich zum 42CrMo4 (Standard) zu höheren Vorschüben. Damit ist auch das Prozessfenster des 42CrMo4 (ESU) etwas nach rechts verschoben.

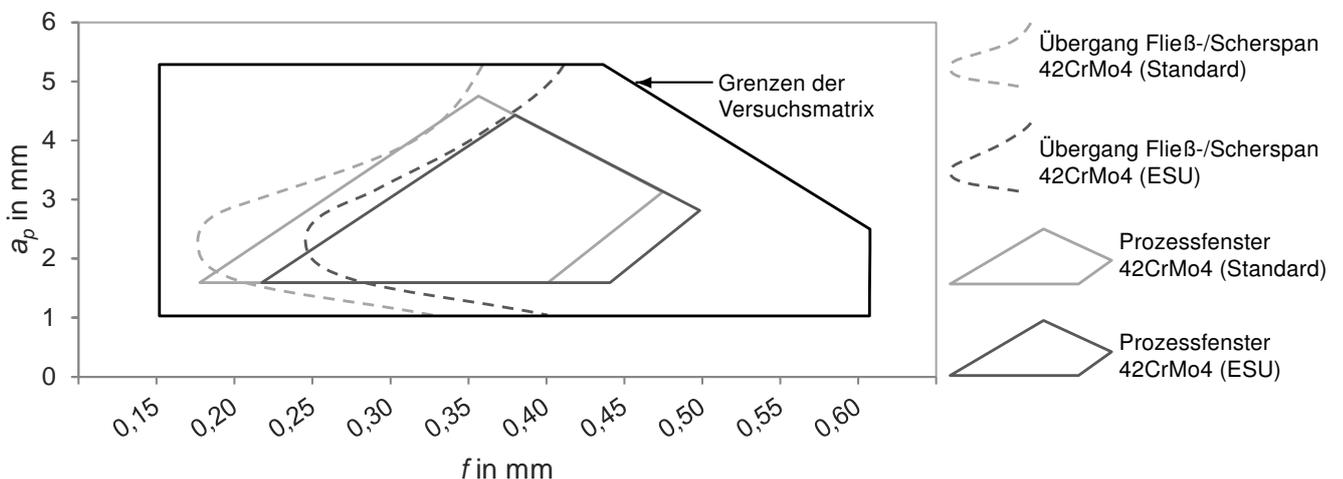


Abbildung 5.2.18: Bearbeitungsgrenzen 42CrMo4, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.2.19 zeigt den Energiebedarf in Abhängigkeit der Parametervariation bei den vier gewählten Schnittgeschwindigkeiten 200, 240, 280 und 320 m min^{-1} für den Werkstoff 18CrNi8 (Standard). Die beim Vergütungsstahl ermittelten Abhängigkeiten des Energiebedarfs von Vorschub und Schnitttiefe sind auch beim Einsatzstahl sichtbar.

1. Mit abnehmender Schnitttiefe sinkt der Energiebedarf.
2. Je höher der Vorschub, desto geringer der Energiebedarf.

Der höchste Energieverbrauch tritt bei der höchsten Schnittgeschwindigkeit 320 m min^{-1} auf.

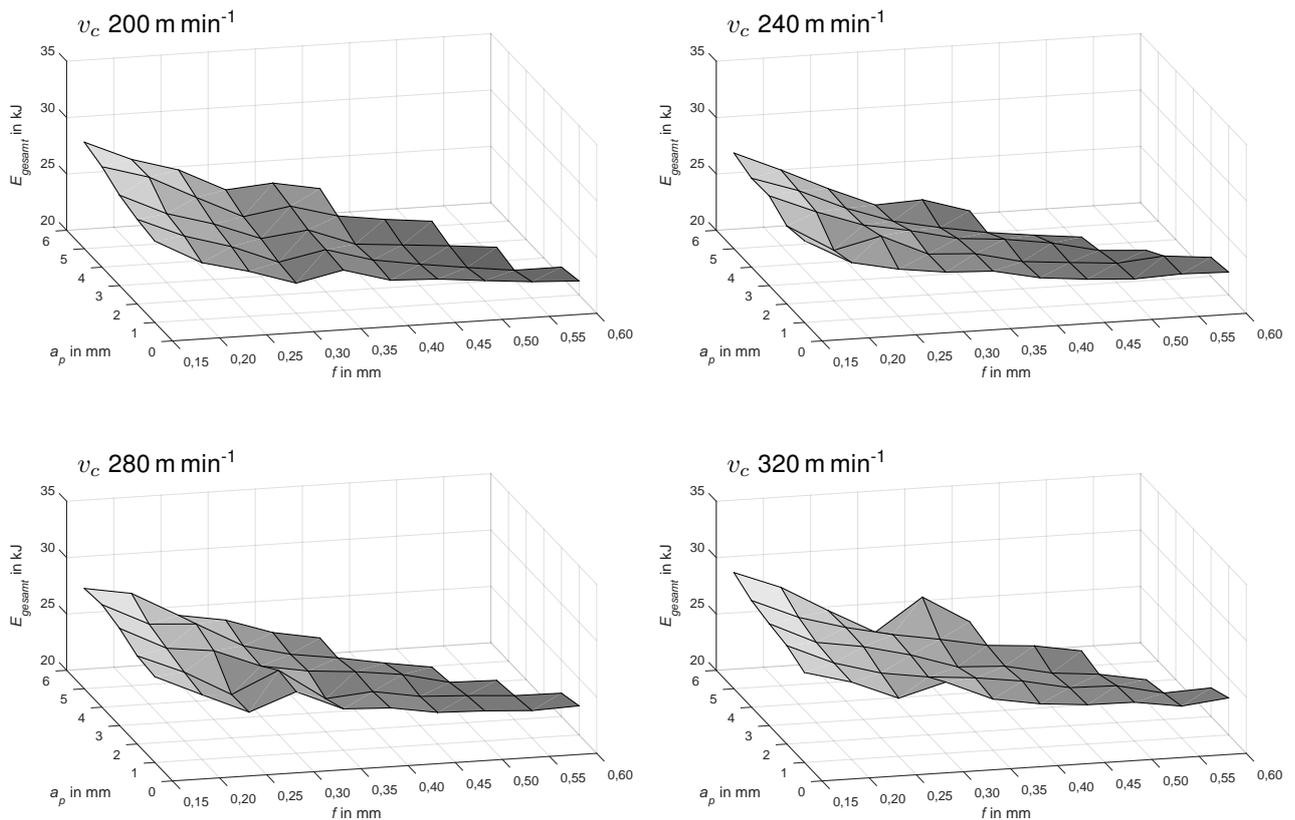


Abbildung 5.2.19: Energiebedarf 18CrNi8 (Standard) Parametervariation bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei beiden Einsatzstahlvarianten 18CrNi8 (Standard) und 18CrNi8 (ESU) kann kein signifikanter Unterschied bei den aufgezeichneten Schnittkräften festgestellt werden. Der Übergang von Fließ- zu Scherspan hat beim 18CrNi8 (ESU) die deutlichste Auswirkung auf die Bearbeitbarkeit. Bei der Schnitttiefe a_p 5 mm entstehen bei allen Vorschubwerten im Prozess unbrauchbare Fließspäne. Bei der Schnitttiefe a_p 4 mm entstehen nur außerhalb der vom Wendeschneidplattenhersteller empfohlenen Schnittparameter Scherspäne. Der Werkstoff 18CrNi8 (ESU) zeigt beim Längsdrehen das schlechteste Verhalten.

Abbildung 5.2.20 zeigt den Energiebedarf in Abhängigkeit der Parametervariation bei den vier gewählten Schnittgeschwindigkeiten 200, 240, 280 und 320 m min^{-1} für den Werkstoff 18CrNi8 (ESU).

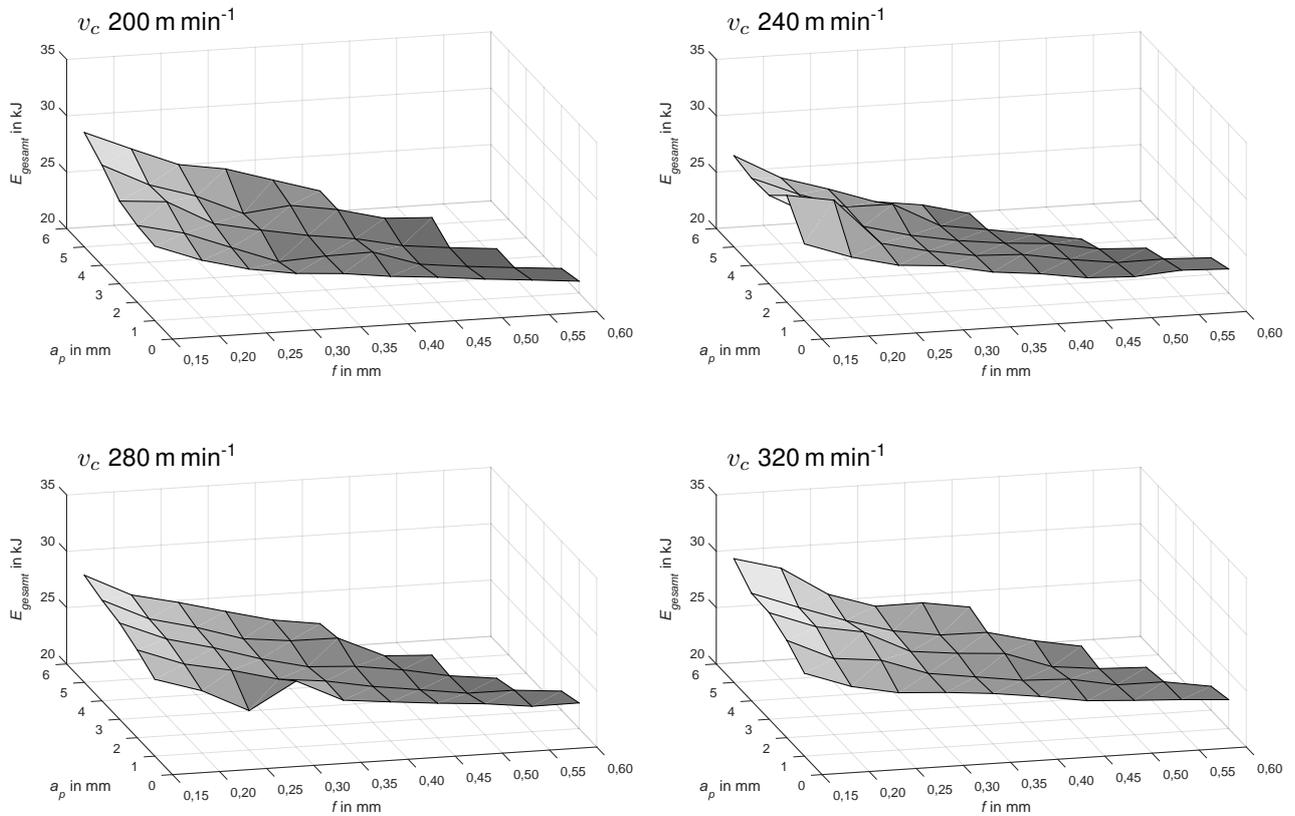


Abbildung 5.2.20: Energiebedarf 18CrNi8 (ESU) Parametervariation bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch die im Prozess unbrauchbaren Fließspäne verkleinert sich das Prozessfenster der Bearbeitbarkeit beim 18CrNi8. Wie auch beim Vergütungsstahl verschiebt sich das Prozessfenster des ESU-Werkstoffs hin zu höheren Vorschüben (Abbildung 5.2.21). Unter Einbeziehung des Energiebedarfs ist das verschobene Prozessfenster auch beim Einsatzstahl positiv zu bewerten.

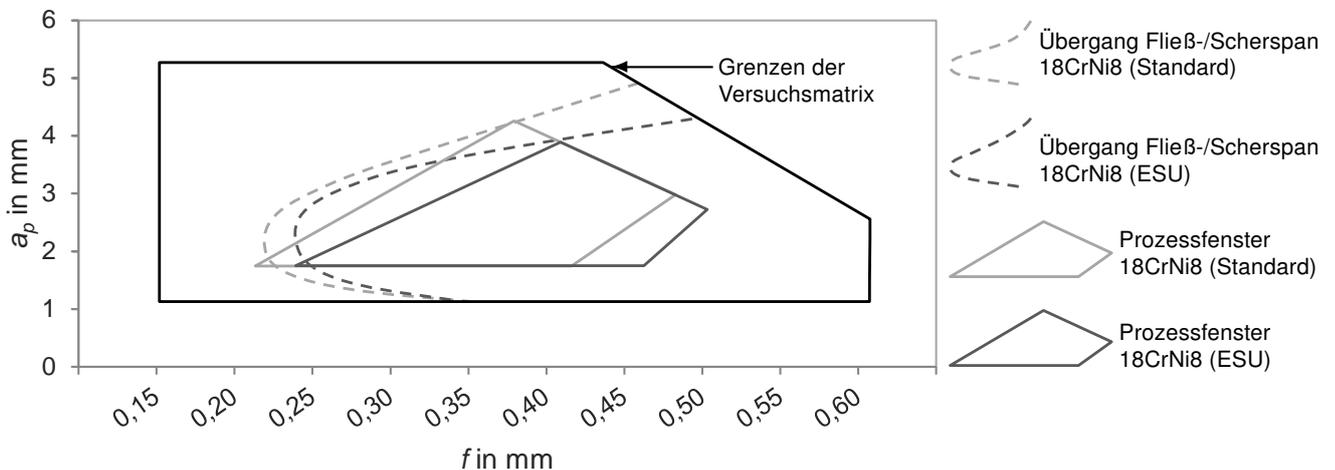


Abbildung 5.2.21: Bearbeitungsgrenzen 18CrNi8, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.3 Ermittlung des Einflusses der Werkzeugstandzeit

Bei der Ermittlung des Einflusses der Werkzeugstandzeit beim Tiefbohren werden die gleichen Werkstoffe wie bei den Drehversuchen untersucht. Die aufgenommenen Messdaten sind die Vorschubkraft, das Moment an der Spindel und die Ströme und Spannungen der Hauptspindel und des Vorschubantriebs zur Berechnung der Leistungsaufnahme.

Bohrversuche

Die Bohrversuche mit den Werkstoffen 42CrMo4 (Standard) im Vergleich zu 42CrMo4 (ESU) und 18CrNi8 (Standard) im Vergleich zu 18CrNi8 (ESU) werden auf einem vertikalen 5-Achs-Bearbeitungszentrum HERMLE C50 U im Zerspanungslabor AEC der Firma TCM in Stainz durchgeführt. Als Kühlmedium wird eine Wasser-Öl Emulsion mit einem Ölgehalt von acht Prozent verwendet. Für die Bohrversuche werden Probenkörper mit Durchmesser 40 mm und 150 mm Länge verwendet. Die Werkstoffproben werden stirnseitig mit Bohrungen versehen. Eine Bohrung ist zentrisch angeordnet, zwölf Bohrungen liegen auf dem äußeren Bohrungskreis mit Durchmesser 30 mm und sechs Bohrungen liegen auf dem mittleren Bohrungskreis mit Durchmesser 15 mm (Abbildung 5.2.22).

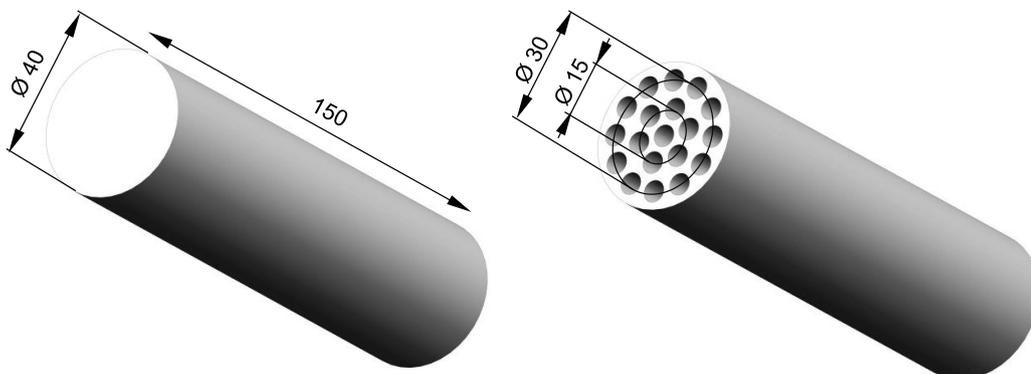
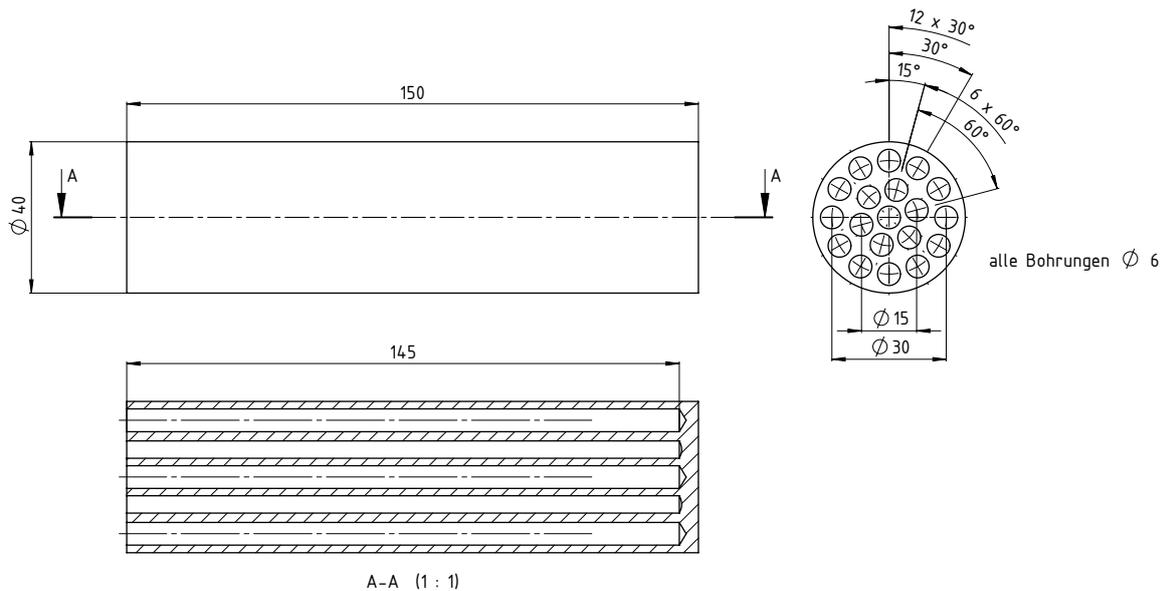


Abbildung 5.2.22: Zeichnung und 3D-Ansicht der Bohrprobe, Quelle: Eigene Darstellung.

In eine Werkstoffprobe können neunzehn Bohrungen eingebracht werden, was einer gesamten Bearbeitungslänge von 2,75 m entspricht. Für die Bearbeitung einer Werkstoffprobe wird jeweils ein neuer Einlippenbohrer verwendet. Der Verschleiß der Schneiden am Einlippenbohrer wird mit Hilfe eines Werkzeugeinstell- und Messgeräts der Firma Zoller fotografisch dokumentiert.

Vor dem Beginn der Messungen werden neunzehn Pilotbohrungen mit Durchmesser 6,03 mm und Tiefe 15 mm in die Probe eingebracht, um den bei den Messungen verwendeten Einlippenbohrer beim Einfädeln im Bohrprozess zu führen. Der Einlippenbohrer, der in einem 4-Komponenten-Dynamometer Typ 9123C1011 der Firma Kistler eingespannt ist, wird manuell eingewechselt.

Für alle vier Werkstoff werden die Versuche bei der vom Bohrerhersteller empfohlenen Schnittgeschwindigkeit v_c von 70 m min^{-1} und der Vorschubgeschwindigkeit v_f von 70 mm min^{-1} durchgeführt.

Der Prozessablauf beim Bohren mit dem Einlippenbohrer ist folgender:

- Positionieren Z 5 mm über dem Werkstück und der Bohrposition;
- Spindel startet;
- Kühlmittel ein;
- Einfädeln in die Pilotbohrung mit n_z 300 min^{-1} ;
- Ab Z –10 mm bis Z –145 mm Bohren mit Schnittparametern des jeweiligen Versuchs;
- Bei Erreichen von Z –145 mm 2 s Verweilzeit;
- Ausfädeln mit n_z 300 min^{-1} ;
- Kühlmittel aus;
- Spindel stoppt;
- Bohrerverschleiß überwachen und gegebenenfalls dokumentieren;
- Späne des Bohrversuchs sammeln und dokumentieren.

Abbildung 5.2.23 zeigt den Energiebedarf der Spindel und des Vorschubantriebs beim Tiefbohren der Vergütungsstähle über die neunzehn Bohrungen. Beim Standardwerkstoff 42CrMo4 bleibt der Energiebedarf bei allen durchgeführten Bohrungen konstant. Beim 42CrMo4 (ESU) ist der Energiebedarf der Spindel etwas höher und steigt über die ersten vier Bohrungen an. Von der 5. -19. Bohrung bleibt der Energiebedarf auf dem erhöhten Niveau.

Abbildung 5.2.24 zeigt den Mittelwert und die Standardabweichung des Moments und der Vorschubkraft pro Bohrung. An Hand dieser Darstellung wird das Zerspanungsverhalten über den Bohrweg sichtbar. Es zeigt sich, dass das Moment bei 42CrMo4 (ESU) über die ersten vier Bohrungen ansteigt. Das Niveau der Kraft und des Moments liegt für 42CrMo4 (ESU) über dem des Referenzwerkstoffs 42CrMo4 (Standard). Der Vergleich des Energiebedarfs mit den Kräften und Momenten zeigt, dass die Veränderung der Vorschubkraft, die von der Spindel erzeugt wird, nicht im Energiebedarf ersichtlich ist. Die Veränderung des Moments zeigt sich in geringem Ausmaß im Energiebedarf der Spindel.

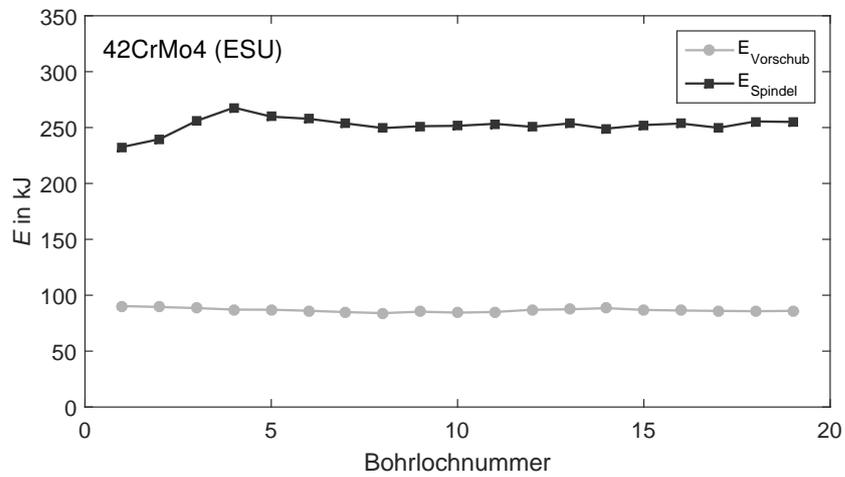
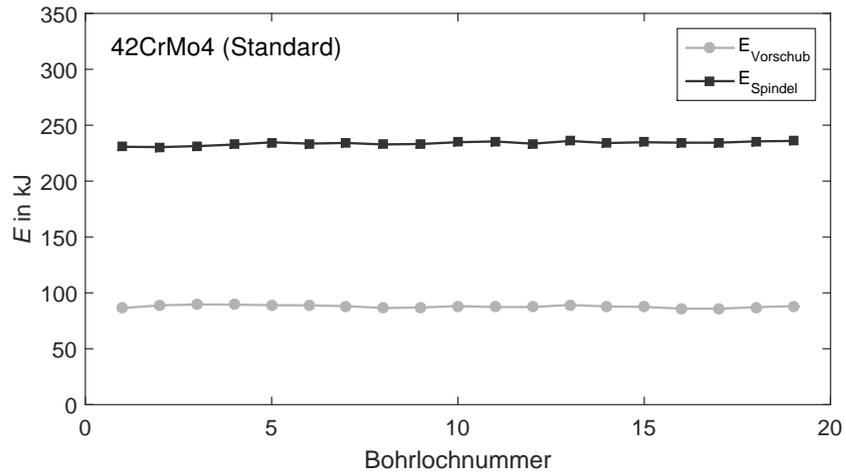


Abbildung 5.2.23: Energiebedarf Tiefbohren 42CrMo4, Quelle: Eigene Darstellung.

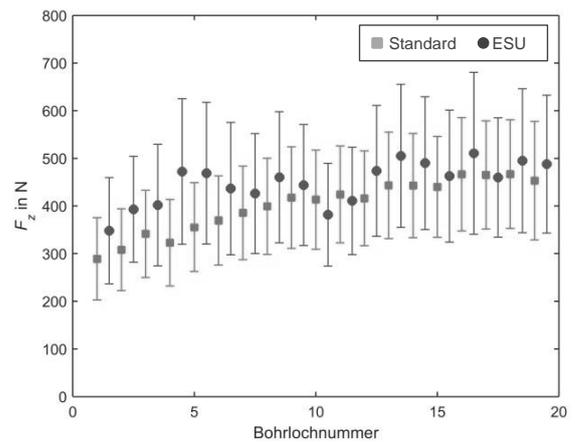
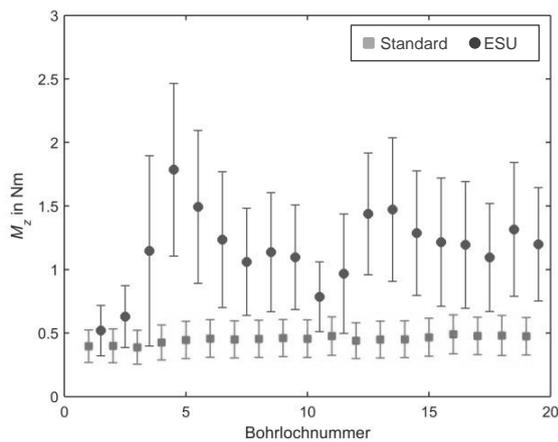


Abbildung 5.2.24: Mittelwert und Standardabweichung des Moments und der Vorschubkraft 42CrMo4, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Untersuchung des Bohrerverschleißes zeigt, dass beim 42CrMo4 (ESU) die Führungsfase des Einlippenbohrers während der ersten Bohrungen beschädigt wird. In Abbildung 5.2.25 ist der unterschiedliche Verschleiß des Einlippenbohrers ersichtlich. Die Beschädigung der Führungsfase bei der Bearbeitung des 42CrMo4 (ESU) ist bereits nach der 3. Bohrung auf den Fotos ersichtlich. Über die weiteren Bohrungen nimmt der Verschleiß zu.

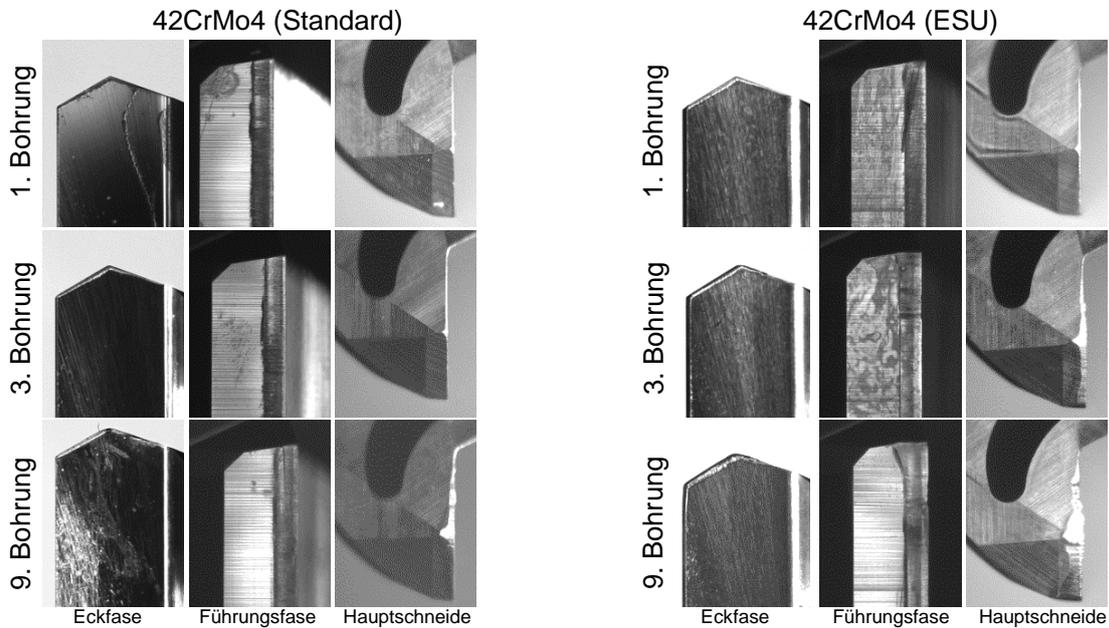


Abbildung 5.2.25: Bohrerverschleiß 42CrMo4, Quelle: Eigene Darstellung.

Dadurch entstehen die deutlichen Schwankungen des Moments im circa 120 Sekunden dauernden Bohrprozess. Beim 42CrMo4 (Standard) bleibt der Momentenverlauf über die durchgeführten Bohrungen gleich. Abbildung 5.2.26 links zeigt den Momentenverlauf für die 1., die 7. und die 8. Bohrung im Werkstoff 42CrMo4 (Standard). Im Vergleich dazu sieht man in Abbildung 5.2.26 rechts den Momentenverlauf für die 1., die 7. und die 8. Bohrung im Werkstoff 42CrMo4 (ESU) mit dem erhöhten Niveau und den größeren Schwankungen. Der neue Werkstoff 42CrMo4 (ESU) ist beim Tiefbohren mit den gewählten Parametern nicht bearbeitbar.

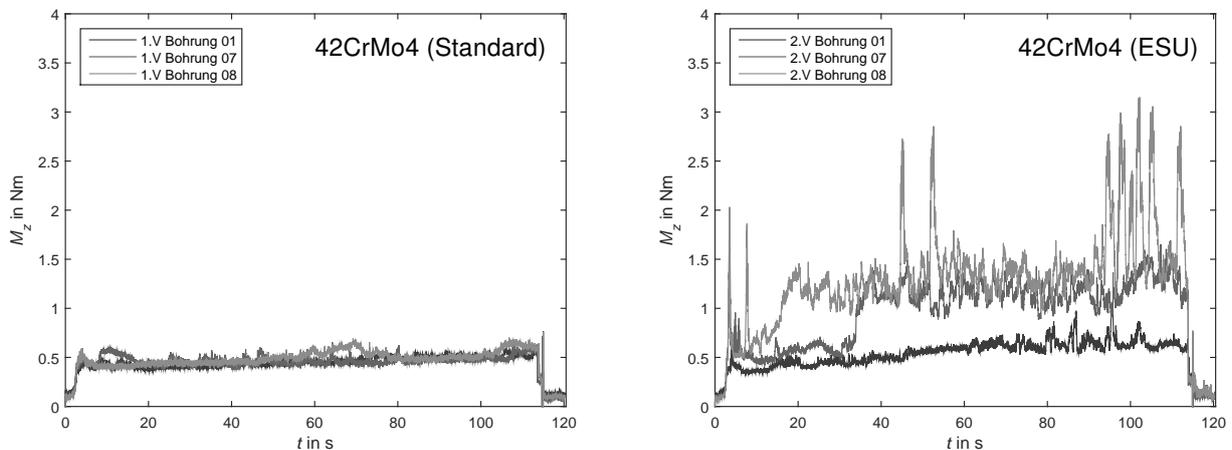


Abbildung 5.2.26: Verlauf des Moments beim Tiefbohren 42CrMo4, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.2.27 zeigt den Energiebedarf der Spindel und des Vorschubantriebs beim Tiefbohren der Einsatzstähle über die neunzehn Bohrungen. Der Energiebedarfs ist bei beiden Werkstoffen ähnlich und das Niveau bleibt über die neunzehn Bohrungen gleich. Der Vergleich mit den Mittelwerten und Standardabweichungen des Moments und der Vorschubkraft in Abbildung 5.2.28 zeigt, dass es beim Moment keine deutliche Änderung über die Anzahl der Bohrungen gibt. Die über die Versuche ansteigende Vorschubkraft ist nicht im Energiebedarf ersichtlich.

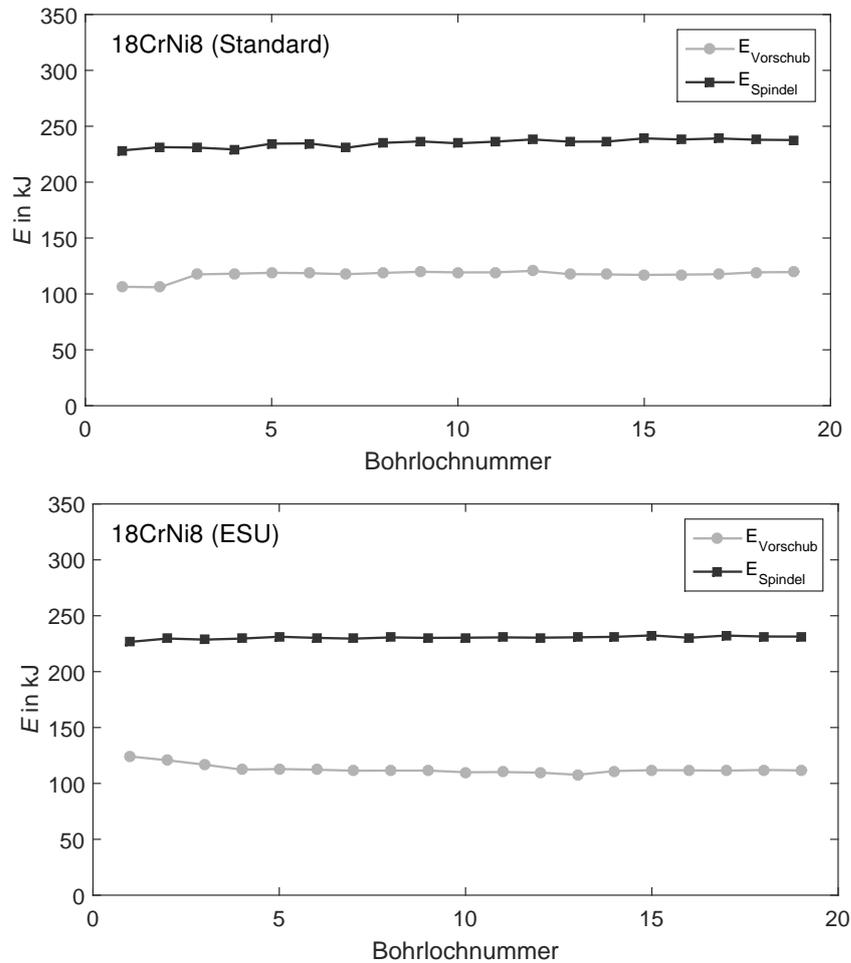


Abbildung 5.2.27: Energiebedarf Tiefbohren 18CrNi8, Quelle: Eigene Darstellung.

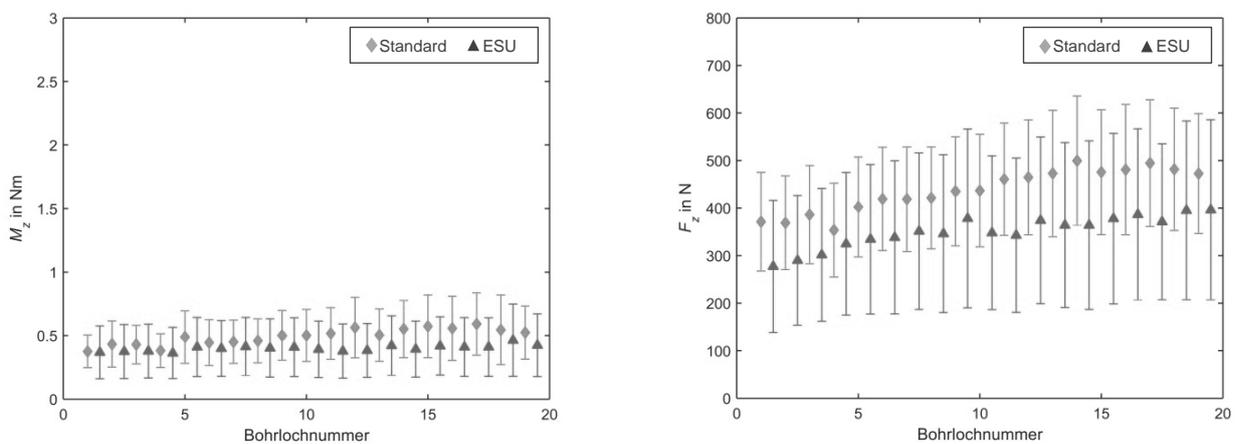


Abbildung 5.2.28: Mittelwert und Standardabweichung des Moments und der Vorschubkraft 18CrNi8, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Untersuchung der Schneiden des Einlippenbohrers zeigt einen deutlichen Verschleiß und die Bildung einer Aufbauschneide beim 18CrNi8 (ESU). Abbildung 5.2.29 zeigt den unterschiedlichen Bohrererschleiß bei der Bearbeitung der beiden Werkstoffe. Der Verschleiß beim 18CrNi8 (ESU) ist deutlich geringer als beim Referenzwerkstoff 18CrNi8 (Standard). An Hand der Verschleißbilder lässt sich das höhere Niveau der Vorschubkraft beim 18CrNi8 (Standard) erklären. Auf den geringen Verschleiß an der Führungsfase bei beiden Werkstoffen lässt sich das gleichbleibende Niveau des Moments zurückführen.

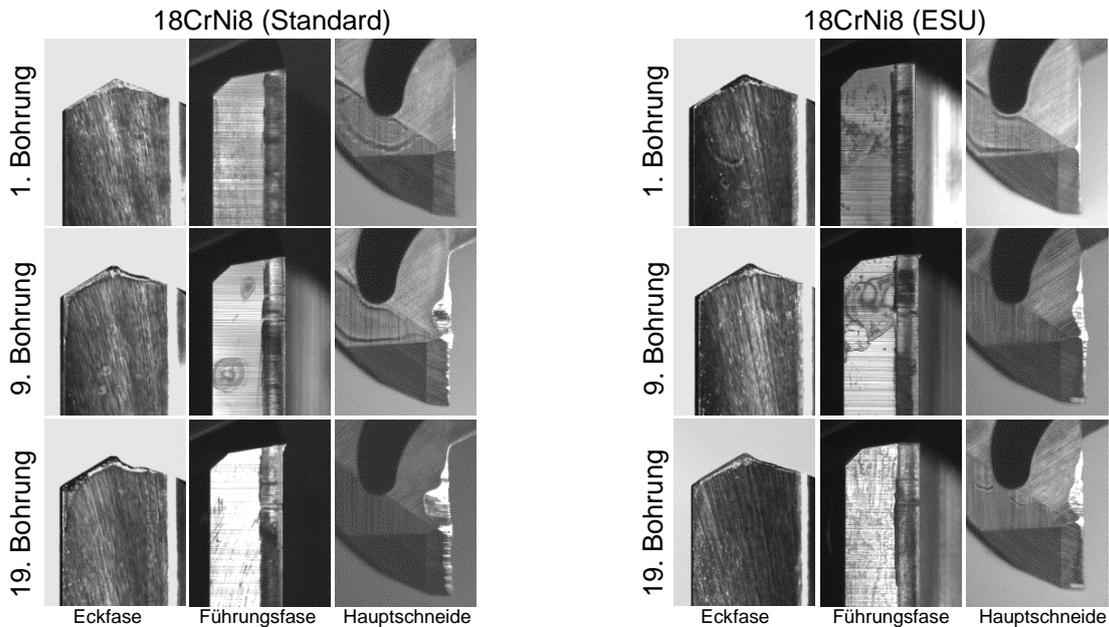


Abbildung 5.2.29: Bohrererschleiß 18CrNi8, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.2.30 links zeigt den Verlauf der Vorschubkraft für die 1. und die 19. Bohrung beim Tiefbohren des 18CrNi8 (Standard). Das niedrigere Niveau des Kraftverlaufs beim 18CrNi8 (ESU) ist zum Vergleich in Abbildung 5.2.30 rechts zu sehen. Die Bearbeitbarkeit des neuen Werkstoffs 18CrNi8 (ESU) beim Tiefbohren ist somit gegeben. Der Energiebedarf für die Zerspanung ist gleich wie beim Referenzwerkstoff. Die Werkzeugstandzeit von 2,75 m kann durch eine Veränderung der Schneidengeometrie und die Verwendung von Bohröl erhöht werden.

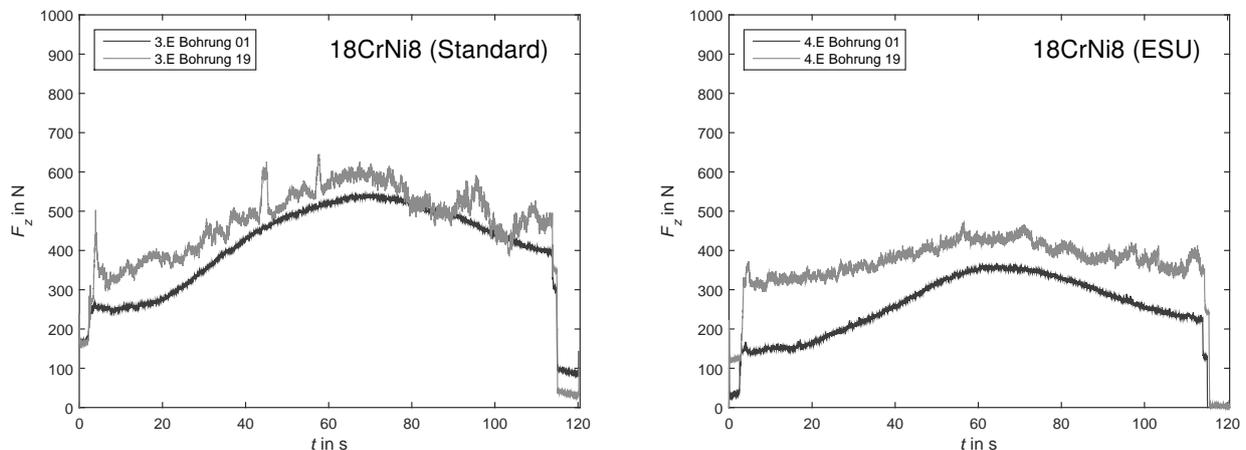


Abbildung 5.2.30: Verlauf der Vorschubkraft beim Tiefbohren 18CrNi8, Quelle: Eigene Darstellung.

Schlussbetrachtung Analyse des Energiebedarfs

Die durchgeführten Versuche legen die Vielseitigkeit der untersuchten Werkzeugmaschinen und Fertigungsprozesse dar. Abbildung 5.2.31 zeigt schematisch die Verwendung der elektrischen Energie im Zerspanungsprozess. Sie wird eingesetzt, um verschiedenste Bewegungen zu realisieren. Das Werkzeug und das Werkstück werden angetrieben, die Späne werden abtransportiert und der Kühlschmierstoff wird zugeführt. Bei neuen Zerspanungstechnologien, wie der schwingungsunterstützten Zerspanung, der kryogenen Zerspanung oder der laserunterstützten Zerspanung, werden Schwingungsenergie oder Wärme in den Zerspanungsprozess eingebracht, um die Zerspanung zu verbessern oder zu ermöglichen. Bei jeder Energiewandlung sind die systemspezifischen Wirkungsgrade zu berücksichtigen. Die eingebrachte Energie wird für die Auftrennung des Stoffschlusses benötigt, um die gewünschte Geometrie des Produktes zu erhalten. Es entsteht Wärme, die abgeführt werden muss. Dies geschieht über den Kühlschmierstoff, dem im Wärmetauscher die Wärme entzogen wird und über die Späne, die abtransportiert werden.

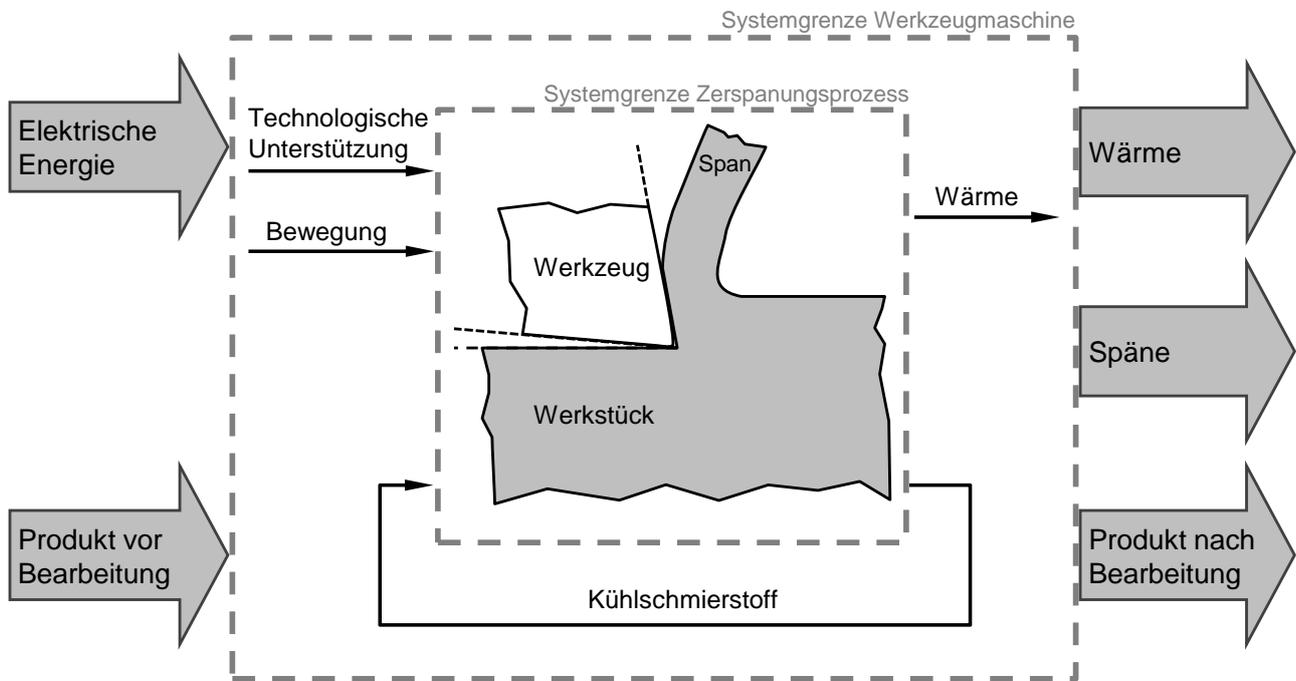


Abbildung 5.2.31: Nutzung elektrischer Energie im Zerspanungsprozess, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5.2.14 zeigt die im Zerspanungsprozess vorkommenden Energieformen.

Energiezufuhr	Energieformen im Prozess	Energieabfuhr
$E_{el} = U \cdot I \cdot t$	$E_{kin} = \frac{1}{2}m \cdot v^2$ $E_{mech} = F \cdot s$ $E_{schwing} = E_{kin} + E_{pot}$ $= \frac{1}{2}D \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega t) + \frac{1}{2}D \cdot A^2 \cdot \sin^2(\omega t)$ $E_{fluid} = p \cdot V$	$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$

Tabelle 5.2.14: Energieformen im Zerspanungsprozess, Quelle: Eigene Darstellung.

6 Kenngrößen der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung

Im Vergleich zu den Labelssystemen für den Verbrauchermarkt mit derzeit dreizehn produktgruppenspezifischen EU-Verordnungen sind für Werkzeugmaschinen und Produktionsanlagen Bewertungsgrundlagen nicht auf gleiche Weise definierbar. Die Vergleichbarkeit wird durch die Varianz der Maschinen hinsichtlich Bearbeitungsraum, Drehzahl und Drehmoment, Achsenanzahl, Fertigungsverfahren, Anschlussleistung, Fertigungsgenauigkeit und weiteren Einflussgrößen beeinflusst. Die durchgeführten Versuche zeigen sowohl die vielseitigen Einflüsse auf den Energiebedarf, als auch Prozessparameter, die kaum einen Einfluss auf den Energiebedarf haben.

Die Beachtung des Produktionsfaktors Energie ist bisher nicht im vergleichbaren Maße mit Kenngrößen belegt wie die Bereiche Qualität, Kosten oder Produktionsmenge. Auf Unternehmensebene werden bereits absolute Kennzahlen wie der Jahresenergieverbrauch oder relative Kennzahlen wie der Energieverbrauch bezogen auf den Umsatz oder der Energieverbrauch bezogen auf die Produktionsstückzahlen von einzelnen Unternehmen erhoben und veröffentlicht. Daraus lassen sich übergeordnete Ziele für kommende Zeitperioden ableiten, jedoch ermöglichen diesen Kennzahlen nicht unmittelbar die Identifikation der möglichen Verbesserungsmaßnahmen für eine gesteigerte Effizienz.

Für eine verbesserte Energienutzung und eine damit verbundene höhere Energieeffizienz in der spanenden Fertigung ist die systematische Analyse des Energiebedarfs eine notwendige Voraussetzung. Die Kenntnis der Einflussfaktoren, unter der Prämisse des ressourcenschonenden Umgangs mit Produktionsmitteln, ermöglicht die erfolgreiche Realisierung von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz. Kenngrößen, die aus messtechnisch erfassten Leistungsverläufen ermittelt werden, geben die Möglichkeit den Energiebedarf zum Produktionsablauf in ein Verhältnis zu setzen. Die verwendeten Werkzeugmaschinen und die Prozessparameter fließen über den betrachteten Produktionsablauf in die Kenngrößen ein. Basierend auf den durchgeführten Versuchen und Messungen, entsprechend der Kapitel 5.1 und 5.2, wird die Ermittlung der Kenngrößen der Energieeffizienz im Folgenden in zwei Unterkapitel aufgeteilt und beschrieben.

In Kapitel 6.1 wird die Beurteilung von Maschinen und Anlagen an Hand von Kenngrößen aufgezeigt. Aussagen zur Komponenteneffizienz sind mit dem weiter entwickelten Retrofit Faktor möglich. Der Vergleich von Maschinen und Anlagen erfolgt über die spezifische Maschinenenergie.

In Kapitel 6.2 wird die Beurteilung von spanenden Fertigungsprozessen an Hand von Kenngrößen beschrieben. Aussagen zur Prozesseffizienz und der Vergleich von Prozessen sind an Hand dieser Kenngrößen möglich.

6.1 Ermittlung von Kenngrößen der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen

Basierend auf den Versuchen in Kapitel 5.1 werden Kenngrößen der Energieeffizienz für Werkzeugmaschinen erarbeitet. Die Komponenteneffizienz als dimensionslose Kenngröße und die Maschineneffizienz als bezogene Kenngröße werden im Folgenden beschrieben.

6.1.1 Retrofit Faktor IFT

Mit der am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung der ETH Zürich entwickelten Methode zur Bestimmung der Retrofit Faktoren $I_{R,i}$ der Komponenten einer Werkzeugmaschine (siehe Kapitel 3.3.2) wird am Institut für Fertigungstechnik der TU Graz ein CNC-Bearbeitungszentrum EMCO Hyperturn 665MCPlus (siehe Kapitel 4.1) untersucht.

Analysiert wurden 13 Komponenten des CNC-Bearbeitungszentrums EMCO Hyperturn 665MCPlus. Für jede Werkzeugmaschinenkomponente i wurde die Berechnung des Gewichtungsfaktors Energieanteil $A_{E,i}$, des Gewichtungsfaktors Lastkollektiv $A_{0,i}$ und des Retrofit Faktors $I_{R,i}$ durchgeführt. Tabelle 6.1.1 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung.⁵² Die Gesamtenergie, die zur Bearbeitung des Testwerkstücks benötigt wird, ist 2527,2 kJ. Der nicht zugeordnete Energieverbrauch von 770,4 kJ entsteht durch Relais, Schütze und Steuerungen im Schaltschrank, die nicht in den Einzelmessungen erfasst werden.

Komponente	Energiebedarf E_i in kJ	Gew.-faktor Energieanteil $A_{E,i}$	Gew.-faktor Lastkollektiv $A_{0,i}$	Retrofit Faktor $I_{R,i}$
Frässpindel	14,4	0,006	0,630	0,36
Hydraulikpumpe	262,8	0,104	0,378	3,74
B-Achse	7,2	0,003	0,786	0,22
Werkzeugmagazin	10,8	0,004	0,334	0,14
Kühlmittelpumpe (Werkzeugwender)	165,6	0,066	0,720	4,72
Kühlmittelpumpe (Frässpindel)	144,0	0,057	0,791	4,51
Hauptspindel	759,6	0,301	0,810	24,36
X2-Achse	50,4	0,020	0,608	1,21
Z2-Achse	36,6	0,014	0,808	1,15
Kühlaggregat	187,2	0,074	0,970	7,18
Werkzeugwechsler	18,0	0,007	0,937	0,67
X1-Achse	57,6	0,023	0,023	0,05
Z1-Achse	43,2	0,017	0,788	1,35
Energiebedarf Komponenten	1756,8			
Energiebedarf ohne Zuordnung	770,4			
Gesamtenergiebedarf	2527,2			

Tabelle 6.1.1: Energiebedarf der Werkzeugmaschinenkomponenten und deren Retrofit Faktoren, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵²Vgl. Redecker, Haas und Schmiedhofer, 2014, S.435f.

Bei der Auswertung der Messungen ist aufgefallen, dass es bei der Ermittlung des Gewichtungsfaktors Lastkollektiv $A_{0,i}$ zu gleichen Werten kommen kann, obwohl der Energiebedarf unterschiedlich ist. Abbildung 6.1.1 zeigt beispielhaft, dass zwei Komponenten, die eine unterschiedliche Leistungsverteilung haben, die selbe Regressionsgerade haben können.

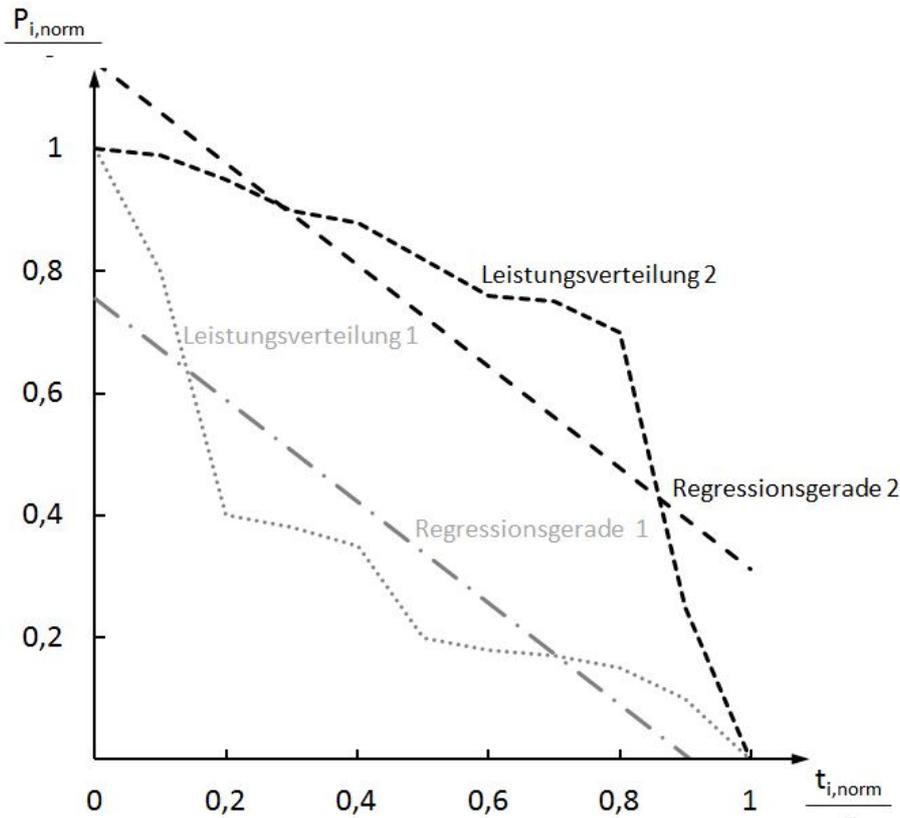


Abbildung 6.1.1: Problematik bei der Ermittlung, Quelle: Eigene Darstellung.

Eine weitere Problematik ist die Logik, der zur Berechnung verwendeten Faktoren.

Der Wertebereich des Faktors $A_{E,i}$ ist 0 - 1:

Der Wert 0 bedeutet *nicht zu beachten* und der Wert 1 bedeutet *zu beachten*.

Der Wertebereich des Faktors $A_{0,i}$ ist 0 - 1:

Der Wert 0 bedeutet *zu beachten* und der Wert 1 bedeutet *nicht zu beachten*.

Die Wertelogik der beiden Faktoren ist gegensätzlich und durch ihre Multiplikation bekommt der Retrofit Faktor I_R keine deutliche Aussagekraft. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Ansatz entwickelt, um die identifizierten Schwachstellen zu beheben.⁵³ Um die Berechnung des Gewichtungsfaktors $A_{0,i}$ zu verbessern wird anstatt der Winkel der Regressionsgeraden die Fläche unter der Funktion zur Berechnung herangezogen. Dies lässt sich mathematisch mit den im Folgenden beschriebenen Schritten darstellen.

Die normierte Leistung $P_{i,norm}$ wird gemäß Gleichung 6.1.1 in $P_{i,norm,trans}$ transformiert.

$$P_{i,norm,trans}(t_{i,norm}) = 1 - P_i(t_{i,norm}) \quad (6.1.1)$$

⁵³Vgl. Redecker, Schmiedhofer und Brillinger, 2014, S.153ff.

Die transformierte normierte Leistung $P_{i,norm,trans}$ wird gemäß Gleichung 6.1.2 durch eine Potenzfunktion $P_{i,Potenz}$ angenähert.

$$P_{i,Potenz}(t_{i,norm}, n) = t_{i,norm}^n \quad n \in \mathbb{R} \quad (6.1.2)$$

Der Exponent der Funktion, die Variable n , wird mit den nächsten Schritten ermittelt. Gleichung 6.1.3 beschreibt die eingeschlossene Fläche zwischen der transformierten normierten Leistung $P_{i,norm,trans}$ und der Potenzfunktion $P_{i,Potenz}$.

$$W(n) = \int_0^1 |P_{i,norm,trans} - P_{i,Potenz}| dt_{i,norm} \quad (6.1.3)$$

Mit den Randbedingungen aus 6.1.4 erhält man die minimale Fläche durch die Variation des Exponenten n . Das Ergebnis ist der charakteristische Exponent n_c .

$$\frac{dW(n)}{dn} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d^2W(n)}{dn^2} > 0 \quad (6.1.4)$$

Abbildung 6.1.2 zeigt die Potenzfunktionen für zwei Komponenten, die mit der beschriebenen Vorgehensweise ermittelt werden. Der Abstand zwischen der Leistungsverteilung und der Potenzfunktion wird minimiert.

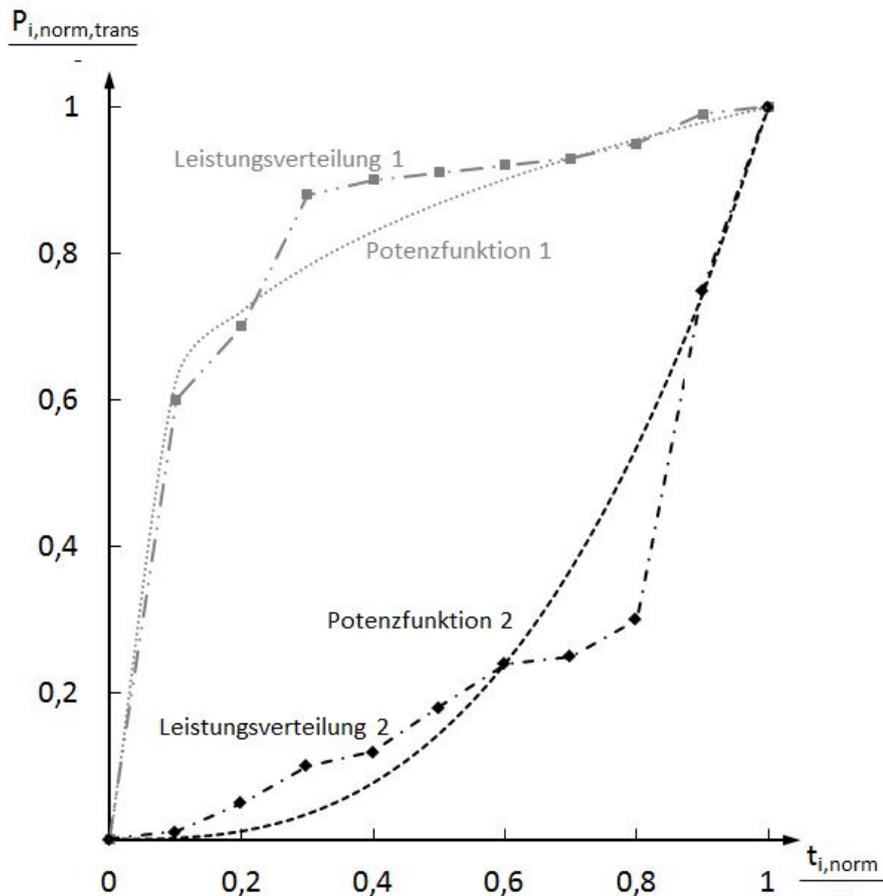


Abbildung 6.1.2: Neue Ermittlungsmethodik, Quelle: Eigene Darstellung.

Der nächste Schritt ist die Berechnung der für die Komponente der Werkzeugmaschine charakteristischen Fläche $A_{c,i}$ unter der Kurve.

$$A_{c,i} = \int_0^1 t_{i,norm}^{n_c} \cdot dt_{i,norm} \quad (6.1.5)$$

Das berechnete Integral führt zu Gleichung 6.1.6 mit n_c als charakteristischem Exponenten.

$$A_{c,i} = \frac{t_{i,norm}^{n_c+1}}{n_c + 1} \Big|_{t_{i,norm}=0}^{t_{i,norm}=1} = \frac{1}{n_c + 1} \quad (6.1.6)$$

Der letzte Schritt ist die Berechnung des neuen Lastkollektivfaktors $A_{0,i}$.

$$A_{0,i} = 1 - A_{c,i} = \frac{n_c}{n_c + 1} \quad (6.1.7)$$

Eine konstant ausgelastete Komponente erhält somit einen Lastkollektivfaktor $A_{0,i} = 0$ und eine ungleichmäßig ausgelastete Komponente im schlechtesten Fall einen Lastkollektivfaktor $A_{0,i} = 1$. Mit der beschriebenen Methode kann ein aussagekräftiger Lastkollektivfaktor $A_{0,i}$ ermittelt werden und die Retrofit Faktoren $I_{R,i}$ für die Komponenten einer Werkzeugmaschine berechnet werden. Diese neue Methode wird im Folgenden für vier Leistungskurven angewendet (Abbildung 6.1.3).

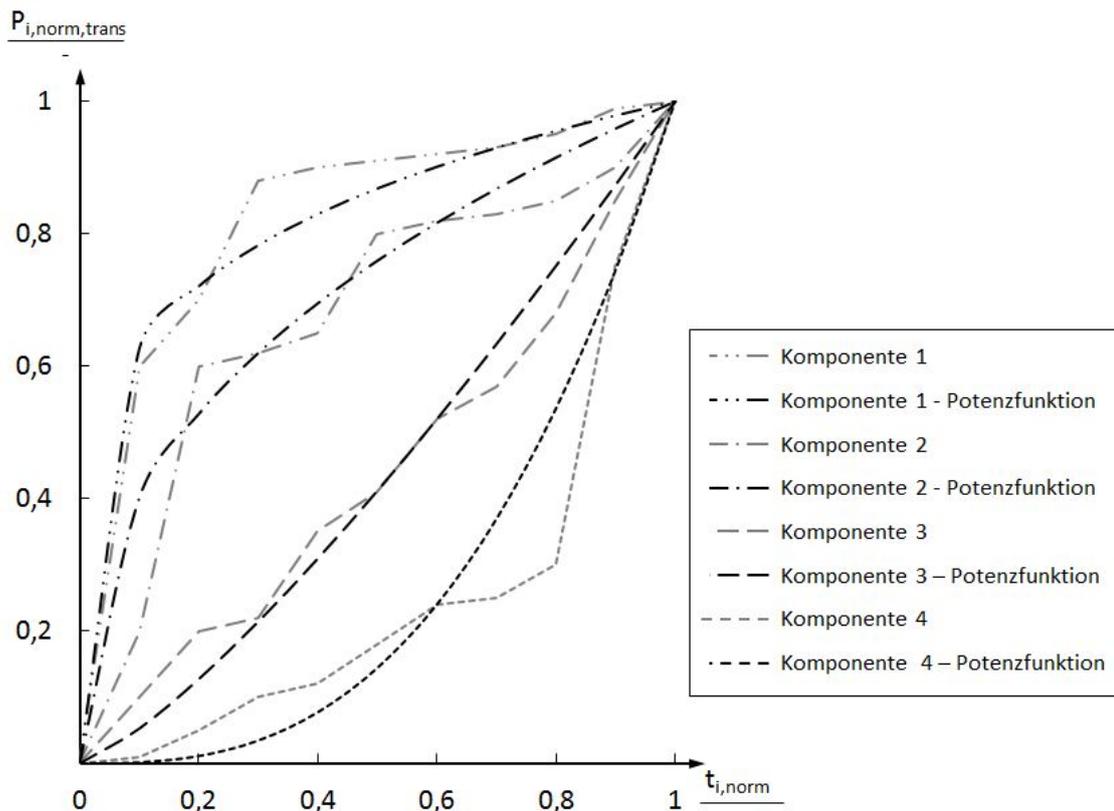


Abbildung 6.1.3: Beispiel für neue Ermittlungsmethodik, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 6.1.2 vergleicht die Ergebnisse der beiden Berechnungsmethoden des Lastkollektivfaktors $A_{0,i}$. Bei der neu entwickelten Methode sind die Komponenten gemäß der der Auslastung gereiht. Damit bekommt der Lastkollektivfaktor $A_{0,i}$ eine Wertelogik entsprechend dem Gewichtungsfaktor für den Energieanteil $A_{E,i}$.

Berechnungsmethode	Komponente			
	1	2	3	4
ETH: $A_{0,i} = \frac{90^\circ - \alpha_i }{90^\circ}$	0,57	0,47	0,40	0,47
IFT: $A_{0,i} = \frac{n_c}{n_c+1}$	0,17	0,29	0,56	0,73

Tabelle 6.1.2: Vergleich der Berechnungsmethoden, Quelle: Eigene Darstellung.

In Tabelle 6.1.3 werden für die 13 untersuchten Werkzeugmaschinenkomponenten der Gewichtungsfaktor Lastkollektiv $A_{0,i}$ und der Retrofit Faktor $I_{R,i}$ neu berechnet. Die Gewichtungsfaktoren $A_{E,i}$ und $A_{0,i}$ geben als Kenngrößen Hinweise zum Anteil am Gesamtenergiebedarf und zur Leistungsverteilung der Komponente beim betrachteten Bearbeitungsvorgang. Der Retrofit Faktor $I_{R,i}$ ist die zusammengefasste Kenngröße für die Komponenteneffizienz beim betrachteten Bearbeitungsvorgang.

Komponente	Energiebedarf Komponente E_i in kJ	Gew.-faktor Energieanteil $A_{E,i}$	Gew.-faktor IFT Lastkollektiv $A_{0,i}$	Retrofit Faktor IFT $I_{R,i}$
Frässpindel	14,4	0,006	0,849	0,48
Hydraulikpumpe	262,8	0,104	0,735	7,65
B-Achse	7,2	0,003	0,933	0,27
Werkzeugmagazin	10,8	0,004	0,768	0,33
Kühlmittelpumpe (Werkzeugwender)	165,6	0,066	0,896	5,87
Kühlmittelpumpe (Frässpindel)	144,0	0,057	0,930	5,30
Hauptspindel	759,6	0,301	0,936	24,12
X2-Achse	50,4	0,020	0,884	1,76
Z2-Achse	36,6	0,014	0,948	1,35
Kühlaggregat	187,2	0,074	0,006	0,04
Werkzeugwechsler	18,0	0,007	0,983	0,70
X1-Achse	57,6	0,023	0,757	1,73
Z1-Achse	43,2	0,017	0,940	1,61

Tabelle 6.1.3: Energiebedarf der Werkzeugmaschinenkomponenten und deren Retrofit Faktoren neu, Quelle: Eigene Darstellung.

6.1.2 Spezifische Maschinenenergie

Um verschiedene Werkzeugmaschinen miteinander zu vergleichen, wird der Energiebedarf in ein Verhältnis zu einer Bemessungsgrundlage gesetzt. Somit erhält man eine spezifische Maschinenenergie. In der spanenden Fertigung, kann das Volumen der Zerspanung als Bemessungsgrundlage verwendet werden. Die spezifische Maschinenenergie $E_{M,spez}$ errechnet sich gemäß Gleichung 6.1.8 aus dem Energiebedarf der Werkzeugmaschine E_{gesamt} bezogen auf das Volumen der Zerspanung V .

$$E_{M,spez} = \frac{E_{gesamt}}{V} \quad (6.1.8)$$

Tabelle 6.1.4 zeigt die Auswertung der durchgeführten Versuche zum Vergleich von zwei Werkzeugmaschinen aus Kapitel 5.1.3. Für die beiden untersuchten Werkzeugmaschinen wird der gesamte Energiebedarf E_{gesamt} je Bearbeitungsstufe und der Energiebedarf für die Zerspanung $E_{Zerspanung}$ aus den Messdaten ermittelt. Die spezifische Maschinenenergie $E_{M,spez}$ wird je Bearbeitungsstufe berechnet.

Stufe	Energiebedarf gesamt E_{gesamt} in kJ	Energiebedarf Zerspanung $E_{Zerspanung}$ in kJ	spezifische Maschinenenergie $E_{M,spez}$ in $J\text{ mm}^{-3}$
1. EMCO	262,8	162,0	4,374
1. WEIPERT	194,4	133,2	3,236
2. EMCO	230,4	144,0	4,346
2. WEIPERT	190,8	126,0	3,599
3. EMCO	187,2	115,2	4,493
3. WEIPERT	158,4	97,2	3,801
4. EMCO	151,2	86,4	4,691
4. WEIPERT	126,0	72,0	3,909
5. EMCO	118,8	61,2	5,602
5. WEIPERT	97,2	50,4	4,584
6. EMCO	97,2	43,2	7,639
6. WEIPERT	75,6	32,4	5,942
7. EMCO	79,2	25,2	13,339
7. WEIPERT	57,6	14,4	9,701
8. EMCO	61,2	14,4	21,378
8. WEIPERT	50,4	10,8	17,605

Tabelle 6.1.4: Vergleich der Werkzeugmaschinen, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 6.1.4 vergleicht die spezifische Maschinenenergie $E_{M,spez}$ der beiden untersuchten Werkzeugmaschinen bezogen auf das Zeitspanvolumen \dot{V} . Das ältere CNC-Drehzentrum WEIPERT WNC schneidet in diesem Vergleich besser ab. Entscheidend dafür ist die Anzahl der verbauten elektrischen Maschinenkomponenten und dem daraus resultierenden geringeren Grundlastniveau. Der Verlauf der Kurven ist bei beiden Werkzeugmaschinen gleich.

Verallgemeinernd lässt sich sagen, dass bei größerem Volumenabtrag die spezifische Maschinenenergie geringer ist und damit die Effizienz einer Werkzeugmaschine höher ausfällt.

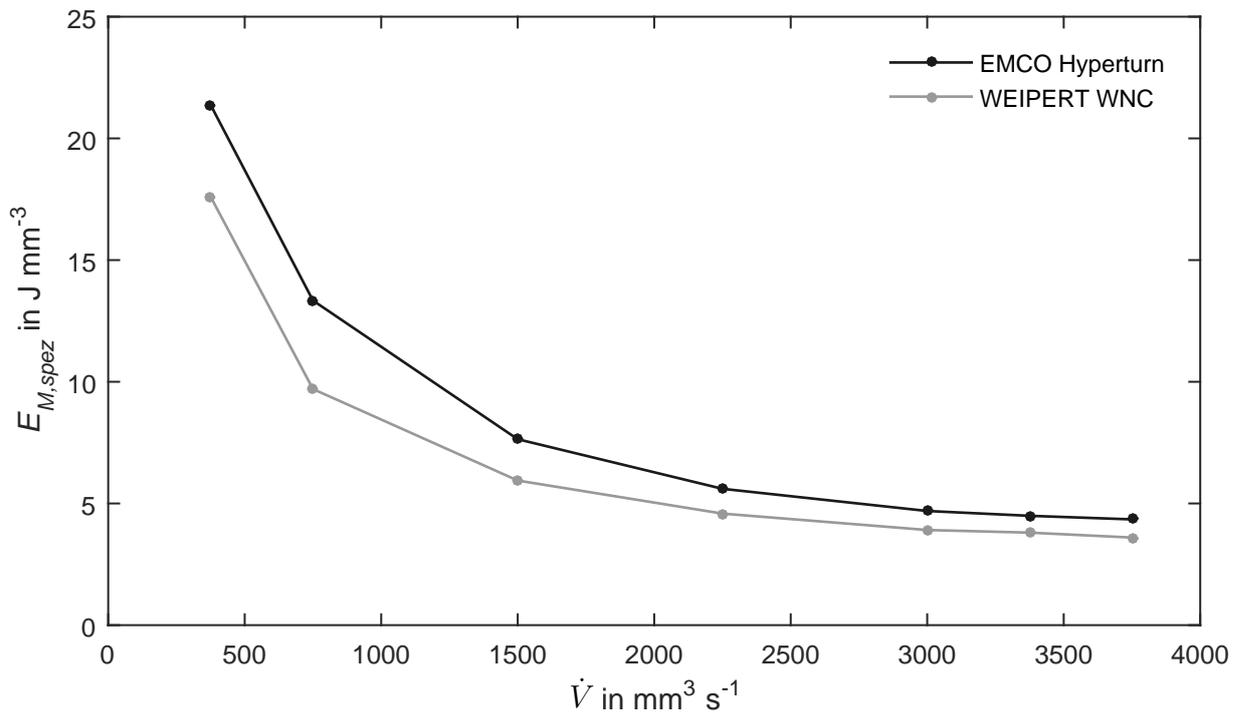


Abbildung 6.1.4: Vergleich der spezifischen Maschinenenergie, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei den vorliegenden Versuchen werden auf beiden Werkzeugmaschinen die gleichen Prozessparameter verwendet. Der Vergleich von verschiedenen Maschinen ist auf diese Weise auch möglich, wenn nicht die gleichen Prozessparameter bei der Bearbeitung verwendet werden.

6.2 Ermittlung von Kenngrößen der Energieeffizienz spanender Fertigungsprozesse

Basierend auf den Versuchen im 5. Kapitel werden Kenngrößen der Energieeffizienz für Fertigungsprozesse erarbeitet. An Hand von Beispielen wird die Ermittlung der Kenngrößen beschrieben. Wie bei der Betrachtung der Werkzeugmaschinen werden dimensionslose und spezifische Kenngrößen verwendet.

6.2.1 Dimensionslose Kenngrößen

Zur Ermittlung von dimensionslosen Kenngrößen wird der Energiebedarf einzelner Prozessparameter zueinander ins Verhältnis gesetzt. Eine Betrachtungsmöglichkeit ist die benötigte Prozessenergie für die Zerspanung $E_{Prozess}$ mit der vom System benötigten Energie E_{gesamt} zu vergleichen (Gleichung 6.2.1).

$$\text{Prozesseffizienz} = \frac{E_{Prozess}}{E_{gesamt}} \quad (6.2.1)$$

Tabelle 6.2.1 zeigt die Prozesseffizienz der in Kapitel 5.1 bei vier Bearbeitungsstufen des Testwerkstücks durchgeführten Drehversuche. Von Stufe zu Stufe verringert sich die Effizienz, da der Grundlastanteil einen größeren Einfluss hat als der Bearbeitungsprozess.

	2. Stufe	4. Stufe	6. Stufe	8. Stufe
Energiebedarf Prozess $E_{Prozess}$ in kJ	144,0	86,4	43,2	14,4
Energiebedarf gesamt E_{gesamt} in kJ	230,4	151,2	97,2	61,2
Prozesseffizienz in %	62,61	57,14	44,44	23,53

Tabelle 6.2.1: Prozesseffizienz, Quelle: Eigene Darstellung.

Effizienz der Kühlung

Der beim Taschenfräsen in Kapitel 5.2.1 ermittelte Energiebedarf für die Kühlung $E_{Kuehlung}$ bei den verschiedenen Strategien wird ins Verhältnis zum gesamten Energiebedarf E_{gesamt} gesetzt (Gleichung 6.2.2).

$$\text{Prozesseffizienz Kuehlung} = \frac{E_{Kuehlung}}{E_{gesamt}} \quad (6.2.2)$$

Tabelle 6.2.2 zeigt den Vergleich der vier Prozessstrategien an Hand der Prozesseffizienz der Kühlung. Die 1. Bearbeitungsstrategie nutzt als Kühlmedium eine Wasser-Öl Emulsion. Bei der 2. - 4. Strategie wird Druckluft verwendet. Der Vergleich zeigt die hohe Effizienz der nassen Bearbeitungsstrategie.

	1. Strategie	2. Strategie	3. Strategie	4. Strategie
Kühlkonzept	Wasser-Öl	Druckluft	Druckluft	Druckluft
Energiebedarf Kühlung $E_{Kuehlung}$ in kJ	218,1	4222,3	4222,3	3717,8
Energiebedarf gesamt E_{gesamt} in kJ	3838,6	8002,3	7896,6	7013,6
Prozesseffizienz der Kühlung in %	5,68	52,76	53,47	53,01

Tabelle 6.2.2: Prozesseffizienz der Kühlung, Quelle: Eigene Darstellung.

Effizienz auf Basis einer Referenz

Bei der Ermittlung der Effizienz auf Basis einer Referenz wird der Energiebedarf eines Versuchs E auf den Energiebedarf einer Referenz $E_{Referenz}$ bezogen (Gleichung 6.2.3). Die Referenz kann entweder im Rahmen der Versuche ermittelt werden, oder ein bereits ermittelter Referenzwert sein.

$$\text{Prozesseffizienz referenziert} = \frac{E}{E_{Referenz}} \quad (6.2.3)$$

Beispiel 1:

Nach der Durchführung der Versuche und der Auswertung des Energiebedarfs beim Taschenfräsen (Kapitel 5.2.1) zeigt sich welcher Prozess den geringsten Energiebedarf hat. Dieser kann als Referenzwert verwendet werden. Bei den Fräsversuchen ist der Gesamtenergiebedarf E_{gesamt} bei der 1. Strategie am geringsten und wird als Referenzwert $E_{gesamt,Referenz}$ für den Vergleich in Tabelle 6.2.3 verwendet.

	1. Strategie	2. Strategie	3. Strategie	4. Strategie
Energiebedarf gesamt E_{gesamt} in kJ	3838,6	8002,3	7896,6	7013,6
Prozesseffizienz referenziert in %	100	208,47	205,72	182,71

Tabelle 6.2.3: Prozesseffizienz referenziert - Beispiel 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Beispiel 2:

Bei den Drehversuchen (Kapitel 5.2.2) wird unter anderem der Einfluss des Vorschubs untersucht. Tabelle 6.2.4 zeigt den Vergleich von zwei Versuchen mit gleicher Schnitttiefe und unterschiedlichem Vorschub. Der höhere Energiebedarf wird in dieser Betrachtung als Referenz verwendet. Der Prozess mit dem größeren Vorschub und der damit geringeren Prozessdauer benötigt 76,36% der Energie des Referenzwertes.

	1. Versuch	2. Versuch
Vorschub f in mm	0,15	0,60
Schnitttiefe a_p in mm	1,0	1,0
Prozessdauer t in s	25,8	13,5
Energiebedarf gesamt E_{gesamt} in kJ	26,95	20,58
Prozesseffizienz referenziert in %	100	76,36

Tabelle 6.2.4: Prozesseffizienz referenziert - Beispiel 2, Quelle: Eigene Darstellung.

6.2.2 Spezifische Prozessenergie

Für den Vergleich von Prozessen mit verschiedenen Parametern eignen sich spezifische Kenngrößen. Dafür wird der Energiebedarf ins Verhältnis zu einer Bezugsgröße gesetzt. Wie auch beim Vergleich von Werkzeugmaschinen eignet sich das Volumen der Zerspanung als Bemessungsgrundlage. Die Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Schnittparameter auf den Energiebedarf im Rahmen der Untersuchung der Bearbeitbarkeit neuer Werkstoffsorten dient der beispielhaften Betrachtung.

Tabelle 6.2.5 zeigt den Vergleich verschiedener Drehversuche aus Kapitel 5.2.2 bei gleichem Zeitspanvolumen \dot{V} . Es zeigt sich, dass der Vorschub f und damit die Dauer der Bearbeitung ausschlaggebend für den Energiebedarf sind.

Zeitspanvolumen \dot{V} in $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$	Vorschub f in mm	Schnitttiefe a_p in mm	Schnittgeschw. v_c in m min^{-1}	Prozessdauer t in s	Energiebedarf E in kJ
1500	0,60	1,0	150	13,51	20,58
1500	0,30	2,0	150	16,62	23,89
1500	0,20	3,0	150	20,06	27,22
1500	0,15	4,0	150	22,69	30,22

Tabelle 6.2.5: Vergleichsbasis Zeitspanvolumen, Quelle: Eigene Darstellung.

Wird der Energiebedarf E auf das Zerspanungsvolumen V bezogen erhält man die spezifische Prozessenergie der Bearbeitung $E_{P, \text{spez}}$ in J mm^{-3} gemäß Gleichung 6.2.4.

$$E_{P, \text{spez}} = \frac{E}{V} \quad (6.2.4)$$

Für die in Tabelle 6.2.5 beschriebenen Versuchspunkte wird die spezifische Prozessenergie ermittelt und in Tabelle 6.2.6 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Schnitttiefe einen größeren Einfluss auf die Effizienz hat als der Vorschub. Der effizienteste Versuchspunkt mit $1,670 \text{ J mm}^{-3}$ ist bei Vorschub $0,15 \text{ mm}$ pro Umdrehung und Schnitttiefe $4,0 \text{ mm}$.

Vorschub f in mm	0,60	0,30	0,20	0,15
Schnitttiefe a_p in mm	1,0	2,0	3,0	4,0
spezifische Prozessenergie $E_{P, \text{spez}}$ in J mm^{-3}	4,199	2,502	1,951	1,670

Tabelle 6.2.6: Spezifische Prozessenergie bei gleichem Zeitspanvolumen, Quelle: Eigene Darstellung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung der Arbeit ist die Untersuchung der spanenden Fertigung, um aussagekräftige Kenngrößen der Energieeffizienz zu entwickeln. Vor diesem Hintergrund wird am Institut für Fertigungstechnik der TU Graz der Energiebedarf von Werkzeugmaschinen, der Einfluss der Prozessstrategie beim Fräsen und im Rahmen einer Industriezusammenarbeit die Bearbeitbarkeit von neuen Werkstoffsorten an Hand des Längsdrehens und des Tiefbohrrens analysiert. Neue Werkstoffsorten mit hohem Reinheitsgrad und homogenem Gefüge für Bauteile mit besseren Dauerfestigkeitseigenschaften einsetzen zu können, liegt im Interesse der Industrie. Es besteht jedoch gerade in der verarbeitenden Industrie das Risiko, etablierte Prozesse durch den Einsatz neuer Werkstoffe in ihrer Stabilität zu gefährden. Die durchgeführten Untersuchungen weisen die Bearbeitbarkeit der neuen Werkstoffe nach und zeigen keine erheblichen Veränderungen des Energiebedarfs bei der Zerspanung.

Die Vielfalt in der spanenden Fertigung mit den unterschiedlichen Prozessparametern erfordert eine differenzierte Betrachtung. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen von Werkzeugmaschinen und spanenden Fertigungsprozessen zeigen die Vorgehensweise zur Ermittlung der Energieeffizienz. Ausgehend von der Erfassung des Energiebedarfs lassen sich Kenngrößen ableiten, die die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen und Prozessen darlegen. Eine fallbezogene Betrachtung ermöglicht es, Aussagen zu konkreten Maschinen, Komponenten und Prozessen zu geben. Dabei zeigt sich, dass die Durchführung von Leistungsmessungen eine geeignete Methode ist, um den zeitlichen Verlauf des Energiebedarfs zu ermitteln.

Die Versuche zeigen einen messbaren Einfluss der Prozessparameter auf den Energiebedarf. Die Erhöhung des Vorschubs von 0,15 mm auf 0,60 mm pro Umdrehung reduziert die gesamte Prozessdauer um 50% und senkt damit den Energiebedarf um 24%. Den größten Einfluss hat die Schnitttiefe zur Umsetzung des Zerspanungsvolumens. Die ermittelten Kenngrößen spezifische Maschinenenergie und spezifisch Prozessenergie beziehen den Energiebedarf auf das Zerspanungsvolumen und ermöglichen den Vergleich von Maschinen und Prozessen.

Zur Untersuchung der Werkzeugmaschine mit den dazugehörigen Komponenten eignet sich die im Rahmen der Arbeit verbesserte Retrofit Analyse basierend auf der Leistungsmessung. Die dabei ermittelte Kenngröße, der Retrofit Faktor, weist das Potenzial für die Notwendigkeit des Austauschs einer Werkzeugmaschinenkomponente aus. Die Anforderung der zunehmenden Flexibilisierung der Produktion resultiert aus kürzer werdenden Produktzyklen und stärker diversifizierten Produkten. Eine derartige Betrachtung von Werkzeugmaschinenkomponenten ist eine Anregung an die Hersteller die Austauschbarkeit von Komponenten bereits in der Konstruktion zu berücksichtigen. Ein modularer Aufbau einer Werkzeugmaschine unterstützt den Austausch einer Komponente im langjährigen Betrieb, wenn sich zum Beispiel das Nutzungsverhalten oder das Produktionsspektrum ändert.

Die Betrachtung des Produktionsfaktors Energie kann mit der Erfassung des zeitabhängigen Energiebedarfs mit Hilfe der Leistungsmessung in das Bewusstsein der am Wertschöpfungsprozess Beteiligten gebracht werden. An Hand der ausgewerteten Messungen und der Kenngrößen wird das Einsparpotenzial transparent gemacht. Hierdurch lassen sich Maschinen und Prozesse energieoptimal ausgelegt und betreiben. Die Erhebung von Energiedaten in der Fertigung kann somit in CAx-Systeme überführt werden, um Produkte und Prozesse zukünftig noch effizienter auslegen zu können. Die aufgezeigte Vorgehensweise der Kombination von prozessbezogenen Energieverläufen mit den aggregierten Kenngrößen ermöglicht die Steigerung der Energieeffizienz in der Praxis der spanenden Fertigung.

Sechs Thesen zur Steigerung der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung

Aus den durchgeführten Versuchen und den ausgewerteten Messdaten lassen sich Empfehlungen für eine energieeffiziente spanende Fertigung ableiten:

1. Prozessdauer minimieren

Eine kürzest mögliche Prozessdauer ist wegen des Energiebedarfs der Grundlast anzustreben.

2. Energiebedarf bei der Wahl der Werkzeugmaschine beachten

Stehen verschiedene Fertigungsmöglichkeiten zur Auswahl, ist der Energiebedarf ein zu beachtendes Kriterium.

3. Zeitspanvolumen maximieren

Ein hohes Zeitspanvolumen bei der Bearbeitung ermöglicht eine effizientere Zerspanung. Wenn die Ausgangsgrößen eines Prozesses, zum Beispiel die Kräfte, die Temperatur, die Schwingungen oder die Oberflächengüte es zulassen, sollen der größtmögliche Vorschub und Arbeitseingriff verwendet werden.

4. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung forcieren

Eine Hochgeschwindigkeitsbearbeitung hat auf Grund des hohen Zeitspanvolumens einen geringeren Energiebedarf als eine konventionelle Bearbeitung.

5. Abschaltungsstrategien entwickeln

Nicht genutzte Werkzeugmaschinen und Aggregate haben einen hohen Energiebedarf im Standby. Wenn es die Randbedingungen ermöglichen, soll die Maschine ausgeschaltet werden.

6. Energiebedarf erfassen und bewerten

Durch die regelmäßige Erfassung des Energiebedarfs und dessen Bewertung mittels Kenngrößen lässt sich die Effizienz überwachen. Der Produktionsfaktor Energie wird im Detail sichtbar und kann mit dem Produktionsablauf in Verbindung gebracht werden.

Ausblick

Das Ziel der Entkopplung der Energieverbrauchsentwicklung von der Wirtschaftsentwicklung muss sowohl durch eine nachhaltige Energiegewinnung als auch durch den effizienten Umgang Umsetzung finden. Aktuelle Nachrichten vermelden verstärkte Anstrengungen bezüglich der Energieeffizienz: „Bis zum Ende des Jahres 2016 wollen Unternehmen in Deutschland wieder stärker in Energieeffizienz investieren. Zu diesem Ergebnis kommt die Wintererhebung des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion der Universität Stuttgart. In den halbjährlichen Befragungen war die Stimmungslage zur Energieeffizienz seit Anfang 2014 kontinuierlich gesunken.“⁵⁴

Eine Effizienzsteigerung bei der Nutzung von elektrischer Energie bedeutet eine Reduktion des Verbrauchs eines Primärenergieträgers. So lange der Energiebedarf nicht zu großen Teilen aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden kann, bedeutet die Einsparung einer Einheit elektrischer Energie eine 1,5-2fache Einsparung einer Einheit eines Primärenergieträgers, abhängig vom Wirkungsgrad der Art der Erzeugung, von den Verlusten beim Transport und vom Wirkungsgrad bei der Nutzung.

Informationen zum Energiebedarf von Produktionsanlagen und Prozessen werden im Zuge der Umsetzung der Industrie 4.0 Strategie Einzug in die Steuerung und Regelung der Produktion finden. Der im Rahmen der Hannover Messe überreichte Hermes Award 2016 zeichnet das Produkt MICA aus, das einen wichtigen Beitrag zum Leitthema INTEGRATED ENERGY der Hannover Messe leistet. Der modulare Kleincomputer vernetzt bereits existierende Produktionsanlagen und ermöglicht bestehende Fabriken schrittweise in das Industrie 4.0 Zeitalter zu migrieren. Über die erhöhte Verfügbarkeit von Informationen und die Vernetzung von Systemen, lassen sich Energiedaten online nutzen. Auf in Datenbanken gespeicherte Referenzwerte soll zugegriffen und damit eine schnelle Suche nach dem ressourceneffizientesten Weg ermöglicht werden.⁵⁵

Die in Paris im Dezember 2015 im Rahmen der UN-Klimakonferenz ausgehandelte internationale Klimaschutz-Vereinbarung wurde im April 2016 in New York von 175 Staaten unterzeichnet. Der Weltklimavertrag legt als Mindestziel eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C fest und eine Reduzierung auf 1,5 °C wird angestrebt. Nach derzeitigem Wissensstand kann dieses Ziel nur mit einer Senkung der Treibhausgasemissionen auf Null bis zur Mitte dieses Jahrhunderts erreicht werden. Aus diesen politischen Rahmenbedingungen und der geplanten Ratifizierung des Vertrages bis spätestens 2020 werden gesetzliche Vorgaben erlassen werden, die die Beachtung des Produktionsfaktors Energie notwendig machen. Die Auseinandersetzung mit der effizienten Nutzung der elektrischen Energie in der Produktion ist eine Investition in die Zukunft von Unternehmen im Rahmen der gesellschaftlichen Verantwortung.

Auf Grund der Bedeutung der spanenden Fertigung innerhalb der industriellen Wertschöpfung leistet die vorliegenden Arbeit einen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz. Die Erfassung und die Bewertung des Energiebedarfs bei der Zerspanung zeigt einen praxistauglichen Weg auf Potenziale zu ermitteln. Die vorgestellte Methodik lässt sich auf weitere Fertigungsverfahren und Produktionsanlagen übertragen.

⁵⁴Ciupek, 2016, S.22.

⁵⁵Vgl. <http://www.hannovermesse.de> 29.04.2016.

Abbildungsverzeichnis

1.0.1	Wachstum von Weltbevölkerung und Energiebedarf	1
1.0.2	Entkopplung des Bruttoinlandsverbrauchs vom Wirtschaftswachstum in Österreich	2
1.0.3	Strompreis in € je kWh für industrielle Unternehmen mittlerer Größe in Europa	3
1.0.4	Entwicklung der Industriestrompreise	4
1.1.1	Motivationen für Ressourceneffizienz	5
1.1.2	Qualitative Darstellung des Energiebedarfs im Lebenszyklus einer Werkzeugmaschine	6
1.1.3	Produktionssystem schematisch	7
1.1.4	System Werkzeugmaschine schematisch	8
1.2.1	Zerspanungsprozess als System	9
2.0.1	Vorgehensweise zur Ermittlung von Kenngrößen der Energieeffizienz	12
3.0.1	Prozentuale Zusammensetzung des Energiebedarfs in Österreich 2012	14
3.0.2	Energetischer Endverbrauch von elektrischer Energie in Österreich 1990-2013	14
3.0.3	Prozentuale Aufteilung des Industrieenergieverbrauchs in Deutschland 2007	15
3.1.1	Einteilung von Werkzeugmaschinen	16
3.1.2	Darstellung des ökologischen Fußabdrucks eines Bearbeitungszentrums	17
3.1.3	Zeitlinie des Energiewertstroms	18
3.1.4	Grundkonzept der energiesensitiven Anlagensteuerung	19
3.1.5	Zeitanteile und Energieanteile von Produktionsanlagen	20
3.2.1	Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580	21
3.2.2	Kinematik beim Spanen	22
3.2.3	Schnitt- und Spanungsgrößen beim Drehen	23
3.2.4	Zerspankraft und ihre Komponenten bei Drehen	24
3.2.5	Zerspankraftkomponenten beim Fräsen	25
3.2.6	Zerspankraftkomponenten beim Bohren	26
3.2.7	Spezifische Schnittkraft bzw. Schnittenergie	28
3.3.1	Verlauf von Gleichspannung und -strom, Verlauf von Wechselspannung und -strom	30
3.3.2	Wirkleistungsverlauf	31
3.3.3	Energiebedarf von Werkzeugmaschinenkomponenten	32
3.3.4	Normierung der Leistungsmessung	33
3.3.5	Ermittlung des Regressionswinkels	34
4.2.1	Mikrostruktur 42CrMo4	38
4.2.2	Mikrostruktur 18CrNi8	39
4.4.1	Leistungsmessgerät Dewetron	43
4.4.2	Strommessung mit Strommesszange	45
4.4.3	Strommessung mit Rogowskispule	45
4.4.4	Ersatzschaltbild Messung eines Antriebs	46
4.5.1	Schematischer Messaufbau	48
4.5.2	Datenerfassung und Auswertung	49

5.0.1	Versuchsplan	51
5.1.1	Testwerkstück	53
5.1.2	Gesamtleistungsaufnahme EMCO Hyperturn	56
5.1.3	Leistungsverlauf Gesamtleistung und Hauptspindel EMCO	58
5.1.4	Leistungsaufnahme Hydraulikpumpe	59
5.1.5	Leistungsaufnahme Frässpindel	60
5.1.6	Energiebedarf der Maschinenkomponenten EMCO Hyperturn	61
5.1.7	Gesamtleistungsverlauf Werkzeugmaschinenvergleich	62
5.1.8	Energiebedarf Werkzeugmaschinenvergleich	63
5.2.1	Energieumsetzung spanender Fertigungsprozess	64
5.2.2	Zeichnung und 3D-Ansicht Versuchsteil Fräsversuche	65
5.2.3	Bearbeitungsschritte 1. Strategie	67
5.2.4	Leistungsverlauf Fräsversuche 1. Strategie	68
5.2.5	Bearbeitungsschritte 2. Strategie	69
5.2.6	Leistungsverlauf Fräsversuche 2. Strategie	70
5.2.7	Leistungsverlauf Fräsversuche 3. Strategie	71
5.2.8	Leistungsverlauf Fräsversuche 4. Strategie	72
5.2.9	Vergleich der Fräsversuche	73
5.2.10	Vergleich der Kühlstrategie	74
5.2.11	Zeichnung und 3D-Ansicht der Drehprobe	75
5.2.12	Versuchsmatrix Drehversuche	76
5.2.13	Leistungsverlauf Hauptspindel und Werkzeugschlitten 42CrMo4 (Standard)	81
5.2.14	Spindelleistungs- und Schnittkraftverlauf 42CrMo4 (Standard)	82
5.2.15	Energiebedarf 42CrMo4 (Standard) bei v_c 150 m min ⁻¹	83
5.2.16	Energiebedarf Drehbearbeitung 42CrMo4 (Standard) Parametervariation	84
5.2.17	Energiebedarf Drehbearbeitung 42CrMo4 (ESU) Parametervariation	85
5.2.18	Bearbeitungsgrenzen 42CrMo4	85
5.2.19	Energiebedarf Drehbearbeitung 18CrNi8 (Standard) Parametervariation	86
5.2.20	Energiebedarf Drehbearbeitung 18CrNi8 (ESU) Parametervariation	87
5.2.21	Bearbeitungsgrenzen 18CrNi8	87
5.2.22	Zeichnung und 3D-Ansicht der Bohrprobe	88
5.2.23	Energiebedarf Tiefbohren 42CrMo4	90
5.2.24	Mittelwert und Standardabweichung des Moments und der Vorschubkraft 42CrMo4	90
5.2.25	Bohrerverschleiß 42CrMo4	91
5.2.26	Verlauf des Moments beim Tiefbohren 42CrMo4	91
5.2.27	Energiebedarf Tiefbohren 18CrNi8	92
5.2.28	Mittelwert und Standardabweichung des Moments und der Vorschubkraft 18CrNi8	92
5.2.29	Bohrerverschleiß 18CrNi8	93
5.2.30	Verlauf der Vorschubkraft beim Tiefbohren 18CrNi8	93
5.2.31	Nutzung elektrischer Energie im Zerspanungsprozess	94
6.1.1	Problematik bei der Ermittlung	97
6.1.2	Neue Ermittlungsmethodik	98

6.1.3	Beispiel für neue Ermittlungsmethodik	99
6.1.4	Vergleich der spezifischen Maschinenenergie	102

Tabellenverzeichnis

3.0.1	Förderprogramme Energieeffizienz	13
3.3.1	Umrechnungstabelle Wattsekunde und Wattstunde in Joule	29
3.3.2	Klassen der Energieeffizienz Kenngrößen	35
4.1.1	Technische Daten der EMCO Hyperturn-655MCPlus	36
4.1.2	Technische Daten der HERMLE C50U	37
4.1.3	Technische Daten der WEIPERT WNC 500S	37
4.2.1	Chemische Zusammensetzung 42CrMo4	38
4.2.2	Chemische Zusammensetzung 18CrNi8	39
4.3.1	Technische Daten der Drehwerkzeuge	40
4.3.2	Technische Daten der Bohrwerkzeuge	41
4.3.3	Technische Daten der Fräswerkzeuge	42
4.4.1	Technische Daten der Dewetron Leistungsmesseinrichtung	44
4.4.2	Technische Daten der Kistler Kraftmesskomponenten	47
4.4.3	Technische Daten der National Instruments Messdatenerfassung	47
5.0.1	Versuchsübersicht	50
5.1.1	Zerspanungsparameter Drehbearbeitung Testwerkstück	55
5.1.2	Zerspanungsparameter Bohrbearbeitung Testwerkstück	55
5.1.3	Energiebedarf Drehbearbeitung Testwerkstück	57
5.1.4	Energiebedarf der Maschinenkomponenten	61
5.1.5	Energiebedarf Werkzeugmaschinenvergleich	63
5.2.1	Prozessparameter Fräsversuche	66
5.2.2	Prozessdaten 1. Strategie	68
5.2.3	Prozessdaten 2. Strategie	70
5.2.4	Prozessdaten 3. Strategie	71
5.2.5	Prozessdaten 4. Strategie	72
5.2.6	Leistungs- und Energievergleich Fräsversuche	73
5.2.7	Zerspanantes Volumen beim Längsdrehen	77
5.2.8	Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 150 m min ⁻¹	77
5.2.9	Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 190 m min ⁻¹	78
5.2.10	Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 200 m min ⁻¹	78
5.2.11	Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 240 m min ⁻¹	79
5.2.12	Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 280 m min ⁻¹	79
5.2.13	Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Schnittgrößen bei Schnittgeschwindigkeit 320 m min ⁻¹	80
5.2.14	Energieformen im Zerspanungsprozess	94
6.1.1	Energiebedarf der Werkzeugmaschinenkomponenten und deren Retrofit Faktoren	96
6.1.2	Vergleich der Berechnungsmethoden	100
6.1.3	Energiebedarf der Werkzeugmaschinenkomponenten und deren Retrofit Faktoren neu	100
6.1.4	Vergleich der Werkzeugmaschinen	101

6.2.1	Prozesseffizienz	103
6.2.2	Prozesseffizienz der Kühlung	103
6.2.3	Prozesseffizienz referenziert - Beispiel 1	104
6.2.4	Prozesseffizienz referenziert - Beispiel 2	104
6.2.5	Vergleichsbasis Zeitspanvolumen	105
6.2.6	Spezifische Prozessenergie bei gleichem Zeitspanvolumen	105

Literatur

- 2008/92/EG (2008). *Rechtsvorschriften Ausgabe in deutscher Sprache: Richtlinie 2008/92/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 22. Oktober 2008 zur Einführung eines gemeinschaftlichen Verfahrens zur Gewährleistung der Transparenz der vom industriellen Endverbraucher zu zahlenden Gas- und Strompreise*. 51. Jahrgang, L 298, 7. November 2008. Hrsg. von Europäische Union. Amtsblatt der Europäischen Union,
- 2009/125/EG (2009). *Rechtsvorschriften Ausgabe in deutscher Sprache: Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte*. 52. Jahrgang, L 285, 31. Oktober 2009. Hrsg. von Europäische Union. Amtsblatt der Europäischen Union,
- 2010/30/EU (2010). *Rechtsvorschriften Ausgabe in deutscher Sprache: Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch energieverbrauchsrelevante Produkte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen*. 53. Jahrgang, L 153, 18. Juni 2010. Hrsg. von Europäische Union. Amtsblatt der Europäischen Union,
- 2012/27/EU (2012). *Rechtsvorschriften Ausgabe in deutscher Sprache: Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz*. 55. Jahrgang, L 315, 14. November 2012. Hrsg. von Europäische Union. Amtsblatt der Europäischen Union,
- BMFW (2015a). *Energieeffizienz in Zahlen 2015*. Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft.
- (2015b). *Energiestatus Österreich 2015. Entwicklung bis 2013*. Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft.
- Brandenburg, U. und S. Kropp (2013). *Eco2Cut: Energieeffizienz in der produzierenden Industrie. in UdZ - Unternehmen der Zukunft 14. Jg., Heft1/2013*. FIR e.V., Aachen.
- Brecher, C. und S. Bäuml (2012). *Integrative Produktionstechnik - Herausforderungen heutiger Werkzeugmaschinen. Die Zukunft der Fertigungstechnik, Tagungsband Wiener Produktionstechnik Kongress 2012*. Neuer Wissenschaftlicher Verlag Wien.
- Brecher, C., S. Bäuml u. a. (2011). *Ressourceneffizienz im Werkzeugmaschinenbau. Tagungsband Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium*. Hrsg. von C. Brecher u. a. Shaker Verlag Aachen,
- Ciupek, M. (2016). *Energieeffizienz: Die Unternehmen wollen Investitionen steigern. in VDI Nachrichten 29.01.2016*. VDI Verlag Düsseldorf.
- Dedalus Consulting (2011). *Cutting Tools. World Markets, End-Users, and Competitors: 2010-2015 Analysis and Forecast*. Dedalus Consulting International New York.
- Denkena, B. und H.-K. Tönshoff (2011). *Spanen Grundlagen. 3., bearb. u. erw. Aufl.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- DIN 6580 (1985). *Begriffe der Zerspantechnik. DIN 6580:1985, Begriffe der Zerspantechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges*. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag Berlin.
- DIN 6584 (1982). *Begriffe der Zerspantechnik. DIN 6584:1982, Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte Energie Arbeit Leistungen*. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag Berlin.

- DIN 8580 (2003). *Fertigungsverfahren. DIN 8580:2003, Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung*. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN ISO 50001 (2011). *Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. ISO 50001/2011, deutsche Fassung*. Hrsg. von International Organization for Standardization. Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN ISO 9000 (2005). *Qualitätsmanagement. ISO 9000:2005-12, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe, deutsche Fassung*. Hrsg. von International Organization for Standardization. Beuth Verlag Berlin.
- Erlach, K. (2013a). *Energiewertstorm: Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion*. in "Handbuch Ressourcenorientierte Produktion". Hrsg. von R. Neugebauer. Carl Hanser Verlag München Wien.
- (2013b). *Energy Value Stream: Increasing Energy Efficiency in Production*. in "Future Trends in Production Engineering". Hrsg. von G. Schuh, R. Neugebauer und E. Uhlmann. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gontarz, A. u. a. (2011). <http://e-collection.library.ethz.ch>. *Machine Tool Optimization Strategies - Evaluation of Actual Machine Tool Usage and Modes*. URL: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:6231/eth-6231-01.pdf>.
- (2012). *Machine Tool Optimization Strategies - Machine Tool Optimization Strategies for Ecologic and Economic Efficiency. Sustainable Manufacturing*. Hrsg. von G. Seliger. Springer-Verlag Berlin Heidelberg,
- Hirsch, A. (2012). *Werkzeugmaschinen. Grundlagen, Auslegung, Ausführungseispiele*. Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden.
- Hoffmann, J., Hrsg. (2007). *Taschenbuch der Messtechnik. 5. Auflage*. Carl Hanser Verlag München Wien. <http://www.eco2cut.com> (15.01.2016).
- <http://www.fertigung.de> (25.10.2015). URL: <http://www.fertigung.de/2009/09/wie-viel-energie-verbraucht-eine-werkzeugmaschine/>.
- <http://www.hannovermesse.de> (29.04.2016). URL: <http://www.hannovermesse.de/de/programm/awards-wettbewerbe/hermes-award/>.
- ISO 14955 (2014). *Environmental evaluation of machine tools. ISO 14955-1:2014, Part 1 Design methodology for energy-efficient machine tools*. Hrsg. von International Organization for Standardization. Beuth Verlag Berlin.
- Kalhöfer, E. und J. Kress (2013). *Mapal Technologiereport. Energieeffizienz in der spanenden Fertigung*. Hrsg. von MAPAL Dr. Kress KG. Aalen.
- Klocke, F. und W. König (2008). *Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kuhrke, B. (2011). *Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen. Schriftenreihe des PTW: „Innovation Fertigungstechnik“*. epubli GmbH, Berlin.
- Müller, E. und Th. Löffler (2013). *Mess- und Automatisierungstechnik für die energieeffiziente Produktion*. in *Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 „Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung“ des Spitzentechnologieclusters eniPROD*. Hrsg. von R. Neugebauer, U. Götze und W.-G. Drossel. Verlag Wissenschaftliche Scripten Auerbach.
- Ostertag, K., Ch. Sartorius und L. Tercero-Espinoza (2010). *Innovationsdynamik in rohstoffintensiven Produktionsprozessen. Chemie-Ingenieur-Technik*. 82, Nr.11,
- Patterson, M. (1996). *What is energy efficiency*. in *Energy Policy Journal*. Elsevier,

- Putz, M. (2014). *Moderne Produktionstechnik - von der Vision zur Realität. Vortrag im Rahmen der Konferenz ServTec 23.03.2014 in Graz.*
- Redecker, M., F. Haas und B. Schmiedhofer (2014). *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology. Energy Optimized Machine Tools and Processes with Advanced Measuring Technology and Evaluation.* Hrsg. von Faculty of Mechanical Engineering Zenica. Bd. 18. Stamparija Fojnica,
- Redecker, M., B. Schmiedhofer und M. Brillinger (2014). *Development in Machining Technology. New Calculation Method of the Retrofit Factor for Energy Optimization of Machine Tools.* Hrsg. von Politechnika Krakowska. Bd. 4. University of Technology Cracow,
- Richter, M. (2013). *Energiedatenerfassung. in Handbuch Ressourcenorientierte Produktion.* Hrsg. von R. Neugebauer. Carl Hanser Verlag München Wien.
- Schichke, K. u. a. (2011). <http://www.ecomachinetools.eu>. *Energy-using product group analysis. Lot 5: Machine tools and related machinery Executive Summary-Version 2.* URL: http://www.ecomachinetools.eu/typo/reports.html?file=tl_files/EuP_LOT5_ExecutiveSummary_v05_280211.pdf.
- Spur, G. (1996). *Die Genauigkeit von Maschinen. Eine Konstruktionslehre.* Hanser Verlag München Wien.
- Tzscheuschler, P. u. a. (2009). *Energieverbrauch in Deutschland Stand 2007: Daten, Fakten, Kommentare. in Brennstoff, Wärme, Kraft.* 61/6. Springer VDI-Verlag Düsseldorf.
- Wackerbauer, J. (2011). *Energie-, Material-, und Ressourceneffizienz: Zunehmende Bedeutung im Verarbeitenden Gewerbe. in ifo Schnelldienst.* 21/2011. ifo Institut, München.
- Walz, R. u. a. (2008). *Innovationsdynamik und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in grünen Zukunftsmärkten. Reihe Umwelt, Innovation, Beschäftigung.* Nr. 03,08. BMU, Berlin.
- Weck, M. und C. Brecher (2006). *Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität.* Springer Vieweg Verlag Berlin Heidelberg.
- Zein, A. (2012). *Transition Towards Energy Efficient Machine Tools. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.