

**Hochschule Ruhr West
Institut Maschinenbau**



Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades eines
„Bachelor of Science in Maschinenbau“

Energie-Effizienz in der Produktion

Eingereicht bei

Erstprüfer*in:

Prof. Dr.-Ing. Markus Schneider

Zweitprüfer*in:

Gerhard Wischmann, M.Sc.

von

Yu Chen

Matrikelnummer:

10012525.

Abgabedatum:

22.07.2022

Abstract

Vor dem Hintergrund der Energieknappheit, des Preisanstiegs und aus Gründen des Umweltschutzes ist die Energieeffizienz zu einem allgemeinen Anliegen geworden. Ein erheblicher Teil des Energieverbrauchs in der Fertigungsverfahren entfällt auf Materialabtragungsverfahren. Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen, darunter die Optimierung der Hauptaggregate der Maschine, wie z. B. Antriebssysteme und der Nebenaggregate, wie z. B. die Kühlungssysteme und Kühlschmierstoffsysteme, die Optimierung der Parameter zur Minimierung des Energieverbrauchs mithilfe der Response-Surface-Methode sowie der Leichtbau von Werkzeugmaschinen.

Vorwort

Diese Bachelorarbeit, die meine Abschlussarbeit an der Hochschule Ruhr West ist, beschäftigt sich mit effektiven Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen in den letzten Jahren.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Schneider und Herrn Wischmann für Ihre Betreuung und Unterstützung während Erstellung bedanken.

Inhaltsübersicht

1. Einleitung	1
2. Zielsetzung und Vorgehensweise	3
3. Theoretische Grundlagen zu der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	4
4. Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	8
5. Zusammenfassung und Ausblick	48
Literaturverzeichnis	51

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Vorwort	II
Inhaltsübersicht	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formalverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	IX
1. Einleitung	1
2. Zielsetzung und Vorgehensweise	3
3. Theoretische Grundlagen zu der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	4
4. Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	8
4.1. Schnittparameter und Materialabtragsrate	8
4.2. Strukturelle Optimierung von Werkzeugmaschinen	14
4.2.1. Spindeln	15
4.2.2. Lager und Führung	19
4.2.3. Kühlssysteme	23
4.2.4. Kühlschmierstoffsystemen	28
4.3. Leichtbau der Werkzeugmaschine	33
4.3.1. Bionisches Design für Maschinenständer	36
4.3.2. Leichte Materialien in Werkzeugmaschinen	39
4.3.3. Mechatronik in den Leichtbau von Werkzeugmaschinen	44
5. Zusammenfassung	48
Literaturverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typischer Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine	4
Abbildung 2: Leistungsprofil eines Drehprozesses	6
Abbildung 3: der Einfluss der Parameter auf den Energieverbrauch	13
Abbildung 4: Verteilung des Energieverbrauchs und der Abwärme in vertikalen Maschinen	14
Abbildung 5: Struktur der Motorspindel	15
Abbildung 6: Beispiel für eine Anwendung eines Hitzeschildes	17
Abbildung 7: Kühlung durch Anbringen eines Wärmerohrs in der Mitte der Welle	18
Abbildung 8: Wirkungsgraddiagramm eines Spindelinduktionsmotors	19
Abbildung 9: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Radiallagers	20
Abbildung 10: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Axiallagers	21
Abbildung 11: Längsführung	22
Abbildung 12: Aufbau einer Profilschienenführung	22
Abbildung 13: Heißgas-Bypass-Kühlssystem	24
Abbildung 14: Vergleich der PID-Regelung mit der Zweipunktregelung	25
Abbildung 15: Scrollverdichter	27
Abbildung 16: Übersicht der verwendeten Düsen	29
Abbildung 17: Ergebnisse des nutzbaren Schneidstoffdurchsatzes in Abhängigkeit vom Düsensdesign	31
Abbildung 18: Zusammenfassung der Auswirkungen von Leichtbaumaßnahmen auf die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	34
Abbildung 19: Maschinenständer	37
Abbildung 20: Vom konventionellen zum bionischen Modell	37
Abbildung 21: Universeller Schlitten mit Metallschaumkonstruktion	39
Abbildung 22: Ersatz einer konventionellen durch eine CFK-Struktur	40
Abbildung 23: 5-Achsen-Fräszentrum	42
Abbildung 24: Topologisch optimierte Ständer	42
Abbildung 25: Berechnungsmodell für Differentialdesign mit verfeinerter Verrippung	43
Abbildung 26: Frequenzgänge der optimierten Ständer	44
Abbildung 27: Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik	45
Abbildung 28: Strebe zur Kompensation von Torsionsschwingungen	46
Abbildung 29: Kompensation der Auslenkung durch eine mechatronische Einheit	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Die von Li et al. ausgewählten experimentellen Faktoren und Variablen	9
Tabelle 2 : Zusammenfassung der Modelle für den Energieverbrauch	10
Tabelle 3 : Die Energieverbrauchsmodelle für das Trocken- und Nassfräsen	10
Tabelle 4 : Prozessparameter mit ihren Werten auf drei Niveau	11

Abkürzungsverzeichnis

<u>Abkürzungsverzeichnis</u>	<u>Bedeutung</u>
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
KSS	Kühlschmierstoff
LF	Leichtbaufaktor
LK	Lesitungskoeffizient
MBR	Matrialabtragsrate
PID	proportiona-integral-derivativ
RSM	Response-Surface-Methode
SEV	spezifischer Energieverbrauch

Formalverzeichnis

Gl.1: Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	14
Gl.2: spezifischer Energieverbrauch.....	17
Gl.3: die Beziehung zwischen MBR und SEV.....	18
Gl.4: simulierte Energieverbrauch.	21
Gl.5: Leistungskoeffizient	34
Gl.6: Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung	38
Gl.7: Leistung von Kühlschmierstoffpumpen.....	39
Gl.8: Leichtbaufaktor.....	42
Gl.9: Eigenfrequenz.....	43

Symbolverzeichnis

Römische Kurzzeichen

<u>Kurzzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
C	N/m	Steifigkeit
C_0 C_1	-	maschinenspezifische Koeffizient
E	KJ	Energieaufwand
E_{KSS}	KJ	Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung
m	Kg	Masse
P_{gesamt}	KW	gesamte elektrische Leistungsaufnahme
P_{KSS}	pa	Pumpendruck
$P_{Kühllesitung}$	KW	die Leistung zur Maschinenkühlung
$P_{Kühlsystem}$	KW	die Leistung des Kühlsystems
P_s	KW	Leistung von zerspanprozess
Q	m^2	Volumen des zu entfernenden Materials
Q_{KSS}	$m^3 \cdot s^{-1}$	gesamte Volumenstrom von Kühlschmierstoff
$Q_{KSS,SINNVOLL}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	sinnvolle Volumenstrom von Kühlschmierstoff

Griechische Kurzzeichen

<u>Kurzzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
η	-	Energieeffizienz einer Werkzeugmaschine
η_{Pump}	-	Wirkungsgrad der Pumpe
ρ_{KSS}	Kg/m ³	Dichte von Kühlschmierstoff
ω_0	Hz	Eigenfrequenz

1. Einleitung

Fossile Brennstoffe sind die Hauptenergiequelle für die Stromerzeugung. Zwar gibt es heute Technologien zur Erzeugung von Strom aus grünen Energiequellen wie Wind und Sonne, aber sie sind nicht so weit verbreitet wie fossile Brennstoffe und haben erhebliche Einschränkungen, zum Beispiel an bewölkten Tagen. Die Preise für nicht erneuerbare fossile Brennstoffe steigen als Reaktion auf die enorme Nachfrage der Industrie in der ganzen Welt, und die dabei entstehenden Treibhausgasemissionen sind der Ökologie nicht zuträglich. Laut Weltklimarat müssen die CO₂-Emissionen bis 2030 um 25 Prozent reduziert werden. Diese Forderung ist mit dem steigenden Energiebedarf der letzten Jahrzehnte nicht vereinbar. Das verarbeitende Gewerbe ist eine Schlüsselindustrie, die auf den Einsatz von Energie bei der Wertschöpfung in Produktionsprozessen angewiesen ist. Als weltgrößter Energieverbraucher und Kohlenstoffemittent ist das verarbeitende Gewerbe für 33 % des weltweiten Energieverbrauchs und 38 % der CO₂-Emissionen verantwortlich. 5 bis 10 % dieser 33 % entfallen nach einigen Studien auf die Werkzeugmaschinenindustrie¹. Die maschinelle Fertigung ist eines der grundlegendsten und wichtigsten Herstellungsverfahren, das in vielen Bereichen eingesetzt wird verarbeitenden Gewerbe. Der Energiebedarf für Werkzeugmaschine macht etwa 1 bis 3 % des weltweiten Gesamtbedarfs aus. Daher ist es sinnvoll, die Energieeffizienz in der Fertigung zu verbessern, angefangen bei den Werkzeugmaschinen. Die Verringerung des Energieverbrauchs und die Einführung energieeffizienterer Herstellungsverfahren können die Leistung von Prozessen erheblich verbessern und ihre unerwünschten Auswirkungen verringern².

Diese Abschlussarbeit fasst einige der wirksamen Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen in den letzten zehn Jahren zusammen, die in drei Richtungen eingeteilt werden können.

- die Haupt- und Nebenaggregate der Werkzeugmaschine hinsichtlich ihres Energiebedarfs zu optimieren, was sowohl die Optimierung einzelner Komponenten als auch bauliche Veränderungen beinhaltet.
- Minimierung des Energieverbrauchs im Bearbeitungsprozess durch Anpassung der Prozessparameter.

1 Vgl. Moradnazard/Unver, 2016, S. 1.

2 Vgl. Kara/Li, 2011, S. 1.

- die maximale Gewichtsreduzierung wird durch die Leichtbauweise der Maschine erreicht, was sich direkt und indirekt auf die Energieeffizienz auswirkt.

2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen in der Produktion zu untersuchen, indem die einschlägige Literatur der letzten Jahre ausgewertet wird.

Die Energieeffizienz wird aus drei Perspektiven analysiert. Die erste besteht darin, das Verhältnis zwischen Bearbeitungsgeschwindigkeit und Energieverbrauch zu ermitteln und herauszufinden, wie die Schnittparameter angepasst werden können, um einen minimalen Stromverbrauch zu erreichen.

Zweitens: Wie kann die Energieeffizienz aus der Sicht der Komponenten des Maschinensystems erreicht werden, einschließlich der Verbesserung der Spindelleistung zur Erreichung hoher Bearbeitungsgeschwindigkeiten, der Verringerung der Reibungswärmeverluste in den Lager- und Führungskomponenten und der Reduzierung des Energieverbrauchs in den Kühl- und Kühlschmierstoffsystemen.

Schließlich wird erörtert, welche Faktoren die Energieeffizienz im Leichtbau beeinflussen, welche Leichtbauoptionen es gibt, z. B. struktureller Leichtbau, Leichtbauwerkstoffe und Leichtbau von integrierten mechatronischen Systemen.

3. Theoretische Grundlagen zu der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen

In der Produktion gibt es eine Vielzahl von Werkzeugmaschinen, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Eine detaillierte Analyse der Energieeffizienz jeder einzelnen Werkzeugmaschine wäre in der Kürze der Zeit nur schwer durchzuführen, daher wird in Abbildung 1 ein typischer Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine vorgestellt.

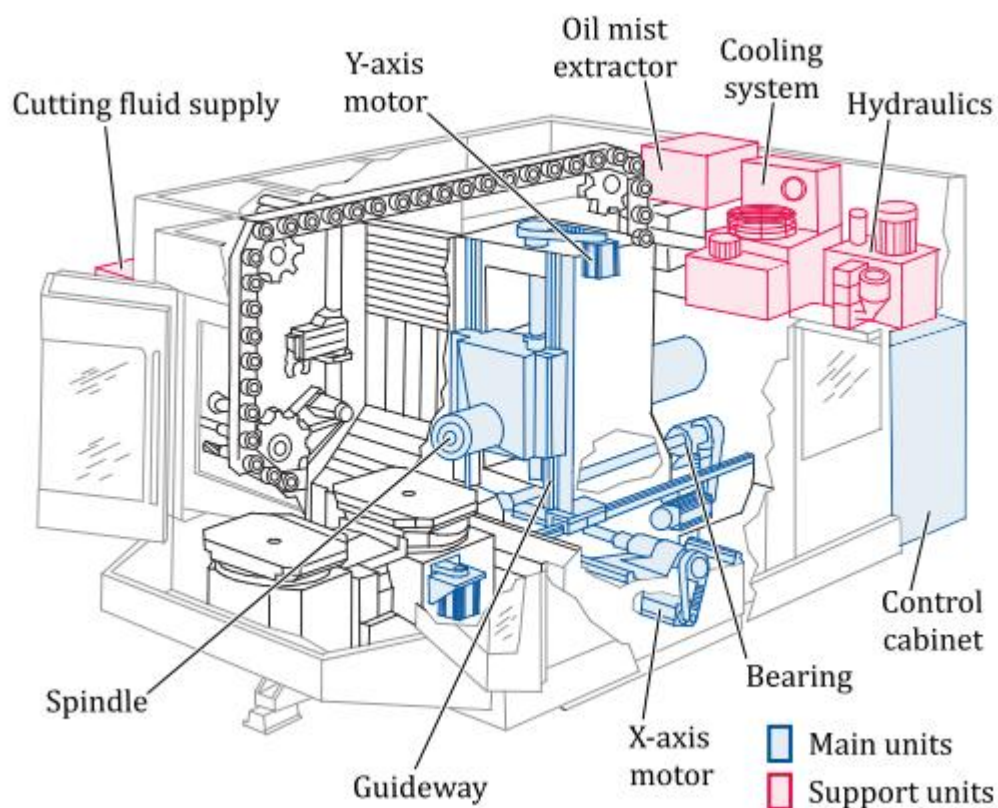


Abbildung 1: Typischer Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine³

Zu den Hauptaggregaten gehören das Maschinengestell sowie das Antriebssystem. Das Antriebssystem mit Lagern und Führungen besteht aus einem Hauptantrieb und einem Nebenantrieb. Der Hauptantrieb ist für den Antrieb der Spindel bei verschiedenen Zerspanungsaufgaben zuständig. Die Genauigkeit der Bewegung und die strukturelle Steifigkeit der Spindel sind wichtige Faktoren für die Bearbeitungsqualität und die Leistung.

³ Quelle: Denkena et al., 2020a, S. 647.

Neben der Spindel treibe Nebenantrieb in der Regel einen Drehtisch, einen Schlitten oder andere Aufgaben zur Positionierung von Werkstücken an. Zu den Hauptaggregaten gehören außerdem die Leistungs- und Informationssteuerungen als Teil der Maschinensteuerung. Die Funktion der Nebenaggregate besteht im Allgemeinen darin, die Maschine mit Medien wie Kühlschmierstoff zu versorgen. Typische Nebenaggregate sind demnach die Kühlungssysteme, die Kühlschmierstoffsystem sowie hydraulische und pneumatische Systeme. Um die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen zu untersuchen, muss zunächst definiert werden, was Energieeffizienz für die Werkzeugmaschine eigentlich bedeutet. Die Energieeffizienz wird für die verschiedenen Komponenten einer Werkzeugmaschine unterschiedlich berechnet. Die Energieeffizienz eines Motors beispielsweise ist das Verhältnis zwischen der abgegebenen mechanischen Energie und der zugeführten elektrischen Energie. Die Energieeffizienz des Kühlsystems ist das Verhältnis zwischen der Kühlleistung und dem elektrischen Energieeinsatz. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Maschine nicht immer in Betrieb ist, sondern auch im Standby-Modus oder ausgeschaltet sein kann, wird die Energieeffizienz einer Maschine wie folgt definiert.

Das Verhältnis zwischen dem Energieaufwand für die zerspanende Bearbeitung und dem gesamten elektrischen Energieaufwand, d. h. die Gleichung⁴:

$$\eta = \frac{P_s}{P_{\text{gesamt}}} \quad \text{Gl1}$$

Wobei P_s der Leistungsbedarf der Spindel und P_{gesamt} die gesamte elektrische Leistungsaufnahme der Maschine ist.

Aus der obigen Gleichung ist ersichtlich, dass zur Verbesserung der Energieeffizienz einer Werkzeugmaschine die Spindelleistung als Prozentsatz der Gesamtleistung erhöht werden muss. Mit anderen Worten, eine Erhöhung der Leistung des Spindelantriebssystems und eine möglichst weitgehende Reduzierung des Stromverbrauchs der Nebenaggregate ist eine wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Energieeffizienz⁵.

4 Vgl. Denkena et al., 2020a, S. 648.

5 Vgl. Denkena et al., 2020a, S. 647–648.

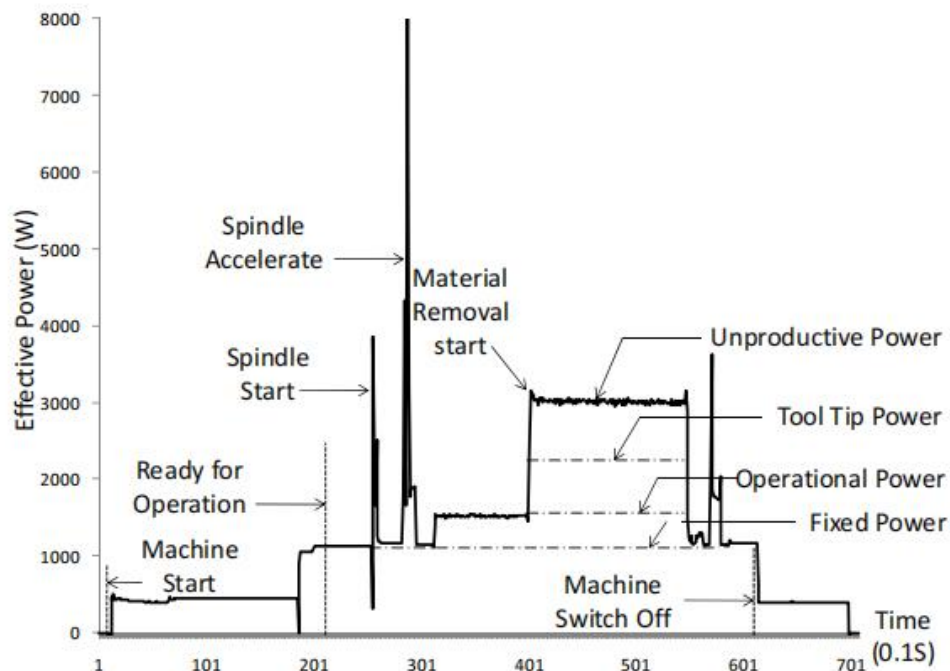


Abbildung 2: Leistungsprofil eines Drehprozesses⁶

Die Analyse des Energieverbrauchs von Werkzeugmaschinen ist ein wichtiger erster Schritt zur Senkung des Gesamtenergieverbrauchs bei Bearbeitungsvorgängen. Der Energieverbrauch ergibt sich aus dem zeitlichen Leistungsbedarf, der nicht statisch, sondern dynamisch während eines Bearbeitungsprozesses ist. Die Leistung wird von der Gestaltung des Prozesses und der gewählten Werkzeugmaschine beeinflusst. Unter Berücksichtigung dieser Zustände kann der Leistungsbedarf generell in einen variablen und einen konstanten Anteil unterschieden werden: Die variable Leistung berücksichtigt den prozessbedingten Bedarf zur Durchführung der Bearbeitung⁷. Dazu gehört nicht nur die Leistung, die für den Materialabtrag benötigt wird, sondern auch der Prozess-abhängige Betrieb von Komponenten. Die Leistungskurve vom Beginn bis zum Ende der Bearbeitungsprozess wurde von Li et al. dargestellt. Wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht die Gesamtleistung der Werkzeugmaschine während der Bearbeitung aus vier Leistungsbereichen, nämlich:

- Feste Leistung: Leistungsbedarf aller aktivierten Maschinen Komponenten zur Sicherstellung der Betriebsbereitschaft der Maschine Werkzeug.

⁶ Quelle: Li et al., 2011, S. 268.

⁷ Vgl. Li et al., 2011, S. 268-269.

- Betriebsleistung: Leistungsbedarf für den eindeutigen Betrieb Komponenten, die das Schneiden, wie es bei Luftschnitten durchgeführt wird.
- Leistung der Werkzeugspitze: Leistungsbedarf an der Werkzeugspitze zum Zerspanen von Werkstück.
- Unproduktive Leistung: Leistung, die in Wärme umgewandelt wird, hauptsächlich aufgrund von Reibungen während des Zersapnen.

Die Untersuchung des Gesamtenergieverbrauchs auf der Grundlage dieser vier Leistungen und der Einfluss der Schneidparameter auf den Gesamtenergieverbrauch werden im Kapitel 4.1 eingehend erörtert.

Um den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen weiter zu analysieren, ist ein Energieverbrauchsmodell erforderlich. Es gibt zwei übliche Methoden zur Erstellung von Modellen, nämlich die theoretische Modellierung und die empirische Modellierung. Der empirische Ansatz zur Modellierung des Energieverbrauchs ist weithin akzeptiert, da der Bearbeitungsprozess von Werkzeugmaschinen so komplex ist, dass der Energieverbrauch der einzelnen Komponenten insbesondere der Nebenaggregate nur schwer genau bestimmt werden kann⁸.

⁸ Vgl. Moradnazard/Unver, 2016, S. 6–8.

4. Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen

Grundsätzlich lassen sich Energieeinsparpotenziale auf zwei Ansätze zurückführen Ansatzpunkten, nämlich der technologischen Optimierung der einzelnen Komponenten und die energieeffiziente Prozessgestaltung, einschließlich der bedarfsgerechten Bereitstellung von Medien und Energie⁹. In diesem Kapitel werden mögliche Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverlusten in Werkzeugmaschinen und zur Verbesserung der Energieeffizienz beschrieben. Dazu gehören die Optimierung und Auslegung von Maschinenkomponenten, die Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs im Betrieb und der Leichtbau von Werkzeugmaschinen.

4.1. Schnittparameter und Materialabtragsrate

Zunächst werden zwei Begriffe eingeführt: spezifischer Energieverbrauch(SEV), d. h. der Energieverbrauch der Werkzeugmaschine Werkzeug für die Entfernung von 1 cm³ Material und Materialabtragsrate. Die Materialabtragsrate ist definiert als die Menge des vom Werkstück abgetragenen Materials pro Zeiteinheit. Die Abtragsrate kann aus dem abgetragenen Volumen oder der Gewichts Differenz vor und nach der Bearbeitung berechnet werden. Die Materialabtragsrate gibt die Geschwindigkeit der Bearbeitung an.

$$SEV = \frac{E}{Q} \quad \text{Gl 2}$$

In Gleichung 2 steht E für den Gesamtenergieverbrauch während der Bearbeitung (abgesehen von der zusätzlichen Energie im Bereitschafts- und Anlaufzustand der Maschine). Q ist das Volumen des zu entfernenden Materials¹⁰.

In Bezug auf die Definition der Energieeffizienz der Maschine, d. h. in Gleichung 1, bedeutet eine Erhöhung der Materialabtragsrate eine höhere Spindelleistung(P_s) und folglich eine höhere Energieeffizienz. Die Materialabtragsrate ist nicht nur von den Schnittparametern abhängig, sondern auch von der Bearbeitbarkeit des Werkstücks und

9 Vgl. Denkena et al., 2020a, S. 651.

10 Vgl. Li/Kara, 2011, S. 1639.

der Werkzeugkapazität¹¹. Auf dieser Grundlage wählen Li et al. vier Faktoren Werkstückmaterial(workpiece material), Schnittgeschwindigkeit(cutting speed), Vorschub(feed) und Schnitttiefe (depth of cut) als Variablen für die Planung eines Experiments bei RSM mit dem Ziel, ein Modell für SEV zu entwickeln. RSM ist ein empirischer Modellierungsansatz für die Bestimmung der Beziehung zwischen verschiedenen Prozessparametern und Antworten mit den verschiedenen gewünschten Kriterien und der Suche nach der Bedeutung dieser Prozessparameter für die gekoppelte Antwort. Es handelt sich um eine sequenzielle Versuchsstrategie für den Aufbau und die Optimierung des Modells¹². Wie in Tabelle 1 dargestellt, gibt es drei Niveaus für jede Variable, und der Versuch ist in zwei Blöcke für Drehen und Fräsen unterteilt. Für den Drehprozess wurde ein horizontaler Schnitt von 50 mm Länge für die Modellentwicklung entworfen. Die 50 mm langen Vierkantstangen mit 200 mm Länge wurden für Fräsversuche verwendet. Der Fräserdurchmesser (cutter diameter) und die Schnittbreite(width of cut) haben einen Einfluss auf Materialabtragsrate. Der Faktor Kühlschmierstoff wurde zusätzlich während des Fräsprozesses hinzugefügt, um die

Variable	Variance								
Workpiece material	Aluminium (2011)			Mild steel (1020)			High tensile (4140)		
^a Cutting speed (m/min)	200	300	400	120	160	200	100	140	180
^a Feed (mm/rev-tooth)	0.1	0.2	0.3	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2
^a Depth of cut (mm)	1	2	3	1	1.5	2	0.5	1	1.5

Variable	Variance					
Cutting environment	Dry cut			Wet cut		
Cutter diameter (mm)	32 (4 teeth)			63 (4 teeth)		
Width of cut (mm)	10	15	25	10	15	30

^a The variances of cutting speed, feed, and depth of cut were customized according to machine tool's capacity.

Tabelle 1: Die von Li et al. ausgewählten experimentellen Faktoren und Variablen¹³

Auswirkungen der Schneidumgebung (dry oder wet) auf die Versuchsergebnisse zu untersuchen. Für die Entwicklung des Versuchsplans für RSM wurde die Software Minitab verwendet. Li et al. leiteten die Beziehung zwischen Materialabtragsrate (MBR) und SEV durch Experimente mit fünf Dreh- und drei Fräsmaschinen ab, d. h. Gleichung 3¹⁴

$$SEV = C_0 + \frac{C_1}{MBR} \quad \text{Gl 3}$$

¹¹ Vgl. Kara/Li, 2011, S. 38.

¹² Vgl. Bhushan, 2013, S. 245.

¹³ Quelle: Kara/Li, 2011, S. 38.

¹⁴ Vgl. Kara/Li, 2011, S. 39.

wobei C_0 und C_1 maschinenspezifische Koeffizienten sind.

Machine tool		^a Model
Turning	Colchester Tornado A50	$SEC = 1.494 + 2.191/MRR$
	Mori Seiki NL2000MC/500	$SEC = 3.600 + 2.445/MRR$
	IKEGAI AX 20	$SEC = 2.093 + 4.415/MRR$
	Mori Seiki SL-15	$SEC = 2.378 + 2.273/MRR$
	Nakamura TMC-15	$SEC = 3.730 + 2.349/MRR$
	Milling	Fadal VMC 4020
Mori Seiki Dura Vertical 5100		$SEC = 2.830 + 1.344/MRR$
DMU 60P		$SEC = 2.411 + 5.863/MRR$

Tabelle 2: Zusammenfassung der Modelle für den Energieverbrauch¹⁵

Machine Tool		Model
Fadal VMC 4020	Dry	$SEC = 2.845 + 1.330/MRR$
	Wet	$SEC = 3.082 + 1.396/MRR$
Mori Seiki Dura Vertical 5500	Dry	$SEC = 2.830 + 1.344/MRR$
	Wet	$SEC = 2.953 + 2.019/MRR$
DMU 60P	Dry	$SEC = 2.411 + 5.863/MRR$
	Wet	$SEC = 2.677 + 6.526/MRR$

Tabelle 3: Die Energieverbrauchsmodelle für das Trocken- und Nassfräsen¹⁶

¹⁵ Quelle: Kara/Li, 2011, S. 39.

¹⁶ Quelle: Kara/Li, 2011, S. 40.

Gleichung 3 spiegelt direkt die Beziehung zwischen MBR, d. h. der Bearbeitungsgeschwindigkeit, und dem Energieverbrauch wider. Die Schlussfolgerung kann gezogen werden. Je höher die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist, desto kleiner ist der SEV und desto höher ist die Energieeffizienz. Das Energieverbrauchsmodell für die acht Maschinen ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Energieverbrauchsmodelle für das Trocken- und Nassfräsen für die drei Fräsmaschinen sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Modelle für SEV zeigen, dass eine höhere Materialabtragsrate zu einem geringeren Energieverbrauch bei der Entfernung derselben Materialmenge führt¹⁷. Um das vorgeschlagene Modell anwenden zu können, müssen die Werte der C_0 - und C_1 -Koeffizienten von den Werkzeugmaschinenherstellern experimentell bestimmt werden. Sobald dies geschehen ist, kann das vorgeschlagene Modell mit großer Genauigkeit zur Vorhersage des Energieverbrauchs und der Umweltauswirkungen eines Fertigungsprozesses verwendet werden. Der deutlich höhere Energieverbrauch beim Nassschneiden ist auf die zusätzliche Belastung durch die Schneidflüssigkeitsversorgung zurückzuführen¹⁸. Li et al. verwenden empirische Modelle, um den Energieverbrauch einer Werkzeugmaschine mit der Materialabtragsrate in Beziehung zu setzen. Dadurch, dass die Werkzeugmaschine ein ganzheitliches System ist, wird der Energieverbrauch intuitiver ausgedrückt und muss sich nicht auf die Summe der vier zuvor genannten Leistungen (Feste Leistung, Betriebsleistung, Leistung der Werkzeugspitze, unproduktive Leistung) mit.

Factors	Process parameters	Level 1	Level 2	Level 3
A	Cutting speed (m/min)	90	150	210
B	Feed (mm/rev)	0.15	0.2	0.25
C	Depth of cut (mm)	0.2	0.4	0.6
D	Nose radius (mm)	0.4	0.8	1.2

Tabelle 4: Prozessparameter mit ihren Werten auf drei Niveau¹⁹

Um die Beziehung zwischen dem Energieverbrauch der Maschine und den Schnittparametern weiter zu erforschen, Bhushan unternimmt der Versuch, den Beitrag der Schnittparameter bei der Bearbeitung von Aluminium-SiC-Legierung auf den Energieverbrauch mit Hilfe RSM zu bewerten²⁰. Wie in Tabelle 4 dargestellt,

¹⁷ Quelle: Kara/Li, 2011, S. 40.

¹⁸ Vgl. Li/Kara, 2011, S. 1645.

¹⁹ Vgl. Bhushan, 2013, S. 246.

²⁰ Vgl. Bhushan, 2013, S. 242-254.

Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, Schnitttiefe und Nasenradius (entspricht den Buchstaben ABCD) werden als Variablen für das Experiment verwendet, wobei es drei Niveaus für jede Variable gibt. Mit Hilfe der Design-Expert-Software werden 30 Versuchsreihen erstellt, bei denen das Material auf einer CNC-Drehmaschine bearbeitet und der Energieverbrauch in jeder Reihe aufgezeichnet wird.

Source	Sum of squares	DF	Mean squares	F value	Prob > F
Model	1.968E+006	9	2.187E+005	205.08 ^a	<0.0001 significant
A	1.093E+006	1	1.093E+006	1025.32 ^a	<0.0001
B	1.359E+005	1	1.359E+005	127.45 ^a	<0.0001
C	6.483E+005	1	6.483E+005	608.01 ^a	<0.0001
D	29443.56	1	29443.56	27.61 ^a	<0.0001
A ²	10068.01	1	10068.01	9.44 ^a	0.0060
C ²	14974.68	1	14974.68	14.04 ^a	0.0013
AB	22801.00	1	22801.00	21.38 ^a	0.0002
AC	18769.00	1	18769.00	17.60 ^a	0.0004
CD	4225.00	1	4225.00	3.96 ^a	0.0604
Residual	21324.54	20	1066.23		
Lack of fit	19020.54	15	1268.04	2.75	0.1344 not significant
Pure error	2304.00	5	460.80		
Cor total	1.989E+006	29			

^a Significant at 95% confidence interval.

Tabelle 5: Varianzanalyse - Energieverbrauch²¹

Die Varianzanalyse der Versuchsergebnisse (Tabelle 5) zeigt, dass der Einfluss des Faktors A,B,C,D und seines quadratischen Terms A², C², AB, AC auf den Energieverbrauch bei der Verarbeitung von Aluminium-SiC-Legierung signifikant ist. (da Prob > F kleiner als 0,05 ist)

Die von der Software simulierte Energieverbrauchsgleichung²² lautet:

$$\begin{aligned} \text{Energieverbrauch} = & 767.45609 - 4.05630 \cdot A - 149.72222 \cdot B + 1676.97357 \cdot C \\ & + 19.86111 \cdot D + 0.015018 \cdot A^2 - \\ & 1648.38710 \cdot C^2 + 12.58333 \cdot A \cdot B + \\ & 2.85417 \cdot A \cdot C + 203.12500 \cdot C \cdot D \end{aligned}$$

Gl 4

Gleichung 4 spiegelt die Auswirkungen von vier Parametern auf den Gesamtenergieverbrauch wider. Die Ergebnisse stimmen mit der Kurvenanalyse in

²¹ Quelle: Bhushan, 2013, S. 246.

²² Vgl. Bhushan, 2013, S. 247.

Abbildung 3 überein, d.h. je höher die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub sind, desto höher ist der Energieverbrauch und der Nasenradius hat einen geringeren Einfluss auf den Energieverbrauch.

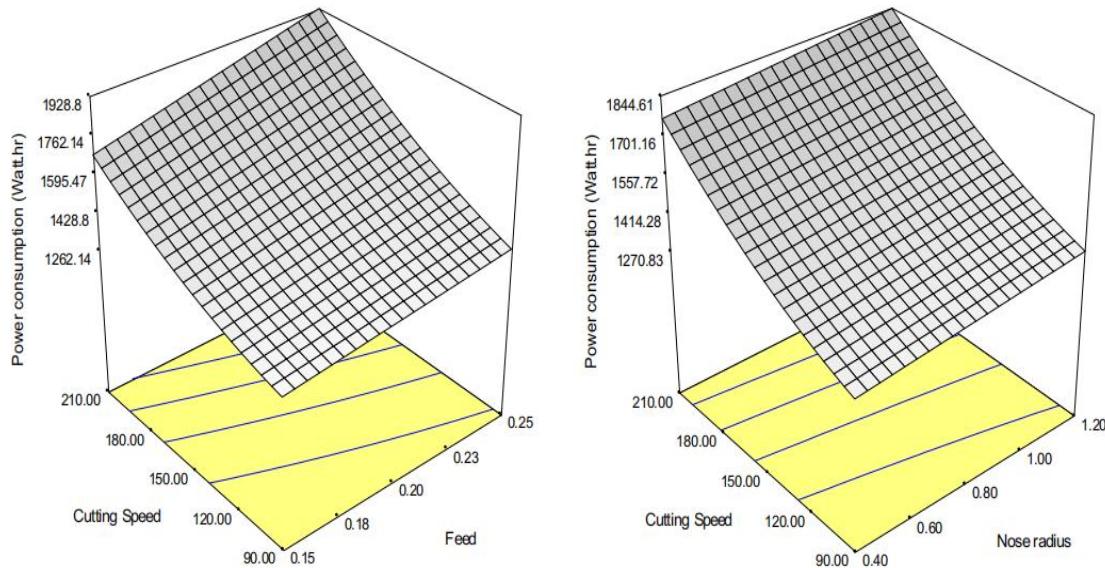


Abbildung 3: der Einfluss der Parameter auf den Energieverbrauch²³

Desirability function wird in nachfolgenden Experimenten angewendet, um die optimale Parameter für Werkzeugstandzeit (je größer, desto besser) und Energieverbrauch (je kleiner, desto besser) zu ermitteln, was zu einer Energieeinsparung von 13,55 % führte²⁴. Aus den Experimenten von Bushan und Li et al. lässt sich schließen, dass die Schnittparameter des Werkzeugs ein wichtiger Faktor sind, der den Energieverbrauch der Werkzeugmaschine beeinflusst. Wenn die Energieeffizienz unter diesem Gesichtspunkt optimiert werden, sollte ein Energieverbrauchsmodell in Betracht gezogen werden, um den Einfluss verschiedener Parameter auf den Prozess aufzudecken und so den minimalen Stromverbrauch zu bestimmen.

²³ Quelle: Bhushan, 2013, S. 248.

²⁴ Vgl. Bhushan, 2013, S. 250.

4.2. Strukturelle Optimierung von Werkzeugmaschinen

Bei den in Kapitel 3 genannten Haupt- und Nebenaggregaten ist der Anteil der von ihnen verbrauchten Energie am Gesamtenergieverbrauch der Maschine unterschiedlich. Wie in Abbildung 4 für den Energieverbrauch der Komponenten einer Vertikalmaschine dargestellt, geht aus den Daten hervor, dass der Energieverbrauch für das Schneiden des Materials für die Maschine tatsächlich sehr gering ist und nur etwa 30% Gesamtverbrauchs ausmacht. Nahezu 70 % der Energie wird für die Unterstützung des Kühlsystems, des Hydrauliksystems und Andere wie Kühlschmierstoffpumpen verbraucht.

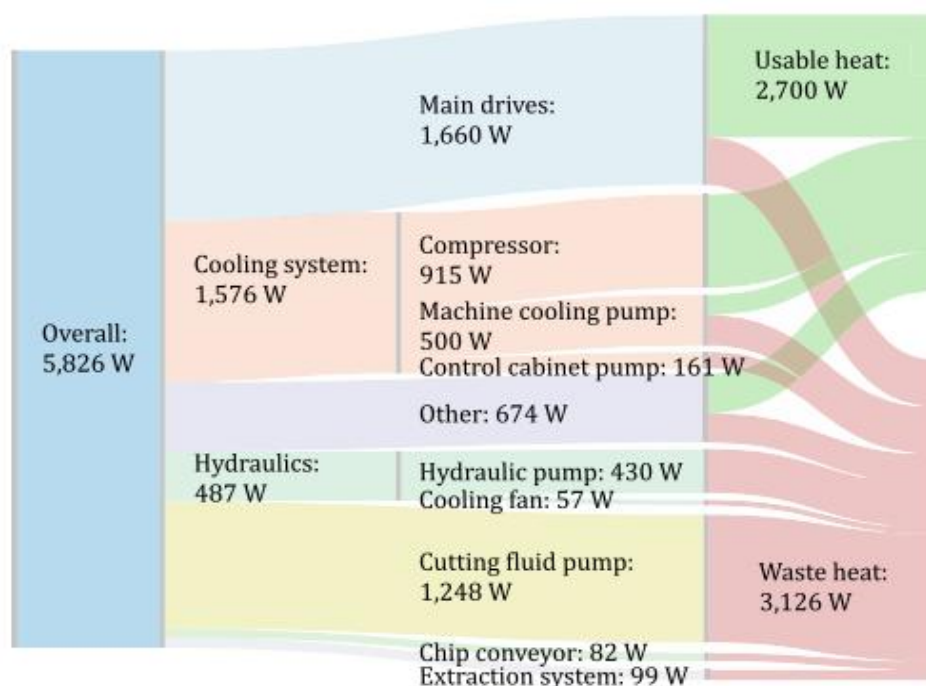


Abbildung 4: Verteilung des Energieverbrauchs und der Abwärme in vertikalen Maschinen²⁵

Darüber hinaus zeigt Abbildung 4 die verfügbare Wärme und die Abwärme im Prozess der Maschine. Abwärme wird im Allgemeinen durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung an die äußere Umgebung abgegeben. Die verfügbare Wärme ist abhängig vom Rückgewinnungssystem. Die Nebenaggregate laufen permanent, um die gewünschten Maschinen- und Prozessbedingungen aufrechtzuerhalten, d.h. die Maschinentemperatur und die Zerspanungsbedingungen, insbesondere in Bezug auf Kühlung und Schmierung. Weitere Sekundärfunktionen sind die Spanabfuhr, die Ölnebelabsaugung, die Flüssigkeitsaufbereitung und -verteilung sowie die Bereitstellung von Hydraulikdruck und

²⁵ Quelle: Denkena et al., 2020a, S. 650.

Druckluft. Aufgrund der heutigen Genauigkeitsanforderungen ist es nicht verwunderlich, dass Nebenaggregate einen entscheidenden Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf von Werkzeugmaschinen haben²⁶

Es wird deutlich, dass das Hauptaugenmerk der Forschung zur Verbesserung der Effizienz auf der Verringerung des Energiebedarfs der Nebenaggregate liegt. Im Folgenden wird die Durchführbarkeit der Verbesserung der Energieeffizienz unter dem Gesichtspunkt der Optimierung von Komponenten betrachtet.

4.2.1. Spindeln

Klassischerweise wurden die Hauptspindeln über Riemen oder Zahnräder angetrieben, und die Drehzahlen konnten nur durch Änderung des Übersetzungsverhältnisses oder der Anzahl der angetriebenen Pole mittels elektrischer Schalter variiert werden²⁷. Später wurden einfache elektrische oder hydraulische Steuerungen entwickelt und die Drehzahl

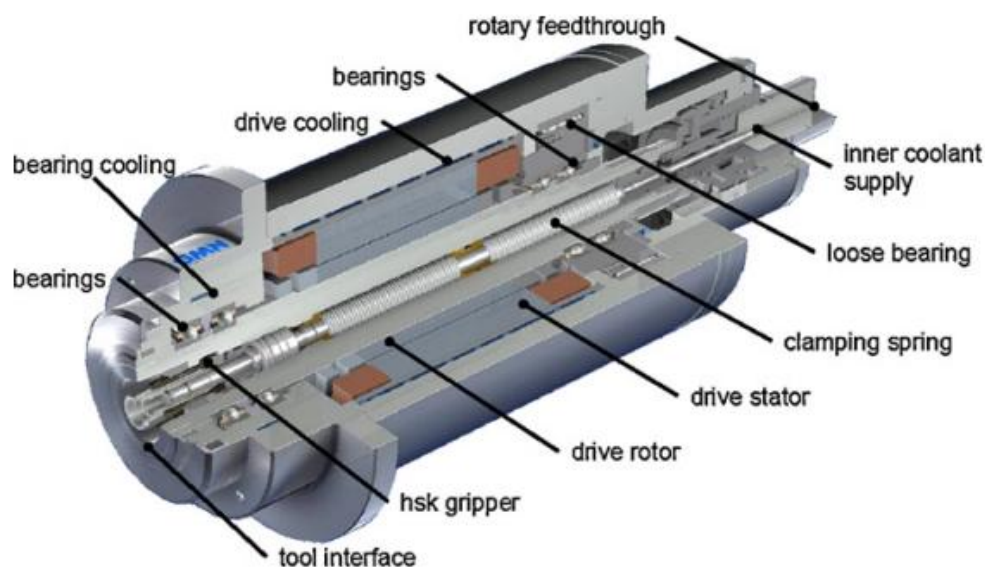


Abbildung 5: Struktur der Motorspindel²⁸

²⁶ Vgl. Denkena et al., 2020a, S. 649.

²⁷ Vgl. Abele et al., 2010, S. 781.

²⁸ Quelle: Abele et al., 2010, S. 782.

der Spindel konnte mit Hilfe von stufenlos einstellbaren Drehtransformatoren. Der begrenzte mechanische Wirkungsgrad des Getriebes verringert jedoch den Gesamtwirkungsgrad der Spindel noch weiter.

Mit der rasanten Entwicklung der Lagertechnik von den 1990er Jahren bis heute wurden spezifische Geschwindigkeitsparameter von $1 \text{ bis } 2 \times 10^6 \text{ mm/min}$ bis $4,0 \times 10^6 \text{ mm/min}$ erreicht. Damit wurde die Grundlage für die Entstehung integrierter Motorspindeln gelegt. Der sogenannte spezifische Geschwindigkeitsparameter $n \cdot d_m$ wird als Indikator für die Bewertung der Entwicklung neuer Wälzlagertechnologien verwendet. Dieser Indikator wird berechnet aus dem Produkt aus der Drehzahl im Betriebspunkt Drehzahl $n \text{ (min}^{-1}\text{)}$ und dem mittleren Lagerdurchmesser $d_m \text{ (mm)}$. Der Parameter $n \cdot d_m$ definiert die maximal zulässige Drehzahl für Standardausführungen eines Lagertyps²⁹.

Der allgemeine Aufbau einer Motorspindel ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Elekterspindel besteht aus einem Motor ohne Gehäuse, einer Spindel, Lagern, einem Spindelgehäuse, einem Antriebsmodul und einer Kühleinheit. Der Rotor des Motors ist in die Spindel eingepresst, die durch vordere und hintere Lager gestützt wird. Der Stator des Motors ist mittels einer Kühlhülse im Gehäuse der Spindeleinheit montiert. Die Drehzahländerung der Spindel wird durch das Spindeltriebsmodul gesteuert und der Temperaturanstieg in der Spindel wird durch die Kühleinheit begrenzt. Eine kegelförmige Bohrung an der Vorderseite der Spindel ermöglicht die Montage von Werkzeugen. Die federbelastete Spannvorrichtung ermöglicht einen automatischen Werkzeugwechsel. Die fortschrittlichere Motorspindel ist außerdem mit einem Temperatursensor ausgestattet, der Temperaturänderungen im gesamten Gerät überwacht. Im Vergleich zu herkömmlichen Spindelsystemen mit Getriebe sind Motorspindeln kompakter, leichter, schneller und leistungsfähiger. Aufgrund der besonderen Konstruktion der Motorspindel entsteht jedoch während des Betriebs eine große Wärme, die sich negativ auswirken kann, wenn sie nicht gekühlt wird. Integrierte Motorspindeln werden meist wegen ihrer hohen Steifigkeit eingesetzt. Im Vergleich zu indirekt angetriebenen Spindeln haben sie keine Getriebe oder Riemenantriebe, was einen hohen Bedarf an Kühlleistung für Anwendungen mit hohem Drehmoment schafft. Mögliche nachteilige Folgen³⁰ sind:

- Geometriefehler am Werkstück durch thermoelastische Verformung der Spindel
- Verkürzte Lebensdauer des Motors aufgrund schnellerer Alterung des Isoliermaterials
- Reduzierte Lagerlebensdauer durch zunehmenden Verschleiß

29 Vgl. Denkena et al., 2020b, S. 3274.

30 Vgl. Denkena et al., 2020b, S. 3275.

- Abnahme der verfügbaren Leistung des Elektromotors aufgrund der abnehmenden Flusssdichte

Daher muss ein zusätzliches Kühlungssystem für die Lager und die aktive Kühlung des Motors eingeführt werden. Bei Motorspindeln gibt es verschiedene Strategien zur Motorkühlung, Lagerkühlung und Wellenkühlung.

Die vorhandenen Konzepte zur Kühlung von Spindelmotoren unterscheiden sich hinsichtlich ihres Funktionsprinzips erheblich. Passive Ansätze sind Maßnahmen, bei denen der zu kühlende Körper nicht direkt durch ein von außen aufgebracht Kühlmittel gekühlt wird. Dies ist besonders geeignet für schonende Motoren mit geringem Drehmoment und geringer Lagerreibung. Bei aktiven Ansätzen wird ein Kühlmittel direkt so appliziert, dass eine entsprechende Absenkung der Körperzieltemperatur erreicht wird³¹.

Zur Kühlung der Lager können die Lager mit einem Hitzeschild (Abbildung 6) vor der Hitze des Motors geschützt werden. Für Hochgeschwindigkeitsspindeln wird häufig eine Öl-Luft-Schmierung verwendet. Ein Luftstrom wird durch eine Düse zwischen dem Innen- und dem Außenring des Lagers eingespritzt.

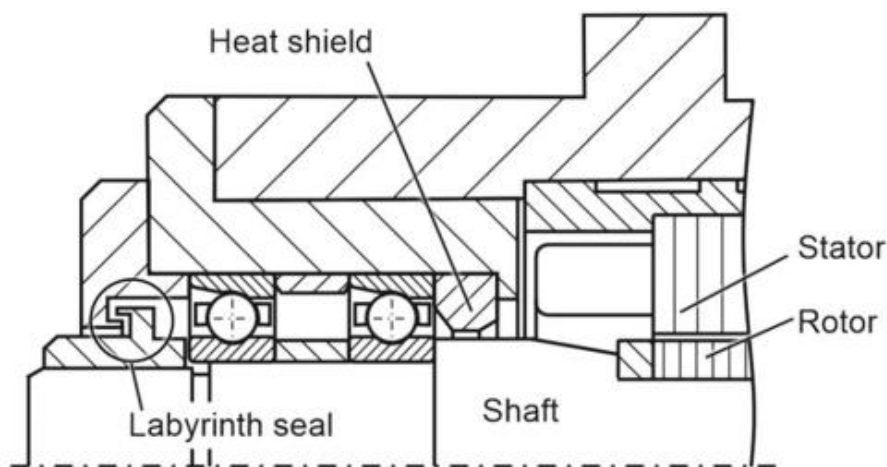


Abbildung 6: Beispiel für eine Anwendung eines Hitzeschildes³²

Die Kühlung der Welle ist eine wirksame Maßnahme zur Steigerung der Leistung von Spindeln. Ein passiver Ansatz zur Kühlung von Wellen ist die Verwendung von Wärmerohren. Es gibt eine Reihe von Studien und Patenten, bei denen die Wärmeabfuhr durch mit der Welle rotierende Lamellenwärmetauscher erreicht wird. Das Wärmerohr in

³¹ Vgl. Denkena et al., 2020b, S. 3281.

³² Quelle: Denkena et al., 2020b, S. 3284.

der Mitte der Motorwelle einführen, wie in Abbildung 7 dargestellt.

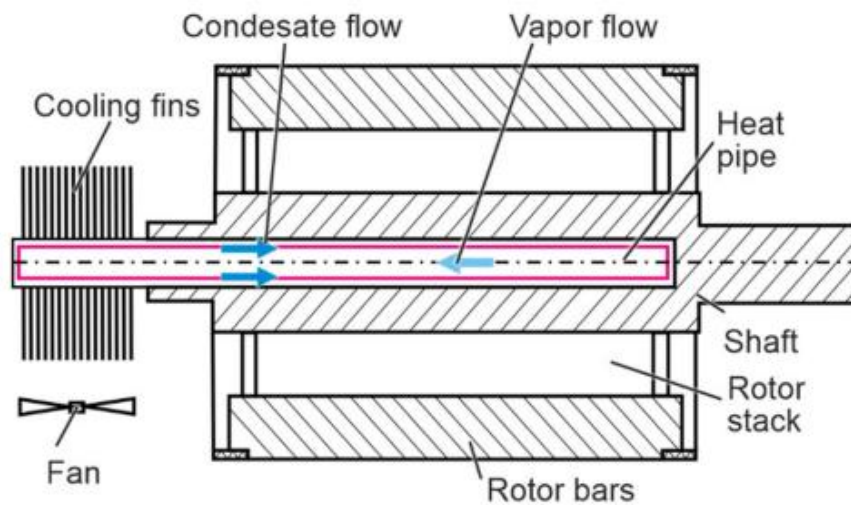


Abbildung 7: Kühlung durch Anbringen eines Wärmerohrs in der Mitte der Welle³³

Aus Motorensicht handelt es sich bei den meisten Spindelmotoren um Induktionsmotoren, gefolgt von Synchronmotoren. Abbildung 8 zeigt das charakteristische Wirkungsgrad Diagramm des Induktionsmotors. Wie zu sehen ist, kann mit Induktionsmotoren eine hohe Energieeffizienz bei hohen Lasten und hohen Drehzahlen erreicht werden. Bei kleinen Drehmomenten und niedrigen Drehzahlen fällt der Wirkungsgrad jedoch stark ab. Dies ist der Nachteil von Induktionsmotoren. Synchron-Reluktanzmotoren oder Synchronmotoren gelten als die effizientere Lösung. Im Gegensatz dazu sind Induktionsmotoren schwerer und lauter und erfordern aufgrund des hohen Übersetzungsverhältnisses mehr Wartung. Ein Haupthindernis für die Entwicklung von Synchronmotoren ist jedoch die Seltenheit und der hohe Preis von Seltenen Erden in Permanentmagneten³⁴.

Einerseits führen die hohe Geschwindigkeit und Leistung der Elektroschneidspindeln zu höherer Materialabtragsrate und gleichzeitig zu einer höheren Energieeffizienz. Andererseits führen hohe Schnittgeschwindigkeiten auch zu einer höheren Oberflächenqualität bei der Schlichtbearbeitung. Die Spindelmotoren sind zwar leistungsfähiger als die Getriebe- und Schneidspindeln, aber das zusätzliche Kühlsystem bedeutet einen zusätzlichen Energieverbrauch in der Produktion. Daher muss die Wahl nach einer gründlichen Analyse getroffen werden, um die Energieeffizienz wirksam zu verbessern.

³³ Quelle: Denkena et al., 2020b, S. 3285.

³⁴ Vgl. Kramer et al., 2012, S. 752.

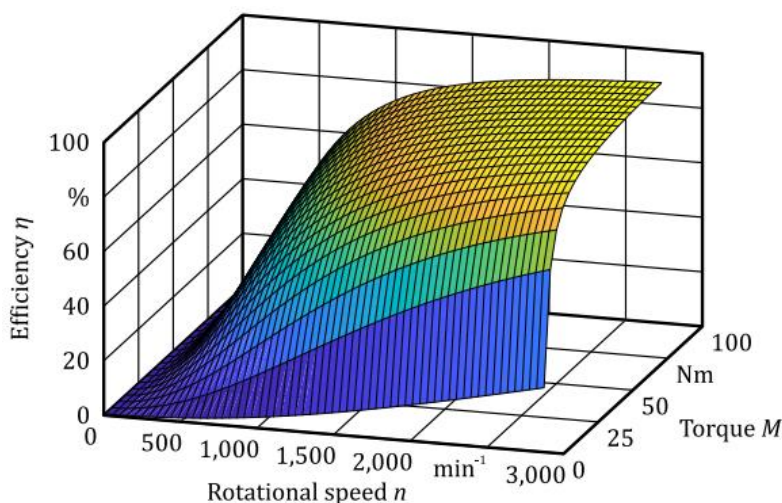


Abbildung 8: Wirkungsgraddiagramm eines Spindelinduktionsmotors³⁵

4.2.2. Lager und Führung

Die Aufgabe von Lagern und Führungen in Werkzeugmaschinen besteht darin, Kräfte zu übertragen und lineare oder rotierende Bewegungen zu führen. Der durch Reibung verursachte Wärmeverlust in diesem Modul ist die Hauptursache für eine geringere Energieeffizienz. Verschleiß führt auch zu einer Verkürzung der Lebensdauer von Spindeln und Lagern³⁶.

Wälzlager sind aufgrund ihrer guten Eigenschaften wie geringe Breite, geringe Verlustleistung und niedrige Lagertemperaturen weit verbreitet. Als Nachteile sind jedoch die große Masse des Wälzlagers zu nennen, die die Kühlung und Schmierung des Lagers bei hohen Drehzahlen problematisch macht (wie im Fall der oben erwähnten Motorspindel), sowie die geringere Tragfähigkeit. Spindellager verbrauchen viel Energie, vor allem wegen der hohen Reibung zwischen den Wälzkörpern und den Innen- und Außenringen, die durch hohe Drehzahlen und Lasten verursacht wird³⁷. Um sich an die hohen Drehzahlen von Werkzeugmaschinen anzupassen, verfolgen die Lagerentwickler zwei Ansätze: die Verwendung keramischer Werkstoffe anstelle von Stahl für die Herstellung von Lagern und die Verkleinerung der Lagerkugeln³⁸. Normalerweise ist für wälzgelagerte Werkzeugmaschinenspindeln ein Schmiersystem erforderlich. Um höhere Drehzahlen zu

³⁵ Quelle: Denkena et al., 2020a, S. 652.

³⁶ Vgl. Denkena et al., 2020a, S. 653-654.

³⁷ Vgl. Brecher/Weck, 2017, S. 206–211.

³⁸ Vgl. Brecher/Weck, 2017, S. 304.

erreichen, ist der Einsatz von Öl-Luft-Schmierung für die Lager weit verbreitet. Dieser Ansatz erfordert ein zusätzliches Druckluftsystem, was wiederum den Energiebedarf erhöht³⁹.

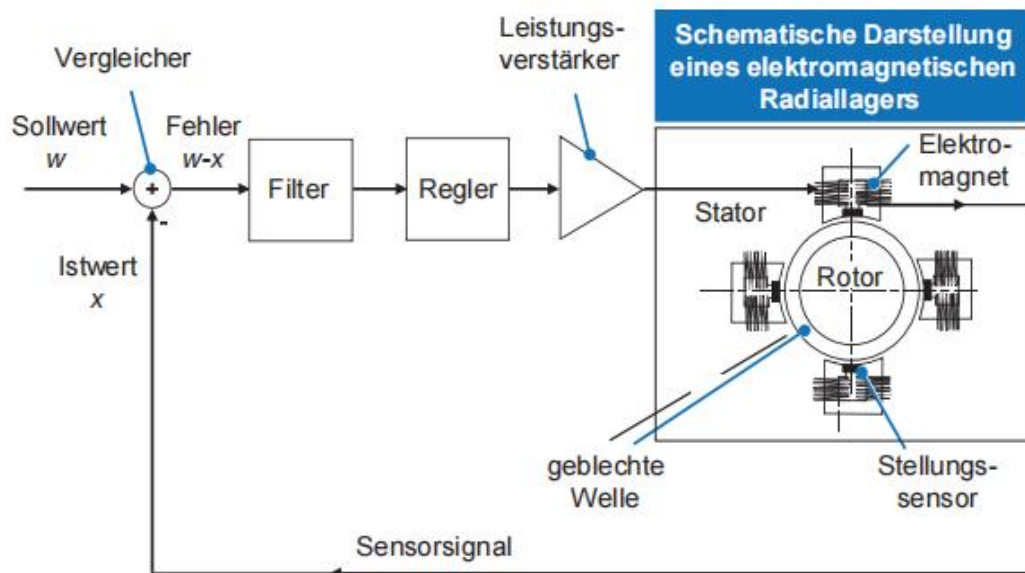


Abbildung 9: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Radiallagers⁴⁰

Elektromagnetischen Lagern wird ein Energiesparpotenzial als schmierungsfreie Lager zugeschrieben, obwohl sie in der Werkzeugmaschinenindustrie nur selten eingesetzt werden. Dieses Lager besteht aus zwei Komponenten, dem elektronischen Regelungssystem und der Lagerung. Radiale elektromagnetische Lager und axiale elektromagnetische Lager unterscheiden sich im Aufbau. Das Prinzip des Radiallagers ist in Abbildung 9 dargestellt. Ein ferromagnetisches Material ist um die äußere Schicht des Rotors gewickelt. Der Stator ist mit dem Elektromagneten umwickelt, der ein Magnetfeld in der dem ferromagnetischen Material entgegengesetzten Richtung erzeugt. Dadurch kann der Rotor aufgrund der gegenseitigen Anziehung der Magnetkräfte in der Mitte des Stators schweben. Mit einem Sensor wird die radiale Verlagerung des Rotors überwacht. Ein vorgegebener Sollwert wird eingestellt, um die Lagerposition mit Hilfe eines geschlossenen Regelkreises zu korrigieren. Das Axiallager (Abbildung 10) funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie das Radiallager, nur dass der Stator durch einen Scheibenanker ersetzt wird. Der Sensor dient zur Überwachung der axialen Verlagerung,

³⁹ Vgl. Brecher/Weck, 2017, S. 346.

⁴⁰ Quelle: Brecher/Weck, 2017, S.289.

die besonders wichtig ist, da sie sich auf die Genauigkeit auswirkt. Die Funktion des Sicherheitslagers besteht darin, die Zerstörung des elektromagnetischen Lagers im Falle eines Ausfalls oder einer Überlastung zu verhindern.

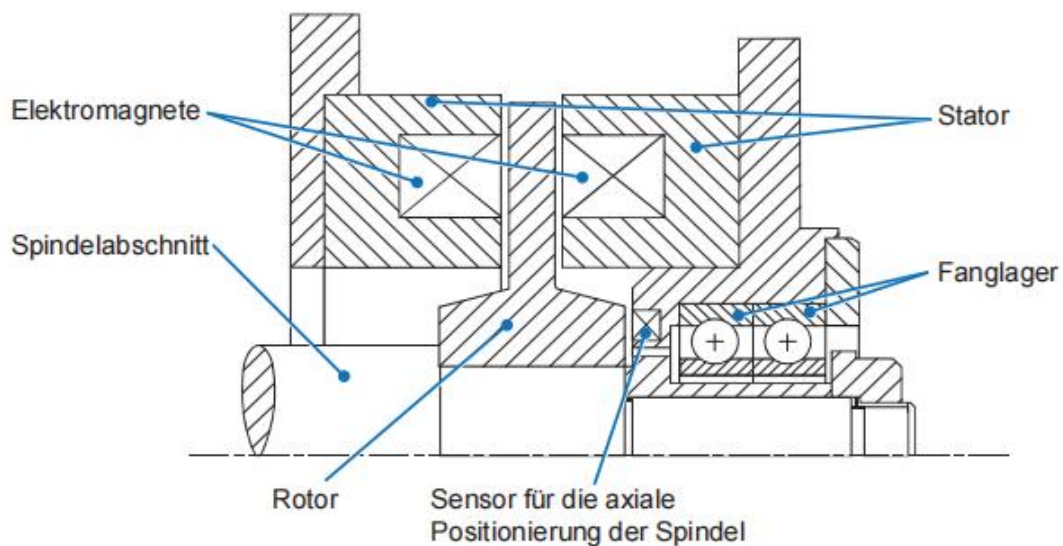


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Axiallagers⁴¹

Im Vergleich zu Wälzlagern haben elektromagnetische Lager die Vorteile einer hohen Geschwindigkeit und einer langen Lebensdauer. Was den Energieverbrauch betrifft, so haben ölfreie elektromagnetische Lager geringere Reibungsverluste und machen Schmiersysteme überflüssig. Der Einsatz von Leistungselektronik wie Sensoren, Regelsystemen usw. kann zu einem hohen Energiebedarf führen. Der hohe Preis von elektromagnetischen Lagern macht sie in der Werkzeugmaschinenindustrie selten⁴².

Führungen sind für die wichtigsten linearen Bewegungen, die zwischen Rahmenelementen wie Ständer, Schlitten usw. erforderlich sind⁴³. In den letzten Jahren haben Wälzführungen nach und nach die Gleitführungen in der Position kleiner und mittlerer Maschinen ersetzt. Nach der Tribologie ist die Reibungsleistung, die durch Rollreibung erzeugt wird, viel geringer als die durch Gleitreibung⁴⁴. Abbildung 11 zeigt eine der einfachsten Längsführungen in Bezug auf die Konstruktion, die aus zwei Schienen und einer aus

⁴¹ Quelle: Brecher/Weck, 2017, S. 290.

⁴² Vgl. Brecher/Weck, 2017, S. 289-290.

⁴³ Vgl. Neugebauer, 2013, S. 20.

⁴⁴ Vgl. Brecher/Weck, 2017, S. 291-295.

zahlreichen Wälzkörpern bestehenden Wälzkette besteht.

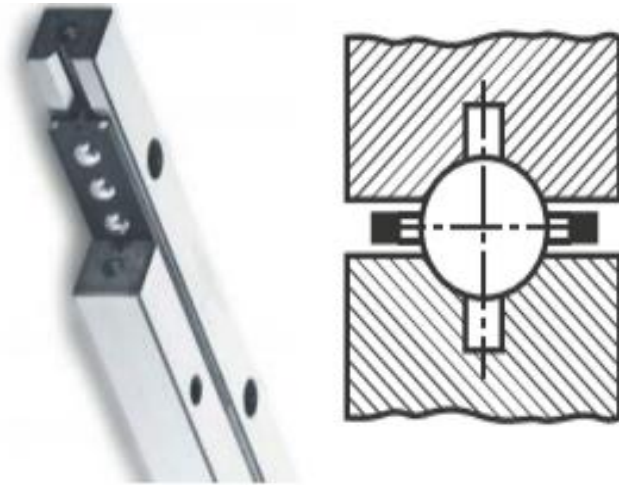


Abbildung 11: Längsführung⁴⁵

Profilschienenführungen mit Kugeln oder Rollen werden am häufigsten für lineare Bewegungen in Werkzeugmaschinen eingesetzt.

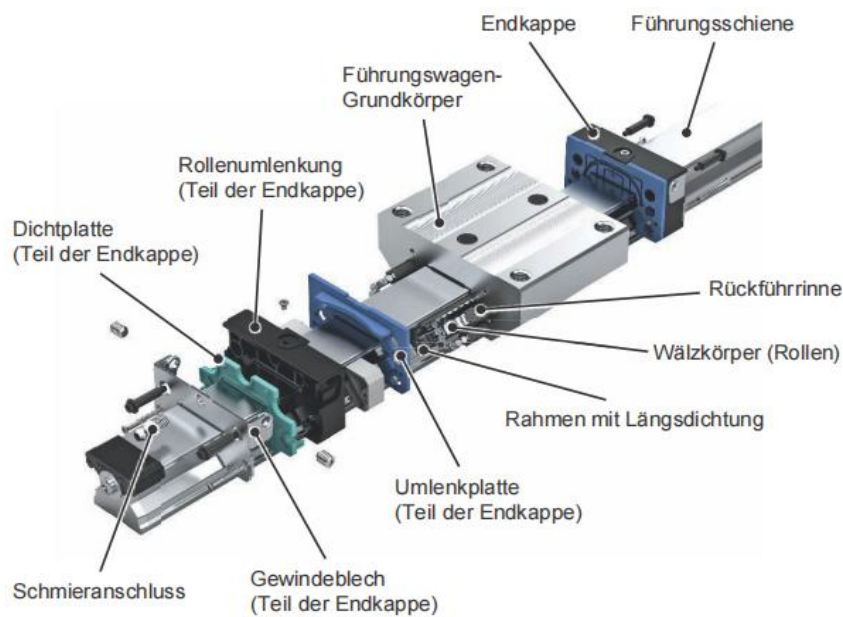


Abbildung 12: Aufbau einer Profilschienenführung⁴⁶

Die schematische Darstellung der Profilführung ist in Abbildung 12 zu sehen, die sich aus

⁴⁵ Quelle: Brecher/Weck, 2017, S. 293.

⁴⁶ Quelle: Brecher/Weck, 2017, S. 295.

Führungsschiene, Führungswagen und Wälzkörper zusammensetzt. Die Relativbewegung zwischen Führungswagen und Führungsschiene wird durch die Bewegung der Rollen in einer umlaufende Bahn erreicht. Die Wälzkörper laufen in einer endlosen Schleife mithilfe der Umlenkplatte, der Rollenumlenkung, sowie der Rückführinne. Profilschienen müssen mit Dichtungsvorrichtungen versehen werden, um die Wälzkörper vor Verschmutzung zu schützen⁴⁷.

Nach Denkena et al. Sind Schmierstoffe und Dichtungen die Hauptfaktoren, die die Reibungsverluste von Profilführungen beeinflussen. Kugelgewindetriebe werden auch für Linearantriebe eingesetzt, die Drehbewegungen in lineare Bewegungen umwandeln. Kugelgewindetriebe bestehen aus einer Spindel, Wälzkörpern, einer Mutter und einem Kugelrückführsystem. Der Wirkungsgrad von Kugelgewindetrieben kann bis zu 95 % betragen und liegt damit weit über dem von Linearführungen⁴⁸.

Lager und Führungen haben ein geringeres Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz, da sie in der Regel zusätzliche energieverbrauchende Systeme (Elektromagnetischen Lagern) und hohe Kosten verursachen.

4.2.3.Kühlssysteme

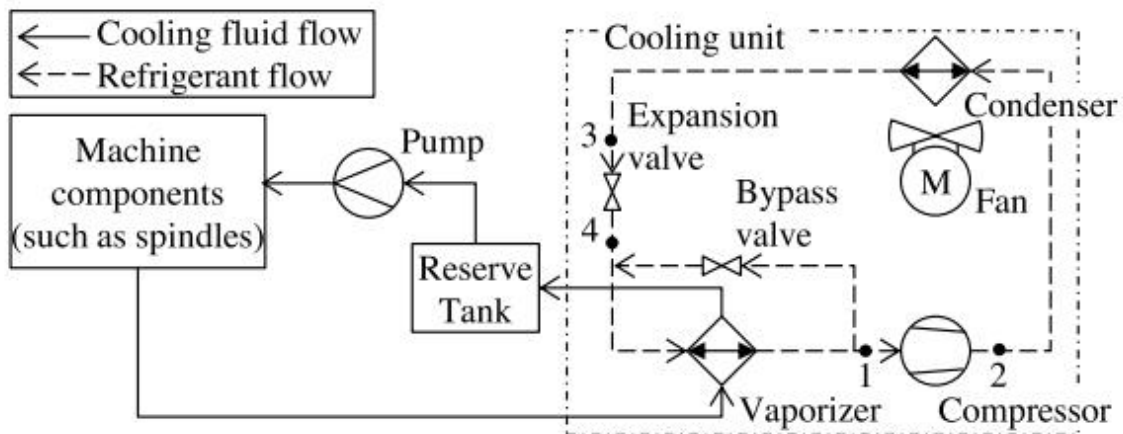
Wie bereits erwähnt, dominieren die Nebenaggregate den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen. Die Senkung des Energiebedarfs der Nebenaggregate ist ein wirksames Mittel zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz der Maschine. Das Kühlsystem ist eine der wichtigsten energieverbrauchenden Komponenten des Nebenaggregats der Maschine und macht im Leerlauf etwa 25 % des Gesamtenergieverbrauchs aus⁴⁹. Die Kühlaggregate werden häufig in Werkzeugmaschinen installiert, um die von den Spindeln erzeugte Wärme abzuführen, da die erzeugte Wärme zu einer thermischen Verformung der Werkzeugmaschine führt und die Genauigkeit der bearbeiteten Teile beeinträchtigt. Eine Möglichkeit zur Senkung des Energieverbrauchs von Kühlsystemen besteht in der Optimierung der Komponenten, eine andere in der Verringerung der thermischen Belastung des Systems⁵⁰, z. B. durch die Verringerung der Wärmeverluste in den Lagern und Führungen, wie im vorherigen Kapitel erwähnt.

47 Vgl. Brecher/Weck, 2017, S. 291–295

48 Vgl. Denkena et al., 2020a, S.654.

49 Vgl. Mori et al., 2019, S. 14.

50 Vgl. Denkena et al., 2020a, S.655.

Abbildung 13: Heißgas-Bypass-Kühlssystem⁵¹

In den neusten Werkzeugmaschinen werden hauptsächlich Lüfterkühlung und Heißgas-Bypass als Kühlaggregat verwendet. Die Lüfterkühlung verbraucht weniger Energie als der Heißgas-Bypass, allerdings ist die Kalttemperatur der Kühlflüssigkeit bei Raumtemperatur gesättigt, und die Kühlleistung kann nicht aktiv gesteuert werden. Daher werden bei Werkzeugmaschinen mit geringer Wärmeerzeugung Lüfterkühlungen eingesetzt⁵². Die Wärmeabfuhrkapazität des Kühlaggregats (Kühlleistung) kann jedoch bei einem Heißgas-Bypass-Kühlaggregat gesteuert werden. Daher ist dieser Kühlgerätetyp in den neuesten Werkzeugmaschinen weit verbreitet. Das Heißgas-Bypass-Kühlssystem ist in Abbildung 13 dargestellt, wobei die durchgezogene Linie die Kühlflüssigkeit und die gestrichelte Linie das Kältemittelgas bezeichnet. Das Kältemittel wird in einem Tank gelagert und mit einer Verdrängerpumpe in die Maschine befördert, um die während des Prozesses entstehende Wärme abzuführen. Im Verdampfer wird die Wärme an die Kühlflüssigkeit übertragen. Die Kühlflüssigkeit wird durch den Kompressor zum Kondensator geleitet, wo die Wärme an die Umgebung abgeführt wird. Um ein Absinken der Temperatur unter eine bestimmte Untergrenze zu verhindern, leitet ein Heißgas-Bypass-Ventil das Kältemittel direkt zum Verdichter um, was zu einem sehr ungünstigen energetischen Zustand führt⁵³. Zum besseren Verständnis des Energieverbrauchs von Heißgas-Bypass-Kühlssystemen führen Mori et al. die Definition

51 Vgl. Mori et al., 2019, S. 15.

52 Vgl. Mori et al., 2019, S. 14.

53 Vgl. Denkena et al., 2020a, S.655.

einer Leistungskoeffizient⁵⁴ (LK) ein.

$$LK = \frac{P_{\text{Kühlleistung}}}{P_{\text{Kühlsystem}}} \quad \text{Gl 5}$$

wobei der Nenner die Leistung des gesamten Kühlsystems und der Zähler die Ausgangsleistung des Systems zur Kühlung der Maschine ist. Mori et al. weisen darauf hin, dass es zwei Faktoren gibt, die bei Heißgas-Bypass-Systemen zu beachten sind⁵⁵:

- Wenn die Kühlleistung weniger als 30% der maximal erreichbaren Leistung beträgt, sinkt LK entsprechend.
- Der Einsatz von Zweipunktregler (on/off) von Heißgas-Bypass-Systemen kann den Energieverbrauch erheblich reduzieren.

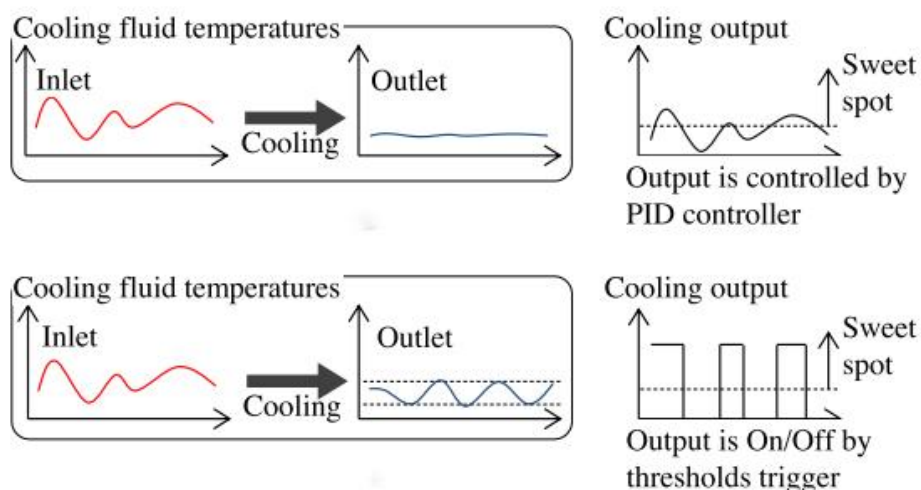


Abbildung 14: Vergleich der PID-Regelung mit der Zweipunktregelung⁵⁶

Konventionelle Heißgas-Bypass-Kühlgeräte verwenden Proportional-Integral-Derivativ (PID) Regler. Entsprechend den Eigenschaften des PID-Regelkreises wird die Werkzeugmaschinentemperatur den voreingestellten Sollwert gleichmäßig und schnell erreichen. Mit dieser Methode können zwar die Wärmeschwankungen minimiert werden, der Energieverbrauch kann jedoch nicht verringert werden. Bei der so genannten Zweipunktregler-Kühlung wird die Temperatur des Kühlmittels als Eingangsgröße

54 Vgl. Mori et al., 2019, S. 15.

55 Vgl. Mori et al., 2019, S. 16.

56 Quelle: Mori et al., 2019, S. 16.

verwendet und ein Zweipunktregler zur Einstellung der Kühlleistung (cooling output) des Systems eingesetzt. Wenn die eingestellte obere Grenztemperatur erreicht ist, schaltet sich die Kühlung ein. Bei Unterschreitung der eingestellten unteren Grenztemperatur schaltet sich die Kühlung aus und die Kühlleistung ist Null. In Abbildung 14 werden die Unterschiede zwischen den beiden Regelungssystemen verglichen. Daraus ist ersichtlich, dass die Kühlmitteltemperatur nach dem PID-Regeler immer stabil ist, während bei dem Zweipunktregler erhebliche Temperaturschwankungen auftreten. Obwohl der Energieverbrauch des Heißgas-Bypass-Kühlsystems mit dem Zweipunktregler gering ist, können sich die während des Prozesses entstehenden thermischen Schwankungen auf die Bearbeitungsgenauigkeit der Werkzeugmaschine auswirken. Sweet Spot im Diagramm bezieht sich auf eine Kühlleistung von 30 % der maximalen Kühlleistung, die das System erreichen kann. Wenn die Kühlleistung weniger als 30 % der maximalen Kühlleistung beträgt, ist das Kühlsystem, wie oben erwähnt, weniger effizient und die LK ist deutlich niedriger. Die Zweipunktregelung wird daher wie folgt eingestellt: Wenn die Ausgangsgröße nicht 30 % der maximalen Kühlleistung erreicht, wird sie auf 30 % der gesamten Kühlleistung eingestellt. Wenn die Ausgangsgröße 30 % der maximalen Kühlleistung übersteigt, wird sie auf das 1,5-fache der Ausgangsgröße des ursprünglichen PID-Regelsystems eingestellt. Damit wird sichergestellt, dass das Kühlsystem immer eine hohe Leistung erbringt⁵⁷.

Um die Energieeinsparungen der Zweipunktregelung und die Auswirkung thermischer Schwankungen auf Werkzeugmaschinen zu untersuchen, führen Mori et al. Experimente durch, in denen der Kühleffekt von PID-Regelung und Zweipunktregelung mit längeren Schaltintervallen und Zweipunktregelung mit kürzeren Schaltintervallen verglichen wurde⁵⁸.

Es wurde festgestellt, dass die Zweipunktregelung des Kühlungssystems im hohen LK-Bereich ($\geq 30\%$ Gesamtkühlleistung) im Vergleich zur konventionellen PID-Regelung etwa 25 % des Energieverbrauchs einspart. Die während des Prozesses entstehenden thermischen Schwankungen können durch eine Verringerung des Schaltintervalls minimiert werden, und es hat sich gezeigt, dass minimierte thermische Schwankungen eine vernachlässigbare Auswirkung auf die Bearbeitungsgenauigkeit haben. Kürzere Intervalle sparen auch noch mehr Energie. Werkzeugmaschinen mit größerer Wärmekapazität sind für diese Anwendung besser geeignet, da Werkzeugmaschinen mit

57 Vgl. Mori et al., 2019, S. 16.

58 Vgl. Mori et al., 2019, S. 17.

geringer Wärmekapazität empfindlich auf Änderungen der Kühlmitteltemperatur reagieren. Außerdem lassen sich in diesen Maschinen leicht thermische Schwankungen erzeugen. Die negative Seite ist jedoch, dass häufiges Ein- und Ausschalten zu einer Verkürzung der Lebensdauer des Kühlgeräts führen kann⁵⁹.

Neben dem Zweipunktregler, der den Energieverbrauch des Heißgas-Bypass-Kühlsystems senkt, kann auch der Einsatz eines Scrollverdichters anstelle eines konventionellen Verdichters ohne Heißgas-Bypass-Struktur Energie sparen⁶⁰.

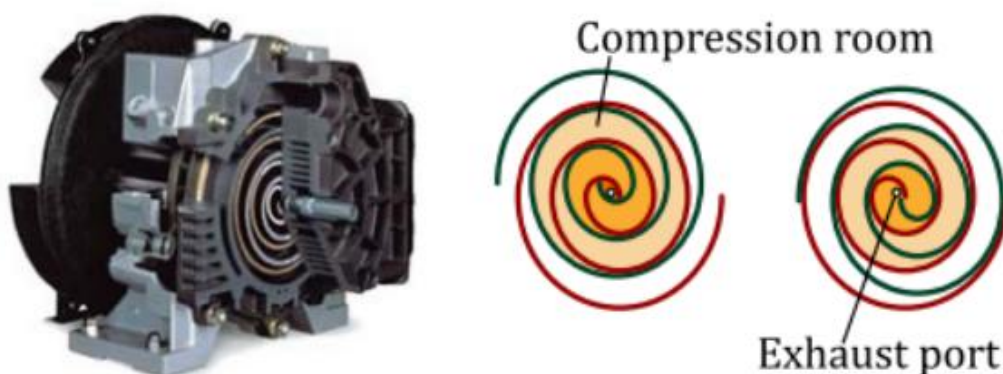


Abbildung 15: Scrollverdichter⁶¹

Der Scrollverdichter in Abbildung 15 besteht aus dynamische und statische Spiralen, die sich ineinander verkämmen. Beim Ansaug-, Verdichtungs- und Entleerungsvorgang ist die statische Spirale am Rahmen befestigt, und die dynamische Spirale wird von der Exzenterwelle angetrieben und dreht sich um den Mittelpunkt der statischen Spirale. Kältegas wird durch den Kompressor in den Umfang der statischen Spirale gesaugt, mit der Drehung der Exzenterwelle wird das Gas allmählich in einer Reihe von Kompressionskammern, bestehend aus dynamischer und statischer Spiralen, komprimiert und dann kontinuierlich durch das axiale Loch entladen.

Zu den Vorteilen dieser Technologie gehören eine geringere Anzahl beweglicher Teile, einfache Struktur, geringe Größe, geringes Gewicht, wenige Teile, geringer Lärm, eine konstante Antriebsgeschwindigkeit, die zu einer kontinuierlichen Kältemittelzirkulation und weniger elektromagnetischen Störungen führt, sowie eine präzise Temperaturregelung.

59 Vgl. Mori et al., 2019, S. 21.

60 Vgl. Denkena et al., 2020a, S.655-656.

61 Quelle: Denkena et al., 2020a, S.656.

Studien haben gezeigt, dass digitale Scrollverdichter im Vergleich zu den modernsten Heißgas-Bypass-Kühlaggregaten ein Energieeinsparpotenzial von 20% bis 40% haben⁶².

4.2.4. Kühlschmierstoffsystemen

Kühlschmierstoff (KSS) erfüllen während des Bearbeitungsprozesses verschiedene wichtige Aufgaben, um die Werkstückqualität sicherzustellen, den Werkzeugverschleiß zu verringern und die Produktivität des Prozesses zu erhöhen. Zu den Hauptaufgaben gehören die Kühlung und Schmierung der Kontaktzone sowie der Spantransport. Der Einsatz von Kühlschmierstoffen ist jedoch mit erheblichen ökonomischen und ökologischen Kosten verbunden. Die ökonomischen Kosten umfassen die Kosten für die Beschaffung, Aufbereitung und Entsorgung sowie die elektrische Energie für Pumpen und Aufbereitungsanlagen, z.B. Filteranlagen. Die ökologischen Kosten sind häufig mit der umweltschädlichen Zusammensetzung der Flüssigkeit verbunden, die bei unsachgemäßer Entsorgung zu Gesundheitsrisiken für den Maschinenführer und zu Umweltschäden führt. Die verschiedenen Pumpen im Kühlschmiermittelkreislauf sowie die Kühlsysteme haben einen großen Anteil am elektrischen Energiebedarf⁶³.

Flüssige Kühl- und Schmiermittel werden hauptsächlich in Fertigungsprozessen eingesetzt. Es gibt drei verschiedene Strategien, um diese Flüssigkeiten in die Kontaktzone eines Schleifprozesses zu bringen: Überflutungsschmierung, Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung. Diese Strategien unterscheiden sich im Wesentlichen in Bezug auf die eingesetzte Flüssigkeitsmenge⁶⁴. Die Überflutungsschmierung wird für eine Kühl- und Schmiermittelzufuhr von mehr als 2 Litern pro Minute verwendet. In der Praxis schwankt die Menge der zugeführten Flüssigkeit meist zwischen 10 und 100 Litern pro Minute. Die Überflutungsschmierung ist jedoch auch mit dem Bedarf an zusätzlichen Maschinen und Geräten zur Filterung der Luft und des Kühlschmierstoffs oder zur Reinigung der Werkstücke verbunden. Dies führt zu einem hohen Bedarf an Energie. Bei der Minimalmengenschmierung werden unterschiedliche Werte mit 10 bis 50 ml/Stunde oder 50 bis 500 ml/Stunde angegeben. Durch diese Strategie können die Kosten für Schmierstoff und Entsorgung sowie der Bedarf an einer Filtrationsanlage reduziert werden. Beim Trockenbearbeitung wird auf den Einsatz von Kühl- und Schmiermedien gänzlich

62 Vgl. Denkena et al., 2020a, S.655-656.

63 Vgl. Klocke, 2017, S. 120-122.

64 Vgl. Madanchi et al., 2017, S. 564-565.

verzichtet. Dadurch ergeben sich ähnliche Vorteile wie bei der Minimalmengenschmierung, es wird weder ein Filtersystem noch der Einsatz von KSS benötigt. Ohne den Einsatz steigt jedoch das Risiko für thermische Schäden, es können geringere Materialabtragsraten erzielt werden und die Oberflächenqualität nimmt ab⁶⁵.

Die Energieeffizienz von Kühlschmierstoffsystemen in Schleifprozessen wurde von Madanchi et al. eingehend untersucht. Die Studie konzentriert sich auf die Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung⁶⁶ (E_{KSS}).

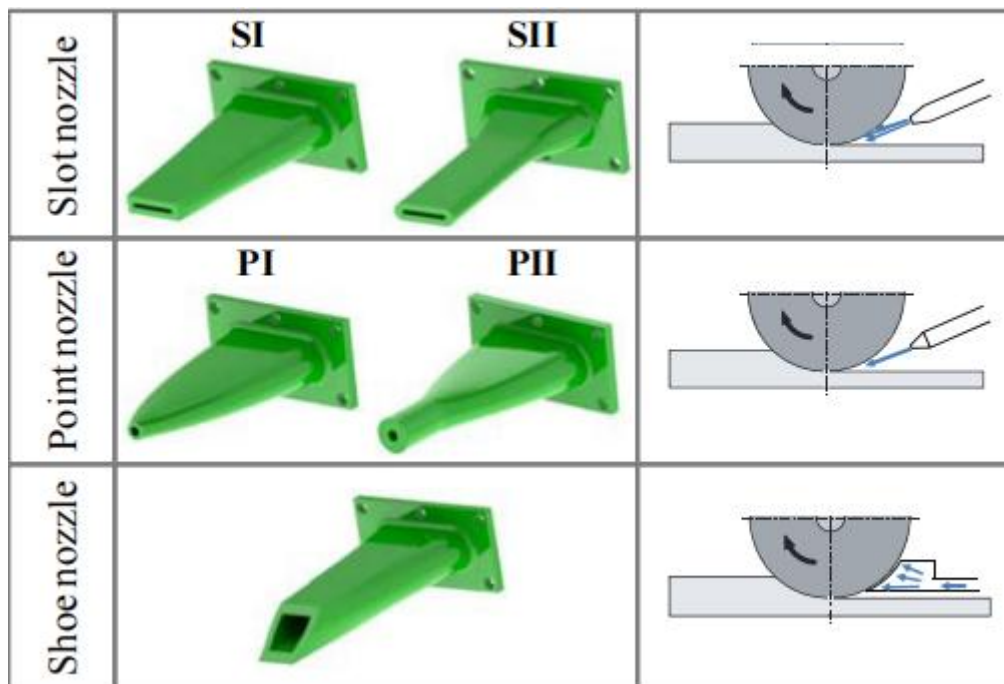


Abbildung 16: Übersicht der verwendeten Düsen⁶⁷

$$E_{KSS} = \frac{Q_{KSS, SINNVOLL}}{Q_{KSS}} \quad \text{Gl 6}$$

In Gleichung 6 steht Q_{KSS} für die Gesamtmenge der aufgetragenen KSS und $Q_{KSS, SINNVOLL}$ ist sinnvoller KSS, die die Kontaktfläche von Schleifprozess erreichen kann.

Die Beziehung zwischen Leistung und Durchfluss für Kühlschmierstoffpumpen wird ebenfalls angegeben.

⁶⁵ Vgl. Madanchi et al., 2017, S. 564–565.

⁶⁶ Vgl. Madanchi et al., 2017, S. 566.

⁶⁷ Quelle: Madanchi et al., 2017, S. 567.

$$P_{\text{pump}} = \frac{Q_{\text{KSS}} * p_{\text{KSS}} * \rho_{\text{KSS}}}{600 * \eta_{\text{pump}}} \quad \text{Gl 7}$$

wobei p_{KSS} der Pumpendruck, ρ_{KSS} die Dichte der Kühlschmierstoffs und η_{pump} der Wirkungsgrad der Pumpe ist⁶⁸.

Neben der Auswahl der Zuführungsstrategie ist es auch wichtig, einen geeigneten Düsentyp zu wählen, um den Schleifprozess zu verbessern. Um die Auswirkungen verschiedener Düsentypen auf die Effizienz der Kühlschmierstoffzuführung und die Leistungsaufnahme der Pumpe zu untersuchen, führen Madanchi et al. entsprechende Versuche durch und analysierten die Ergebnisse. Die Auswahl der für die Versuche verwendeten Düsen ist in Abbildung 16 dargestellt.

Es wurden zwei verschiedene Typen von Düsen (Überflutungsdüsen) getestet. Im Vergleich dazu hat Düse II eine gerade Düsenlänge ohne Änderung des Querschnitts. Zusätzlich wurden zwei nicht überflutende Punktdüsen entworfen und analysiert. Düse II hat wiederum eine gerade Düsenlänge. Zu Referenzzwecken wurde auch eine Schuhdüse mit einer der Schleifscheibe angepassten Geometrie getestet. Die für die Experimente verwendeten Schleifmaschinen sind so konstruiert, dass sie die Gesamtmenge an Kühlschmierstoff während des Prozesses aufzufangen und den nützlichen Kühlschmierstoff vom nicht nützlichen Kühlschmierstoff trennen und somit den Kühlschmierstofffluss durch die Kontaktzone messen. Alle Versuchsdüsen werden im 3D-Druckverfahren hergestellt.

Die Düsen wurden bei unterschiedlichen Kühlschmierstoffgeschwindigkeiten und Durchflussmengen getestet, wobei die Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe konstant bei 25 m/s blieb. Die Punktdüse PI, die Schlitzdüse SI und die Schlitzdüse SII wurden auch bei einer tangentialen Positionierung mit einem Winkel von 20° getestet. Abbildung 17 zeigt die Versuchparameter und Ergebnisse.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Punktdüsen die Menge an Kühlschmierstoff, die die Kontaktzone erreicht, mit zunehmender Kühlschmierstoffgeschwindigkeiten steigt. Die Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung der PI erreicht bei einer Kühlschmierstoffgeschwindigkeit von 25 m/s ein Maximum von über 40 % und nimmt dann mit zunehmender Kühlschmierstoffgeschwindigkeiten ab. Der sinnvolle KSS und die Effizienz der PII und der PI bei 20 Grad ist über einen Bereich von Geschwindigkeiten von

68 Vgl. Madanchi et al., 2017, S. 567.

20 bis 40 m/s geringer als PI. Dies deutet darauf hin, dass sich Änderungen des Düsenwinkels und der Düsenform negativ auf diesen PI auswirken.

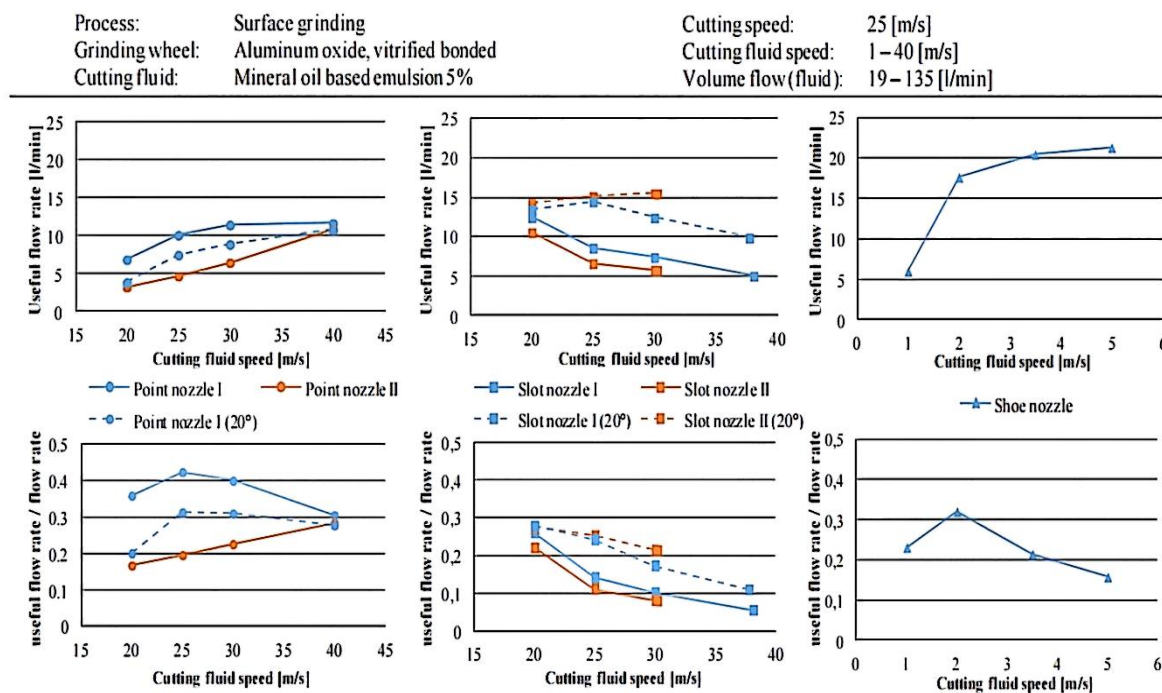


Abbildung 17: Ergebnisse des nutzbaren Schneidstoffdurchsatzes in Abhängigkeit vom Düsendesign⁶⁹

Anders verhält es sich bei Schlitzdüsen. Die Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung der S-Düsen beträgt weniger als 30 % über den Geschwindigkeitsbereich von 20 bis 40 m/s. Der maximale Wirkungsgrad wird bei 20 m/s erreicht. Der sinnvolle Kühlschmierstoff und die Effizienz von SII bei 20 Grad ist höher als die von SI, SII und SI bei 20 Grad. SII bei 20 Grad sorgt auch dafür, dass der Durchfluss des sinnvollen Kühlschmierstoffs mit zunehmender Kühlschmierstoffgeschwindigkeit (nach 25m/s) langsam ansteigt, im Gegensatz zu den anderen Fällen, in denen die Durchflussmenge mit der Geschwindigkeit abnimmt.

Der sinnvolle Durchfluss, die mit Schuhdüsen erreicht werden kann, ist zwar hoch, aber nur bei niedrigen Kühlmittelgeschwindigkeiten (1-5 m/s). Außerdem handelt es sich bei den Schuhdüsen um Überflutungsdüsen, die eine große Menge an Schneidflüssigkeit benötigen und daher in der Regel ineffizient sind⁷⁰.

Nach Gleichung 7 können der Energieverbrauch der Pumpe für jede Düse berechnet

69 Vgl. Madanchi et al., 2017, S. 568.

70 Vgl. Madanchi et al., 2017, S. 568.

werden. Wenn 10 l/min Schneidflüssigkeit für den Schleifprozess benötigt werden, wird die Pumpenleistung in diesem Fall mit 0,34 kW für S2 und 0,26 kW für P1 bestimmt. Dies führt zu einer Verringerung des Energieverbrauchs um 23,5 %.

Aus den Experimenten von Madanchi et al. kann geschlossen werden, dass Düsentyp, -design und -position einen signifikanten Einfluss auf die Schneidstoffzufuhr haben. Es gibt einige Konstruktionen, die die Düsen optimieren⁷¹:

- Ein scharfkantiger Düsenausgang
- Eine hohe Oberflächenqualität und Rauheit im Inneren der Düse
- Glatte, konkave oder parabolische Übergänge am Ende der Düse
- Eine minimale gerade Düsenlänge

71 Vgl. Madanchi et al., 2017, S. 566.

4.3. Leichtbau der Werkzeugmaschine

Der Leichtbau kann sich direkt oder indirekt auf die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen auswirken. Theoretisch kann der Leichtbauansatz durch die sogenannten Leichtbaufaktoren⁷² (LF) beschrieben werden.

$$LF = \frac{c}{m} \quad \text{Gl 8}$$

c ist die Steifigkeit der Struktur und m ist die Masse.

Leichtbaumaßnahmen werden umgesetzt, um durch geeignete Materialauswahl und Konstruktion einen möglichst hohen Leichtbaufaktor für die Maschinenkomponenten zu erreichen. Das bedeutet, m zu reduzieren und c zu erhöhen so weit wie möglich.

Schwere Bauteile erzeugen Gewichtskräfte ($F_G = mg$). Bei beweglichen Teilen auch erzeugt Trägheitskräfte aufgrund der Beschleunigung ($F_T = m a$).

Bei beschleunigenden Bauteilen wirken Trägheitskräfte auf die notwendigen Drehmomente ein. Beschleunigungsenergien in Werkzeugmaschinenachsen sind Blindenergien, die von verlustbehafteten Antrieben aufgebracht werden müssen. Die Erzeugung von Blindenergie wirkt sich nachteilig auf die Drehmomentübertragung des Antriebs aus und beeinträchtigt daher tendenziell die Energieeffizienz des Motors.

Einer der Vorteile der reduzierten basiert auf konstanten Antriebskräften bei Massen, die sich mit einer reduzierten Beschleunigung bewegen, was zu einer höheren potenziellen Beschleunigung führt. Dies führt zwar nicht zu einer direkten Reduzierung der Antriebsverluste. Allerdings kann die Sekundärbearbeitungszeit und teilweise auch die Primärbearbeitungszeit und damit der Anteil der Grundlastverluste pro Werkstück reduziert werden, was eine indirekte Steigerung der Energieeffizienz bewirkt⁷³.

Reibungsverluste aufgrund der Schwerkraft, wie z. B. die in Kapitel 4.2.2 erwähnten Energieverluste in Lagern und Führungen, nehmen mit geringerer Masse ebenfalls ab. Durch die Verringerung dieser Reibungsverluste kann die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen direkt verbessert werden.

Die Verringerung der Masse führt auch zu einer Erhöhung der Eigenfrequenz:

⁷² Vgl. Kroll et al., 2011, S. 148.

⁷³ Vgl. Kroll et al., 2011, S. 149.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

GI 9

Dies wiederum kann eine Erhöhung der Bandbreite und einen höheren Faktor K_v der gesteuerten Vorschubachsen bewirken, wenn die betrachtete mechanische Eigenfrequenz für die Bandbreitenbegrenzung verantwortlich ist⁷⁴. Dies kann zu einer Erhöhung der Produktivität und damit zu einer Reduzierung der Grundlast pro Werkstück führen.

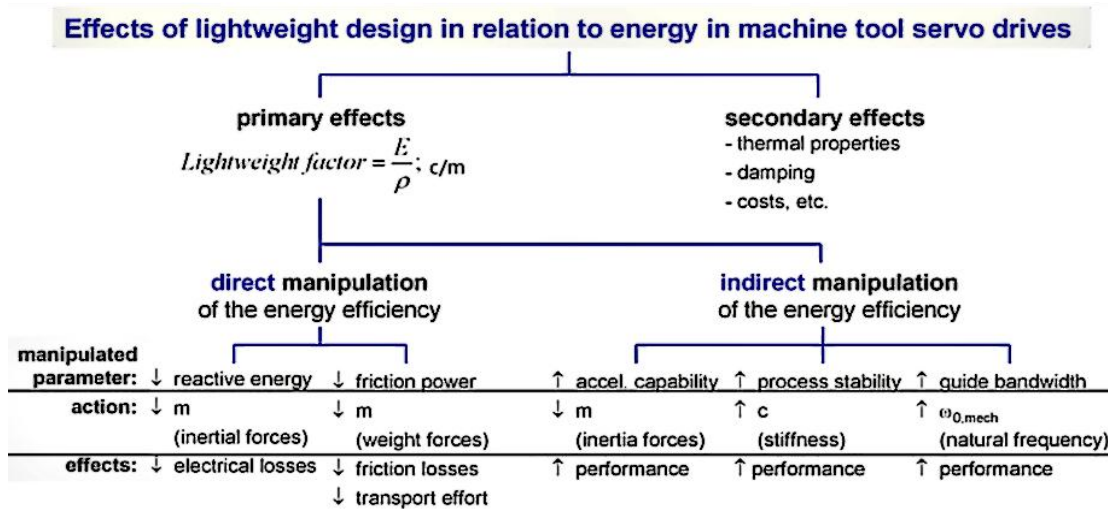


Abbildung 18: Zusammenfassung der Auswirkungen von Leichtbaumaßnahmen auf die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen⁷⁵

Die höhere Steifigkeit mit konstanter Masse der Maschine erhöht die Stabilität des Prozesses und bewirkt eine Verkürzung der Primärbearbeitungszeit. Dies reduziert den Grundlastverlust des Werkstücks und erhöht damit indirekt die Energieeffizienz.

In Abbildung 18 sind die direkten und indirekten Auswirkungen der Leichtbaukonstruktion der Werkzeugmaschine auf die Energieeffizienz zusammengefasst. Dies steht im Einklang mit der vorangegangenen Diskussion. Die Verringerung der Masse führt zu einer Verringerung der Blind- und Reibungsenergie und damit zu einer Verringerung der elektrischen Energieverluste und der Reibungsverluste sowie zu einer Steigerung der Energieeffizienz. Gleichzeitig wird durch die Verringerung der Masse das Beschleunigungspotenzial des Antriebs erhöht, was die Performance und indirekt auch die Energieeffizienz verbessert. Weitere Faktoren, die sich indirekt auf die Energieeffizienz

⁷⁴ Vgl. Kroll et al., 2011, S. 149.

⁷⁵ Quelle: Kroll et al., 2011, S. 149.

auswirken können, sind die Prozessstabilität und die Bandbreite, die durch Erhöhung der Steifigkeit und der Eigenfrequenz des Systems verbessert werden können, um eine höhere Leistung zu erzielen.

Die Relevanz von Leichtbaumaßnahmen für verschiedene Werkzeugmaschinentypen ist stark abhängig von Aspekten wie dem Einsatzgebiet und der Größe der Maschine. Besondere Aufmerksamkeit verdienen z.B. Schleifmaschinen, die sich durch ein stationäres Bewegungsverhalten mit geringen Vorschubgeschwindigkeiten auszeichnen und in der Regel keine hochdynamischen Handlingseinheiten besitzen. Die Antriebsleistung wird fast ausschließlich für die Prozessdurchführung und nicht für die Beschleunigung von Vorschubachsen benötigt. Daher sind solche Maschinen für Leichtbauteile kaum vorteilhaft. Auch Drehmaschinen, Dreh- und Fräsbearbeitungszentren und konventionelle Fräsmaschinen bieten nur einen begrenzten Nutzen für Leichtbauteile, da sie für typische Bearbeitungen nur durchschnittliche axiale Beschleunigungen aufweisen. Darüber hinaus werden diese Maschinen häufig in der Hochgenauigkeits- oder Schwerzerspannung eingesetzt, die eine sehr steife Struktur erfordern. HPC (High Performance Cutting) 5-Achs-Fräszentren führen zum Teil komplexe, sich überlagernde Bahnbewegungen und häufige Beschleunigungs- und Abbremsbewegungen aus. Leichtbaukomponenten wirken sich daher positiv auf das dynamische Verhalten und damit auf die Produktivität aus. Darüber hinaus können elektrische Verluste durch eine geringere Massenträgheit minimiert werden. Ähnliche Vorteile ergeben sich beim Einsatz von Leichtbaukomponenten in HSC (High Speed Cutting)-Fräszentren. Solche Maschinen führen komplexe Bahnbewegungen aus und mehrere Achsen sind gleichzeitig in Bewegung. Dies erfordert eine hohe Dynamik und Führungsbandbreite, die durch innovative Leichtbaukonzepte erreicht werden kann⁷⁶.

Anhand von Sensitivitätsanalysen diskutieren Kroll et al. die Potenziale der direkten Reduktion von elektrischen Energieverlusten in Vorschubantrieben. Es zeigt sich, dass eine Lastreduzierung von 30 % direkt zu einer Verringerung der elektrischen Verlustleistung eines Servoantriebs in ähnlicher Höhe oder sogar zu höheren Reduzierungen von bis zu 50 % führen kann. Weiterhin wird das Potential der indirekten Reduzierung der Energieverluste durch die Nebenaggregate diskutiert. Studien über kompakte 5-Achsen-Fräsmaschinen haben gezeigt, dass die Produktivität und damit die Energieeffizienz durch eine Erhöhung des Beschleunigungsvermögens um ca. 5 % und

76 Vgl. Kroll et al., 2011, S. 150

eine Verringerung der Masse der beweglichen Teile um 30 % gesteigert werden kann⁷⁷.

Die obige Analyse zeigt, dass eine Verringerung der Masse oder eine Erhöhung der Steifigkeit den Leichtbaufaktor der Maschine verbessert und die Energieeffizienz optimiert. Drei Maßnahmen sind derzeit die am weitesten verbreiteten für den Leichtbau von Werkzeugmaschinen. Diese Maßnahmen lauten⁷⁸:

- Optimierung der Struktur der Maschine je nach Belastung
- Anwendung neuer Werkstoffe, um die Masse oder Steifigkeitsbeschränkungen klassischer Werkstoffe zu lösen
- Systemleichtbau mit neuen Strukturkonzepten

Im Folgenden wird die praktische Anwendung dieser drei Methoden auf Werkzeugmaschinen beschrieben.

4.3.1. Bionisches Design für Maschinenständer

Basierend auf den Konstruktionsprinzipien von biologischen Skeletten und Sandwichstämmen entwerfen Zhao et al. eine Werkzeugmaschinensäule mit Versteifungsrippen im Inneren mit der Methode der Strukturbionik⁷⁹.

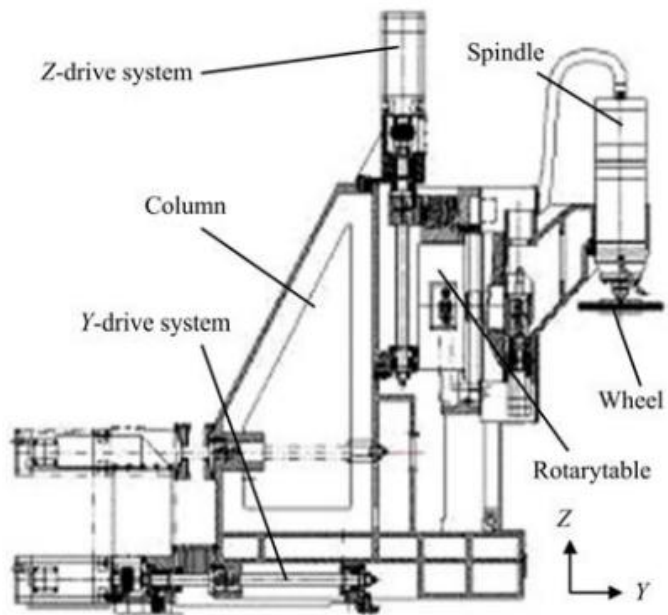
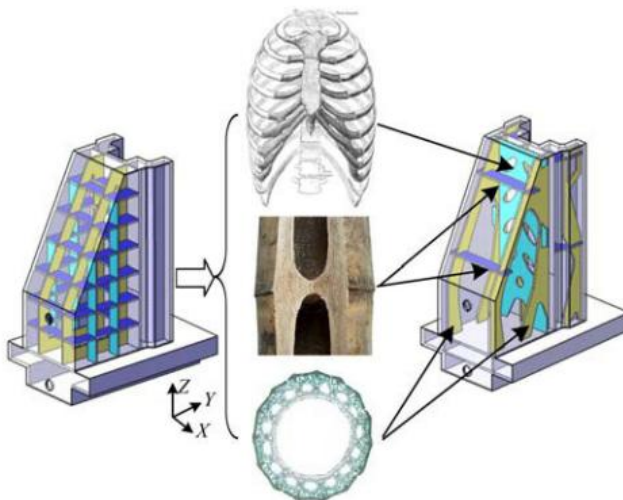
Der Ständer (column) der 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine in Abbildung 19 kann sich in der y-Achsenrichtung bewegen und die Bewegung des Rundtischs, Spindelhalter, Motorspindel und Schleifscheibe in der z-Achsenrichtung unterstützen. Um eine Leichtbauweise für Ständer zu erreichen, d. h. eine höhere Steifigkeit und eine geringere Masse, verglichen Zhao et al. einige Struktur einiger Lebewesen, wie z. B. Knochen und Pflanzenstängel. Die endgültigen Entwurfsrichtlinien für Ständer lauten: Belastungsdefinierte Strukturen und funktionsabhängige Verteilung⁸⁰. Biologische Strukturen bestehen aus Fasern, die genau in Richtung der Dehnungslinien verlegt sind, wie z. B. Oberschenkelknochen. Das Material ist anisotrop, um die Effizienz der Lastübertragung zu verbessern, was für den Verformungsschutz bei mechanischen Konstruktionen nützlich ist. Kreaturen können hohe mechanische Eigenschaften bei geringem Gewicht und hoher Steifigkeit erzielen. Kreaturen können das Gewicht in vielen Formen von der Mikro- bis zur Makroebene (porös, hohl oder Sandwich) reduzieren.

77 Vgl. Kroll et al., 2011, S. 151-155.

78 Vgl. Kroll et al., 2011, S. 149-150.

79 Vgl. Zhao et al., 2008, S. 46.

80 Vgl. Zhao et al., 2008, S. 48.

Abbildung 19: Maschinenständer⁸¹Abbildung 20: Vom konventionellen zum bionischen Modell⁸²

Ausgehend von den oben genannten strukturellen Merkmalen und Konfigurationsprinzipien wird die in Abbildung 20 rechts dargestellte Ständer entworfen.

81 Quelle: Zhao et al., 2008, S. 47.

82 Quelle: Zhao et al., 2008, S. 49.

Die konventionelle Auslegung von Versteifungsrippen im Inneren von Maschinensäulen basiert immer auf der Erfahrung der Konstrukteure und der Zweckmäßigkeit des Gießens. Im Allgemeinen ist die Verteilung parallel, orthogonal oder diagonal⁸³. Der linke Teil von Abbildung 20 zeigt die konventionellen Kreuz Versteifungsrippen

Cyanfarbene Versteifung ist von Knochen und Skeletten inspiriert. Je mehr Material in der Belastungsrichtung, desto höher die Tragfähigkeit und der Widerstand gegen Verformung in Z-Richtung. Die blassgelbe Sandwich-Struktur ist vom Querschnitt des Pflanzenstamms abgeleitet. Die beiden horizontalen blauen Verstärkungsrippen sind der Struktur der Knoten an den Stämmen von Pflanzen wie Bambus nachempfunden. Alle Rippen sind mit vielen symmetrischen Löchern zur Gewichtsreduzierung und für leichtes Gießen⁸⁴.

Um die Leistungsfähigkeit zu überprüfen, wurde dieser bionische Ständer modelliert und Finite-Elemente-Methode wurden durchgeführt. Das bionische Modell erreichte eine höhere spezifische Steifigkeit, was auf eine effizientere Materialverteilung als bei den konventionellen Modellen hindeutet. Die Eigenfrequenzen niedrigerer Ordnung werden erhöht. Die Ergebnisse zeigen eine Verringerung der Masse und der Durchbiegung um 6,13 % bzw. 45,9 % im Vergleich zu dem konventionellen Ständer. Der Leichtbau ist deutlich nachgewiesen. Leichtbaupotenziale zur Strukturoptimierung liegen bei durchschnittlich 20 %⁸⁵.

83 Vgl. Zhao et al., 2008, S. 47-48.

84 Vgl. Zhao et al., 2008, S. 49.

85 Vgl. Zhao et al., 2008, S.51.

4.3.2. Leichte Materialien in Werkzeugmaschinen

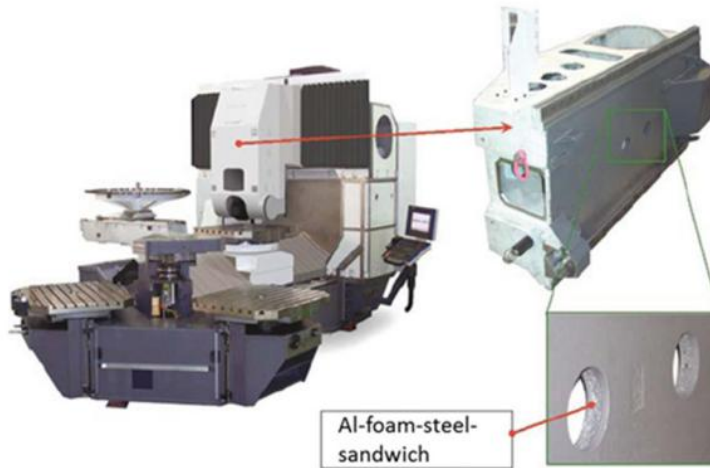


Abbildung 21: Universeller Schlitten mit Metallschaumkonstruktion⁸⁶

Aluminiumschaum wird seit zwanzig Jahren in Werkzeugmaschinen verwendet, die durch Pulvermetallurgie hergestellt werden können, wobei geschmolzenes Aluminium als Ausgangsmaterial verwendet und viskositätserhöhende Additive und anschließend Schaumbildner hinzugefügt werden⁸⁷. Die Vorteile von Aluminiumschäumen in Werkzeugmaschinen sind die geringe Masse und die hohe Energieaufnahmefähigkeit. Die Zerlegung von massiven Stahlkonstruktionen in großflächige Sandwichkonstruktionen wie Stahl-Aluminiumschaum-Stahl führt einerseits zu guten statischen Eigenschaften wegen der höheren geometrischen Trägheitsmomente, da diese Sandwiches eine 30- bis 40-fache Biegefestigkeit aufweisen. Andererseits kann Aluminiumschaum durch seine Wabenstruktur und die geringe Verformung der dünnen Innenwände die durch Vibrationen erzeugte Energie reduzieren⁸⁸. Die dynamische Steifigkeit und Dämpfung des Materials wird verbessert. Eine Anwendung von Aluminiumschaum ist der Schlitten einer Hochleistungsfräsmaschine in der Abbildung 21, der im Vergleich zu reinem Stahl eine Gewichtsreduktion von 28,0 % aufweist. Ein alternativer Ansatz zu Wabenstrukturen ist die Verwendung von Hohlkugel-Verbundwerkstoffen⁸⁹. (hollow sphere composites)

⁸⁶ Quelle: Möhring et al., 2015, S. 10.

⁸⁷ Vgl. Möhring et al., 2015, S. 10.

⁸⁸ Vgl. Neugebauer/Hipke, 2006, S. 858–859.

⁸⁹ Vgl. Möhring et al., 2015, S. 11.

Die Hohlkugel-Verbundwerkstoffe bestehen aus Hohlkugeln bis zu 80 % des Volumens und einem reaktiven Harzsystem als Bindemittel. Die Hohlkugelkörper können aus Keramik, Silikat, Kunststoff oder Metall hergestellt sein. Infolge hervorragender Vibrations- und Dämpfungseigenschaften und geringes Wärmeverzug wird Hohlkugel-Verbundwerkstoffen in einer Vielzahl von technischen Anwendungen eingesetzt⁹⁰. Eine Anwendung von Hohlkugel-Verbundwerkstoffen im Maschinenbau ist Fräsmaschinentisch. Der Tisch wird mit verstärkenden Stahlelementen und Kohlefaserlaminaten konstruiert, um den typischen Zugkräften standzuhalten. Die erzielte Gewichtsreduzierung liegt zwischen 30 und 80 %, wodurch die dynamischen Eigenschaften verbessert werden⁹¹.

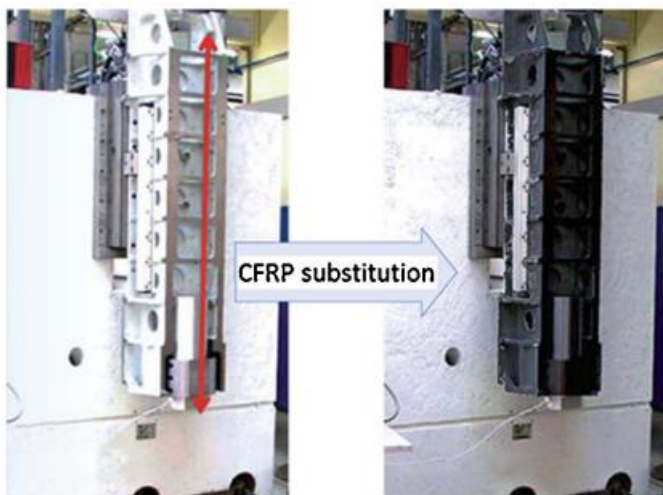


Abbildung 22: Ersatz einer konventionellen durch eine CFK-Struktur⁹²

Faserverstärkte und Verbundwerkstoffe bieten ein sehr gutes Verhältnis von mechanischer Festigkeit zu Dichte. Faserverstärkte Materialien bestehen aus der Faser (kurz oder lang) oder Partikelverstärkung und einem bindenden Matrixsystem. Für die Herstellung von faserverstärkten Konstruktionswerkstoffen stehen verschiedene Herstellungsverfahren zur Verfügung, wie z. B. das Drapieren von vorimprägniertem Material (Prepreg) zur Herstellung von Laminaten, das Einbringen von trockenen Fasern oder Geweben und das Spritzgießen oder Resin Transfer Molding⁹³. Am häufigsten werden glasfaserverstärkter

90 Vgl. Baumeister et al., 2004, S. 1839–1840.

91 Vgl. Baumeister et al., 2004, S. 1845.

92 Quelle: Möhring et al., 2015, S. 12.

93 Vgl. Möhring et al., 2015, S. 12.

Kunststoff (GFK) mit einem Faserdurchmesser von 3-20 mm und kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) mit einem Faserdurchmesser von 4-10 mm verwendet. CFK ist ein vielversprechender Werkstoff für die Spindel, da er eine geringe Wärmeausdehnung und eine hohe spezifische Steifigkeit aufweist. CFK und GFK werden heute in großem Umfang in Werkzeugmaschinen eingesetzt⁹⁴.

Die vertikale CFK-Achse in Abbildung 22 erzielt eine Gewichtsreduzierung von 60% und eine Energieeinsparung von 70 % im Vergleich zu konventionellen Konstruktion.

Wie in Kapitel 4.2.1 erwähnt, ist bei Motorspindeln ein Kühlungssystem erforderlich, um die Spindel und die Lager zu kühlen, da andernfalls die Bearbeitungsgenauigkeit beeinträchtigt werden kann und es sogar zum Ausfall von Lager und Spindel kommen kann. Zur Bekämpfung der Wärmeverformung entwickeln Kono et al. eine Werkzeugmaschinen-spindel, die einer Hybridstruktur aus CFK und Stahl ist. Die Studie zeigte, dass die vorgeschlagene Hybridstruktur fast die gleiche statische Steifigkeit und eine geringere Wärmeausdehnung im Vergleich zu einer konventionellen Stahlwelle erreichen kann. Die statische Biege- und Torsionssteifigkeit der entwickelten Welle betragen fast 80 % der Stahlwelle. Die Wärmeausdehnung reduziert auf 39%⁹⁵. Dadurch wird der Energiebedarf zur Kühlung der Spindel indirekt reduziert und die Energieeffizienz erhöht.

Kroll et al. stellen zwei Optionen für den Leichtbau von Ständer für Fünffachsige Fräsmaschinen vor. Die zu optimierende Struktur ist in Abbildung 23 dargestellt. Der Maschinenständer (x stand), der die tragende Struktur der y-Achse bildet und der sich in x-Richtung bewegt. Im Spindelbetrieb wird der Ständer gemäß einer strukturmechanischen Analyse tatsächlich durch Biege- und Torsionskräfte aus xyz in mehreren Richtungen belastet. Die erste Leichtbaukonstruktion basierte auf der Topologieoptimierung des ursprünglichen Gussteils⁹⁶. Die optimierte Struktur ist in Abbildung 24 dargestellt.

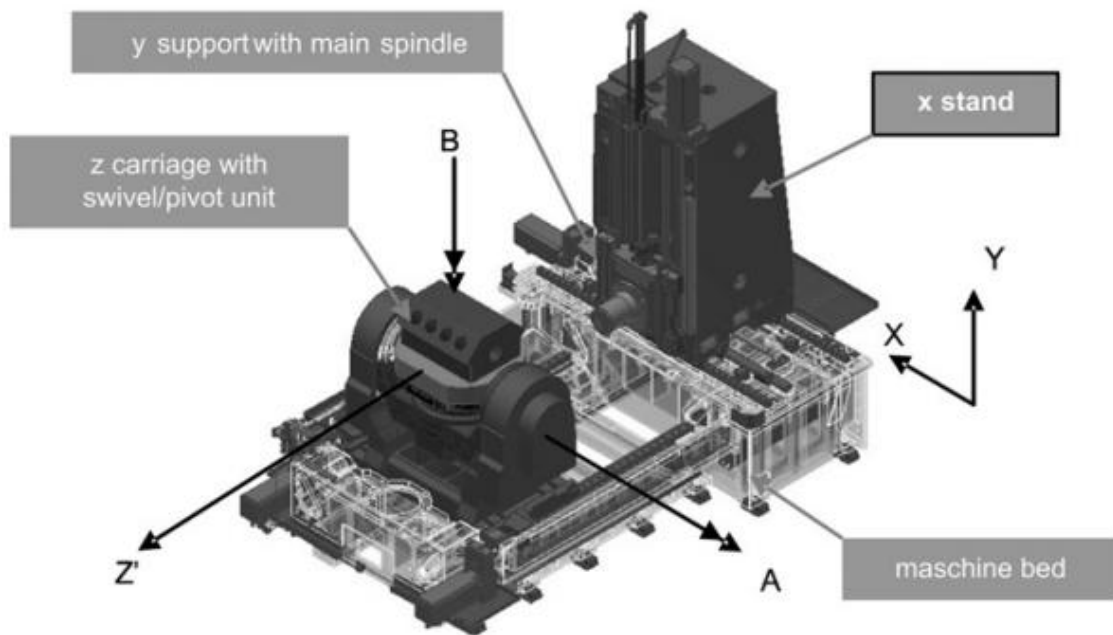
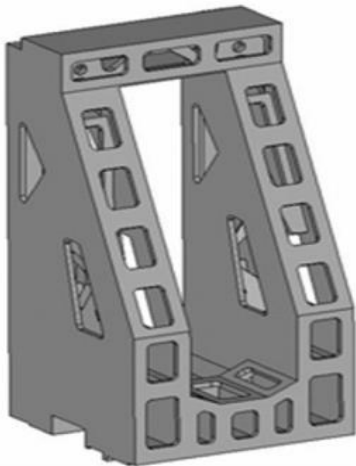
Nach Kroll et al. wird die Masse des Ständers um 20 % reduziert und die Eigenfrequenz um 8 % erhöht.

Eine andere Methode ist die Verwendung von CFK anstelle des Stahls des ursprünglichen Gussteils. Aufgrund der anisotropen Beschaffenheit von Kohlefaserverbundwerkstoffen können der Ständer aus diesem Material nur Belastungen in einachsiger Richtung standhalten.

94 Vgl. Möhring et al., 2015, S. 11.

95 Vgl. Kono et al., 2019, S. 389–392.

96 Vgl. Kroll et al., 2011, S. 157.

Abbildung 23: 5-Achsen-Fräszentrum⁹⁷Abbildung 24: Topologisch optimierte Ständer⁹⁸

Der Elastizitätsmodul des Fasermaterials ist geringer als der von Stahl, und die anisotrope

⁹⁷ Quelle: Kroll et al., 2011, S. 157.

⁹⁸ Quelle: Kroll et al., 2011, S. 157.

Beschaffenheit von Kohlefaserverbundwerkstoffen führt dazu, dass die aus diesem Material hergestellten Ständer bei einachsiger Beanspruchung gut funktionieren, bei mehrachsiger Beanspruchung ist die Kohlefaserverstärkung jedoch im Vergleich zu isotropem Stahl benachteiligt⁹⁹. Um diesen Nachteil auszugleichen, muss die Masse des Fasermaterials erhöht werden, was ein größeres Volumen des Ständers bedeutet, was auf der strukturellen Ebene der Maschine nicht akzeptiert werden kann. Daher wurde die fortschrittlichere integrale Konstruktion, die auf dem Zusammenbau von halbfertigen Laminaten basiert umgesetzt. Kroll et al. fügten dem Modell eine Innenwand mit dünnen Rippen (Abbildung 25) hinzu, um die Festigkeitsanforderungen des Ständers auf der Grundlage eines differenzierten Designs zu erfüllen.

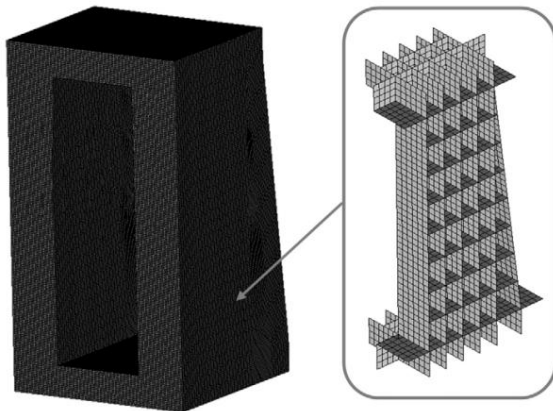


Abbildung 25: Berechnungsmodell für Differentialdesign mit verfeinerter Verrippung¹⁰⁰

Die durch die beiden oben genannten Optimierungsmethoden erhaltene Struktur wird einer Finite-Elemente-Methode unterzogen, und es wird ein Zustandsraum erstellt. Der Frequenzgang des ursprünglichen Gussteils, der topologisch optimierten Struktur und der Kohlefaserverbundstruktur ist in Abbildung 26 dargestellt. Aus Abbildung 26 ist ersichtlich, dass mit den optimierten Ständern aus Faserverbundwerkstoffen die maximale Bandbreite, d.h. der Frequenzbereich, in dem der Amplitudengang größer als -3dB ist, erreicht werden kann.

⁹⁹ Vgl. Kroll et al., 2011, S. 157.

¹⁰⁰ Quelle: Kroll et al., 2011, S. 157.

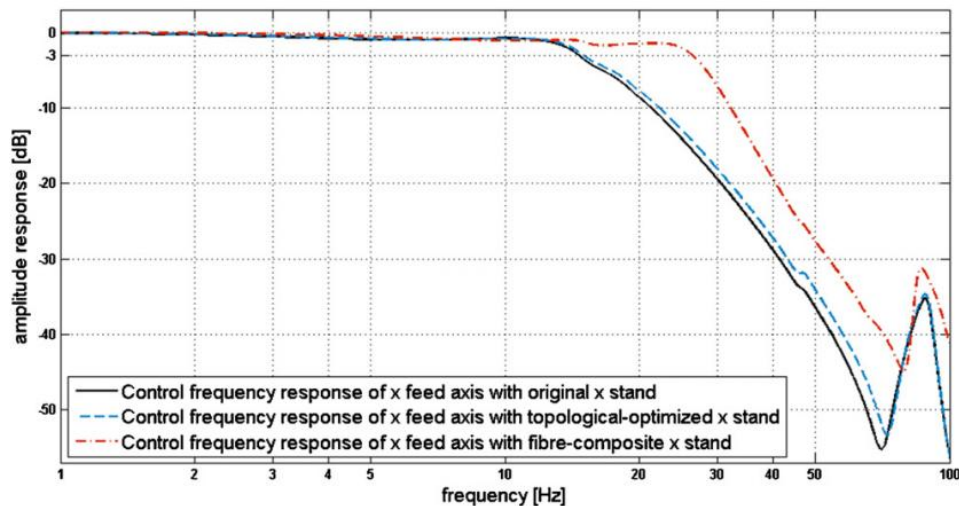


Abbildung 26: Frequenzgänge der optimierten Ständer¹⁰¹

Das bedeutet, dass der Ständer höheren Stößen und Vibrationen standhalten kann. Dies führt zu einer Gesamtleistungssteigerung der Werkzeugmaschine.

Was die Energieeinsparung betrifft, so sparen die topologieoptimierten Ständer laut Kroll et al. zwischen 7 und 21,5 % der Energie. Bei Ständer aus CFK liegen die Einsparungen zwischen 16 und 47 %.

Die Ständer reduzieren die Masse um fast 40 % und führen gleichzeitig zu einer höheren Energieeffizienz, haben aber den Nachteil hoher Konstruktionskosten. Topologieoptimierte Strukturen sind wirtschaftlicher, weil der Rohstoffeinsatz im Wesentlichen gleich oder sogar geringer ist¹⁰².

4.3.3. Mechatronik in den Leichtbau von Werkzeugmaschinen

Mechatronische Systeme sind komplexe Systeme, deren Lösungsfeld interdisziplinär ist. Sie weisen eine größere Funktionsdichte und Funktionsnähe auf als traditionelle mechanische und elektrische Systeme¹⁰³. Durch die Verbindung von Verbundkomponenten, die als Sensoren und Aktoren fungieren, mit entsprechend angepassten elektronischen Steuerungen können die Strukturdynamischen Eigenschaften der mechanischen Grundstruktur direkt beeinflusst werden. Die in Kapitel 4.2.2 beschriebenen elektromagnetischen Lager sind eine Anwendung der Mechatronik in

¹⁰¹ Quelle: Kroll et al., 2011, S. 158.

¹⁰² Vgl. Kroll et al., 2011, S. 159

¹⁰³ Vgl. Neugebauer et al., 2007, S. 659.

Antriebssystemen von Werkzeugmaschinen. Die hohen Drehzahlen und die damit verbundenen hohen Leistungsanforderungen stellen extrem hohe Anforderungen an die statische, dynamische und thermische Steifigkeit und die Lebensdauer von Lagern und Spindeln. Aktive Magnetlager mit entsprechenden Regelalgorithmen können basierend auf der Spaltsteuerung zur aktiven Dämpfung eingesetzt werden. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit¹⁰⁴, die Technologie zu erweitern. In gewissem Umfang ist es auch möglich, z. B. die oszillierende Bewegung des Spindelrotors zum Läppen von Bohrungen für die nicht zirkuläre Bearbeitung von Bohrungen.

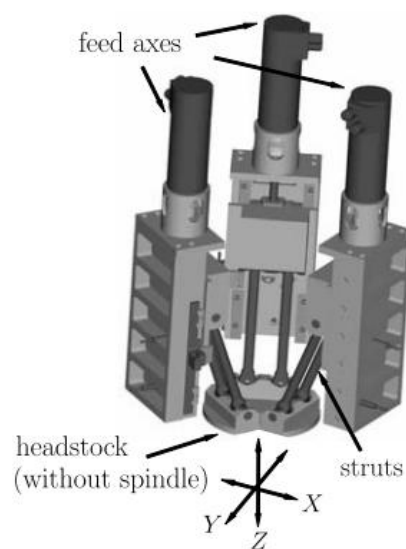


Abbildung 27: Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik¹⁰⁵

In Werkzeugmaschinen führen statische, quasi-statische, thermische und dynamische Einflüsse zu Auslenkungen der Teile und vor allem zu einer des Werkzeugmittelpunktes. Gestellteile sind häufig die Ursache für die geringsten und dominantesten Eigenschwingungen. Gestellteile schränken in vielen Fällen die erreichbare Vorschubbandbreite und damit die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen erheblich ein. Zudem haben sie aufgrund ihrer Trägheit einen entscheidenden Einfluss auf die erforderliche Leistung der Vorschubantriebe. Vorrangiges Konstruktionsziel für Gestellbauteile ist es daher, eine hohe Steifigkeit und Dämpfung bei geringer Masse zu

¹⁰⁴ Vgl. Neugebauer et al., 2007, S. 668.

¹⁰⁵ Quelle: Rudolf et al., 2005, S. 2.

erreichen¹⁰⁶.

Im Allgemeinen können geometrische Verformungen durch Positionsanpassungen an der NC-Achse kompensiert werden. Verformungen, wie zum Beispiel durch Torsionsbelastung, können jedoch nicht über die NC-Achse eingestellt werden. In diesem Fall sind Strukturoptimierungen (z.B. Topologieoptimierung) oder Materialänderungen (z.B. CFK) erforderlich, um der Struktur eine bessere Leistung zu ermöglichen. Darüber hinaus bieten integrierte mechatronische Systeme eine gute Lösung.

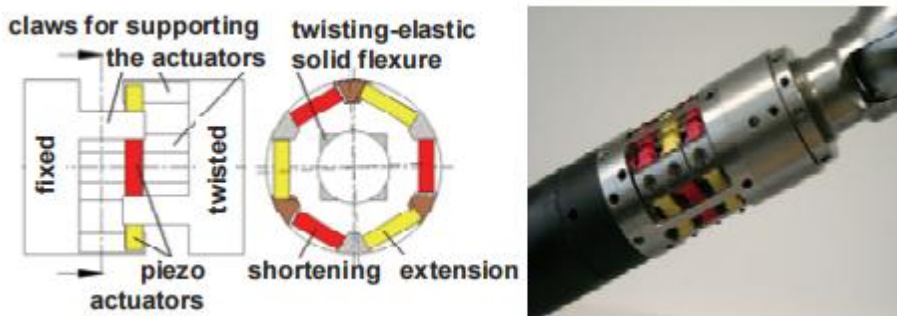


Abbildung 28: Strebe zur Kompensation von Torsionsschwingungen¹⁰⁷

Ein einfaches Beispiel für mechatronische Anwendungen im Gestell ist die Strebe mit dem angebrachten Piezoaktor. Wie in Abbildung 27 dargestellte Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik, wird die Strebe (struts) durch die entsprechenden Torsionsspannungen belastet. Eine strukturell integrierte Einheit mit Piezoaktoren kompensiert die statische Verformung von Strebe, die einer Torsionsbelastung ausgesetzt sind (Abbildung 28). Die Strebe ist in zwei Teile unterteilt, den oberen und den unteren. Der untere Teil ist fixiert. Der obere Teil belastet den Piezoaktor mit einer Torsionsspannung. Dehnungsmessstreifen werden als Sensoren zur Messung von Spannungen in Streben verwendet. Mithilfe des inversen piezoelektrischen Effekts wandelt der piezoelektrische Aktor elektrische Energie in mechanische Energie um, um einer Verformung zu widerstehen. Dies ermöglicht die Kompensation von statischen Verformungen und Vibrationen bis zu 300 Hz. In Experimenten konnte die Torsionssteifigkeit der Strebe des integrierten Piezoaktors im Vergleich zu herkömmlichen Stahlteilen um das Siebenfache erhöht werden. In Bezug auf die Masse ist diese Strebe mechanisch raffinierter, da sie dank adaptiver Elemente zum

¹⁰⁶ Vgl. Neugebauer et al., 2007, S. 667.

¹⁰⁷ Quelle: Neugebauer et al., 2007, S. 668.

Torsionsausgleich (z. B. eingebettete piezoelektrische Keramik) nur auf Zug und Druck belastet wird. 90 % geringere Masse im Vergleich zu Stahlteilen¹⁰⁸.

Werkzeuge und Werkzeughalter haben einen entscheidenden Einfluss auf die erreichbare Bearbeitungsgenauigkeit und Zerspanungsleistung. Werkzeuge haben aufgrund ihrer schlanken Form eine sehr geringe statische Biegefestigkeit und Torsionssteifigkeit. Die geringe Steifigkeit der Werkzeuge wirkt sich auch einschränkend auf die Prozessstabilität und damit auf die in einer bestimmten Zeit erreichbaren Zerspanvolumen aus. Dies bedeutet eine niedrige Bearbeitungsgeschwindigkeit und Energieeffizienz.

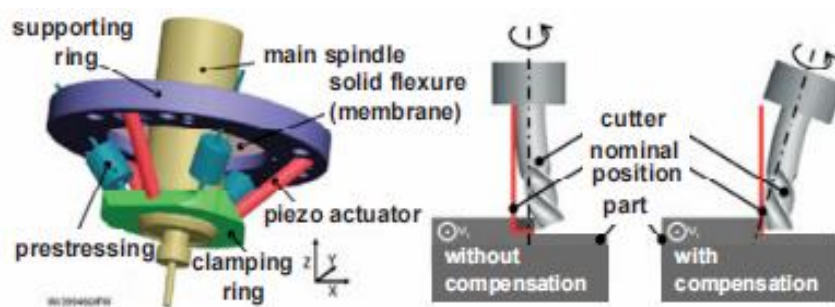


Abbildung 29: Kompensation der Auslenkung durch eine mechatronische Einheit¹⁰⁹

Nach dem gleichen Prinzip leisten auch Piezoaktoren einen hervorragenden Beitrag zur Korrektur von Werkzeugpositionen. In Abbildung 29 ist der Piezoaktor in der Lage, Abweichungen im Mikrometerbereich des Werkzeugkopfes durch Kippbewegungen um die x- und y-Achse und Bewegungen in der z-Achse auszugleichen¹¹⁰, wobei die Ausgleichskraft des Piezoaktors über den Klemmring (clamping ring) auf den Werkzeugkopf übertragen wird.

108 Vgl. Kroll et al., 2011, S. 150.

109 Quelle: Neugebauer et al., 2007, S. 669.

110 Vgl. Neugebauer et al., 2007, S. 669.

5. Zusammenfassung

Der Kern der Arbeit ist eine Literaturrecherche, um Wege zur Verbesserung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen zu finden und den Energieverbrauch so weit wie möglich zu reduzieren.

Zunächst wird der typische Aufbau der Maschine beschrieben, der das Hauptaggregat und das Nebenaggregat umfasst. Die Definition der Energieeffizienz einer Werkzeugmaschine wird erläutert. Die Gesamtleistung der Maschine im Betrieb ist in vier Module aufgeteilt, nämlich: Feste Leistung, Betriebsleistung, Leistung der Werkzeugspitze sowie unproduktive Leistung.

Anschließend werden Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen beschrieben. Das Konzept des spezifischen Energieverbrauch (SEC) wird zur Vereinheitlichung des Energieverbrauchsmodells in Bezug auf die Schnittparameter eingeführt. Dabei wird ein empirischer Ansatz verwendet, um Energieverbrauchsmodelle für acht Werkzeugmaschinen zu erstellen, in denen der SEC für die Trocken- und Nassbearbeitung von drei Fräsmaschinen ausgedrückt wird. Andererseits wurden Experimente mithilfe der Response Surface Analysis entworfen, um Gleichungen für die abhängige Variable, den Energieverbrauch, und die vier Variablen, Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, Schnitttiefe und Werkzeugspitzenradius, aufzustellen. Die Auswirkungen der vier Parameter auf den Energieverbrauch wurden analysiert. Die optimale Lösung für die vier Schnittparameter beim Drehen von Aluminium-SiC-Legierungen wird anhand der Desirability function abgeleitet, die zu einem minimalen Energieverbrauch führt.

Es folgt eine Diskussion über die Verbesserung der Energieeffizienz durch die Optimierung der Komponenten innerhalb der Maschine. Erstens: das Spindelsystem, die Lager und die Führungen der Haupteinheiten. Eine Alternative zum konventionellen Spindelsystem mit Getrieben ist die Motorspindel. Motorspindeln sind kompakt, treiben effizient an und können extrem hohe Spindeldrehzahlen erreichen, was die Bearbeitungsgenauigkeit und Energieeffizienz verbessert. Es ist wichtig zu beachten, dass die während des Prozesses entstehende Wärme gekühlt werden muss. Ein wichtiger Punkt bei Lagern und Führungen ist die Reduzierung von Reibungsverlusten. Elektromagnetische Lager haben ein erhebliches Potenzial für die Zukunft. Profilschienenführungen sind heute in der Werkzeugmaschinenindustrie weit verbreitet, da die Rollreibungsverluste wesentlich

geringer sind als bei Gleitschienenführungen. Kugelgewindetriebe können auch als Linearantriebe mit einem maximalen Wirkungsgrad von bis zu 95 % eingesetzt werden.

Da die Nebenaggregate den größten Teil des Energieverbrauchs der Werkzeugmaschine ausmachen, wird die Optimierung der Kühlsysteme und der Kühlschmierstoffsysteme eingehend erörtert. Ein Heißgas-Bypass wird häufig in Kühlsystemen eingesetzt, und es wird ein Heißgas-Bypass-System auf der Grundlage einer Zweipunktregelung vorgestellt, das im Vergleich zu einer konventionellen PID-Regelung bis zu 25 % des Energieverbrauchs einspart. In Bezug auf Kühlschmierstoffsysteme wird das Konzept der Versorgungseffizienz eingeführt. Der Energieverbrauch hängt von der Strategie der Kühlschmierstoffzufuhr und den Düsen ab. Es gibt drei Strategien: überflutende Schmierung, Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung. Die für jede der drei Zuführungsmethoden erforderliche Menge an Kühlschmierstoff wird schrittweise reduziert, was zu einem immer geringeren Energieverbrauch, aber auch zu einer immer geringeren Bearbeitungsgenauigkeit und Stabilität führt. Die Geometrie und die Position der Düsen tragen zu den Unterschieden im Energieverbrauch bei. Der Unterschied im Energieverbrauch zwischen Punkt- und Schlitzdüsen kann bis zu 23,5 % betragen, wenn die gleiche Menge an Schneidflüssigkeit durch die Kontaktzone fließt.

Schließlich werden die Auswirkungen des Leichtbaus auf den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen erörtert. Der Grad der Leichtigkeit einer Werkzeugmaschine kann durch den Leichtbaufaktor LF, das Verhältnis von Steifigkeit zu Masse, ausgedrückt werden. Es wird untersucht, wie sich Änderungen der Masse und Steifigkeit auf die Energieeffizienz der Werkzeugmaschine auswirken. Diese Auswirkungen können direkt oder indirekt sein. Es werden drei gängige Ansätze für den Leichtbau genannt: struktureller Leichtbau, die Verwendung von Leichtbaumaterialien und die Verwendung von Leichtbausystemen wie mechatronischen Systemen. Das bionische Design der Maschinensäule reduziert die Anzahl der Verstärkungsrippen und damit die Masse erheblich. Die Verwendung von Wabenstrukturen wie Aluminiumschaum und Hohlkugelverbundwerkstoffen reduziert nicht nur die Masse, sondern erhöht auch die mechanischen Eigenschaften wie die Steifigkeit des Materials. Auch Kohle- und Glasfaserverstärkungen werden in Leichtbauweise eingesetzt. Eine Hybridstruktur-Maschinenspindel aus Kohlefaserverstärkung und Stahl kann die Wärmeausdehnung um bis zu 39 % reduzieren, was zu einer erheblichen Verringerung der zur Kühlung der Spindel benötigten Energie führt. Sowohl die Topologie-Optimierung der ursprünglichen Struktur als auch die Verwendung von CFK können zur Erzielung eines leichten Designs

eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu bietet CFK eine höhere Leistung, aber auch höhere Kosten. Mechatronische Systeme wie die Piezoaktoren zum Torsionsausgleich können die Torsionssteifigkeit um das bis zu 7-fache erhöhen und das Gewicht um bis zu 90% reduzieren.

Literaturverzeichnis

- Abele, E./Y. Altintas/C. Brecher: Machine tool spindle units, in: CIRP Annals, Bd. 59, Nr. 2, 2010, doi:10.1016/j.cirp.2010.05.002, S. 781–802.
- Baumeister, E./S. Klaeger/A. Kaldos: Lightweight, hollow-sphere-composite (HSC) materials for mechanical engineering applications, in: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 155–156, 2004, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.385, S. 1839–1846.
- Bhushan, Rajesh Kumar: Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites, in: Journal of Cleaner Production, Bd. 39, 2013, doi:10.1016/j.jclepro.2012.08.008, S. 242–254.
- Brecher, Christian/Manfred Weck: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2: Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung (VDI-Buch), 9. Aufl., 2017.
- Denkena, Berend/Eberhard Abele/Christian Brecher/Marc-André Dittrich/Sami Kara/Masahiko Mori: Energy efficient machine tools, in: CIRP Annals, Bd. 69, Nr. 2, 2020a, doi:10.1016/j.cirp.2020.05.008, S. 646–667.
- Denkena, Berend/Benjamin Bergmann/Heinrich Klemme: Cooling of motor spindles—a review, in: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 110, Nr. 11–12, 2020b, doi:10.1007/s00170-020-06069-0, S. 3273–3294.
- Kara, S./W. Li: Unit process energy consumption models for material removal processes, in: CIRP Annals, Bd. 60, Nr. 1, 2011, doi:10.1016/j.cirp.2011.03.018, S. 37–40.
- Klocke, Fritz: Kühlschmierstoffe, in: Fertigungsverfahren 2, 2017, doi:10.1007/978-3-662-53310-9_5, S. 119–144.
- Kono, Daisuke/Soichiro Mizuno/Toshiyuki Muraki/Masamitsu Nakaminami: A machine tool motorized spindle with hybrid structure of steel and carbon fiber composite, in: CIRP Annals, Bd. 68, Nr. 1, 2019, doi:10.1016/j.cirp.2019.04.022, S. 389–392.
- Kramer, M. J./R. W. McCallum/I. A. Anderson/S. Constantinides: Prospects for Non-Rare Earth Permanent Magnets for Traction Motors and Generators, in: JOM, Bd. 64, Nr. 7, 2012, doi:10.1007/s11837-012-0351-z, S. 752–763.
- Kroll, L./P. Blau/M. Wabner/U. Frieß/J. Eulitz/M. Klärner: Lightweight components for energy-efficient machine tools, in: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Bd. 4, Nr. 2, 2011, doi:10.1016/j.cirpj.2011.04.002, S. 148–160.
- Li, Wen/André Zein/Sami Kara/Christoph Herrmann: An Investigation into Fixed Energy

- Consumption of Machine Tools, in: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, 2011, doi:10.1007/978-3-642-19692-8_47, S. 268–273.
- Li, W/S Kara: An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Bd. 225, Nr. 9, 2011, doi:10.1177/2041297511398541, S. 1636–1646.
- Madanchi, Nadine/Marius Winter/Sebastian Thiede/Christoph Herrmann: Energy Efficient Cutting Fluid Supply: The Impact of Nozzle Design, in: *Procedia CIRP*, Bd. 61, 2017, doi:10.1016/j.procir.2016.11.192, S. 564–569.
- Möhring, Hans-Christian/Christian Brecher/Eberhard Abele/Jürgen Fleischer/Friedrich Bleicher: Materials in machine tool structures, in: *CIRP Annals*, Bd. 64, Nr. 2, 2015, doi:10.1016/j.cirp.2015.05.005, S. 725–748.
- Moradnazhad, Mariyeh/Hakki Ozgur Unver: Energy efficiency of machining operations: A review, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Bd. 231, Nr. 11, 2016, doi:10.1177/0954405415619345, S. 1871–1889.
- Mori, Kotaro/Benjamin Bergmann/Daisuke Kono/Berend Denkena/Atsushi Matsubara: Energy efficiency improvement of machine tool spindle cooling system with on–off control, in: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 25, 2019, doi:10.1016/j.cirpj.2019.04.003, S. 14–21.
- Neugebauer, R./B. Denkena/K. Wegener: *Mechatronic Systems for Machine Tools*, in: *CIRP Annals*, Bd. 56, Nr. 2, 2007, doi:10.1016/j.cirp.2007.10.007, S. 657–686.
- Neugebauer, Reimund: *Werkzeugmaschinen: Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen (VDI-Buch)*, 2012. Aufl., Springer Vieweg, 2013.
- Neugebauer, R./T. Hipke: Machine Tools With Metal Foams, in: *Advanced Engineering Materials*, Bd. 8, Nr. 9, 2006, doi:10.1002/adem.200600095, S. 858–863.
- Rudolf, Christian/Joerg Wauer/Christian Munzinger/Jürgen Fleischer: An Approach for Compensation of Geometric Faults in Machine Tools, in: *Volume 6: 5th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control, Parts A, B, and C*, 2005, doi:10.1115/detc2005-84241, S. 1–8.
- Zhao, Ling/Wu-yi Chen/Jian-feng Ma/Yong-bin Yang: Structural Bionic Design and Experimental Verification of a Machine Tool Column, in: *Journal of Bionic Engineering*, Bd. 5, Nr. S1, 2008, doi:10.1016/s1672-6529(08)60071-2, S. 46–52.

Eidesstattliche Versicherung

Beim Einreichen einer prüfungsrelevanten wissenschaftlichen Arbeit ist üblicherweise die Abgabe einer eidesstattlichen Versicherung erforderlich, in der der Autor/ die Autorin versichert, keinerlei unzulässige Hilfe in Anspruch genommen und alle fremden Inhalte als solche kenntlich gemacht zu haben. Eine falsche eidesstattliche Versicherung führt nicht nur zur Bewertung der Arbeit mit der Note 5,0, sondern kann auch rechtlich verfolgt werden.

Die eidesstattliche Versicherung ist die letzte Seite der prüfungsrelevanten Arbeit. Sie wird mit der Arbeit gebunden und abgegeben, gehört aber nicht zu ihrem eigentlichen Inhalt, weshalb sie in keinem Verzeichnis aufgeführt wird und keine Seitennummerierung erhält.

Die eidesstattliche Versicherung ist am Schluss der Arbeit nach folgendem Muster abzugeben:

Ich versichere, dass ich diese [Projekt-, Bachelor oder Masterarbeit] selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt, nur die angegebenen Quellen benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

[Mülheim a. d. Ruhr/Bottrop], den [Datum]

21.07.2022

[Unterschrift]

Yu Chen.