
BACHELORARBEIT

Herr
Chao Qin

**Energetische Modellierung
von Werkzeugmaschinen am
Beispiel einer Drehmaschine**

Mittweida, 2017

Fakultät Ingenieurwissenschaften

BACHELORARBEIT

Energetische Modellierung von Werkzeugmaschinen am Beispiel einer Drehmaschine

Autor:
**Herr
Chao Qin**

Studiengang:
Maschinenbau

Seminargruppe:
MB14wK-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Leif Goldhahn

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Einreichung:
Mittweida, 29.09.2017

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2017

BACHELOR THESIS

Mr.
Chao Qin

**Energetic modeling of ma-
chine tools using
the example of
a turning machine**

Mittweida, 2017

faculty engineering

BACHELOR THESIS

Energetic modeling of machine tools using the example of a turning machine

author:

**Mr.
Chao Qin**

major:

mechanical manufacture

seminar group:

MB14wK-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Leif Goldhahn

second examiner:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

submit:

Mittweida, 27.09.2017

oral defense/assessment:

Mittweida, 2017

Bibliografische Beschreibung:

Qin, Chao:

Energetische Modellierung von Werkzeugmaschinen am Beispiel einer Drehmaschine. - 2017. - VII, 74.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2017

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Modellierung des energetischen Verbrauchs der Komponenten von Werkzeugmaschinen. Die Arbeit ist Bestandteil des Forschungsprojektes „Entwicklung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle sowie Qualifizierungskonzepte für die ressourceneffiziente Fertigung hochbeanspruchter Bauteile“ (MoQuaRT) und leistet einen Beitrag zur energetischen Bewertung von Werkzeugmaschinen. Zu Beginn wird eine Grundlagenbetrachtung themenbezogen u.a. zur Fertigungsverfahren, Werkzeugmaschinen und Energie im Fabrikbetrieb gegeben. Anschließend erfolgt die energieorientierte Analyse von Werkzeugmaschine. Weiterhin wird der energetische Verbrauch der Komponenten von einer Werkzeugmaschine modelliert. Abschließend wird das Modell angewendet und das Ergebnis bewertet

Inhaltverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Aufgabenstellung	4
1.3 Lösungsweg	4
2 Theoretische Grundlagen	6
2.1 Einteilung der Fertigungsverfahren	6
2.2 Einteilung der Werkzeugmaschinen	7
2.3 WZM zur Bearbeitung rotationssymmetrischer Teile	8
2.3.1 Universaldrehmaschine	9
2.3.2 Drehbearbeitungszentrum	13
2.3.3 Vergleich von Drehmaschine und Drehbearbeitungszentrum	16
2.4 Energie im Fabrikbetrieb	18
2.4.1 Allgemeine Energieformen	19
2.4.2 Energieformen zum Betrieb von Werkzeugmaschinen	20
2.4.3 Energieumwandlungen innerhalb der Werkzeugmaschine	27
2.4.4 Leistungsbedarf einer Werkzeugmaschine	28
2.4.5 Energetische Verbraucher in Werkzeugmaschinen	29
2.5 Elektrische Antriebe in Werkzeugmaschinen	30
2.5.1 Funktionale Sicht	30
2.5.2 Motortypen	31
2.5.2.1 Gleichstrommotoren	31
2.5.2.2 Synchronmotoren	32
2.5.2.3 Asynchronmotoren	33
3 Komponentenorientierte Analyse von WZM	35

3.1	Allgemeine Analyse	35
3.1.1	Kühlschmierstoffsystem	36
3.1.2	Kühlsystem.....	38
3.1.3	Maschinensteuerung.....	40
3.1.4	Antriebe	45
3.1.5	Schmierstoffsystem der Maschine.....	48
3.1.6	Absaugsystem.....	50
3.1.7	Zusatzeinrichtungen	52
3.2	Komponentenbaum für WZM	53
3.3	Betriebszustände von WZM / Drehmaschine	56
4	Aufstellung eines allgemeinen Modells für Drehmaschinen	58
4.1	Modellbildung	58
4.2	Anwendung des Modells an CTX alpha 500.....	61
4.2.1	Referenzmaschine CTX alpha 500.....	61
4.2.2	Ausgewählter Betriebszustand für das Modell	61
4.2.3	Ausgewählte Material-, Werkzeug- und Bearbeitungsparameter	62
4.2.4	Energiebedarfsmodelle der Baugruppen.....	62
4.2.5	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	65
5	Fazit und Ausblick.....	67
5.1	Fazit	67
5.2	Ausblick.....	67
6	Zusammenfassung.....	68
	Literaturverzeichnis	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Stromverbrauch nach Verbrauchergruppen 2016	1
Abbildung 1-2: Produktion von WZM nach Maschinengruppe	3
Abbildung 2-1: Gliederung der Fertigungsverfahren	6
Abbildung 2-2: Gliederung der Werkzeugmaschinen.....	8
Abbildung 2-3: Einige Drehverfahren.....	9
Abbildung 2-4: Aufbau einer konventionellen Drehmaschine.....	10
Abbildung 2-5: CNC-gesteuerte Universaldrehmaschine CTX alpha 500	11
Abbildung 2-6: Drehbearbeitungszentrum CTX beta 800 TC.....	14
Abbildung 2-7: Hauptachsen und Drehachsen	16
Abbildung 2-8: Energieformen.....	20
Abbildung 2-9: Vereinfachter Elektronik-Schaltplan einer Werkzeugmaschine	22
Abbildung 2-10: Energieformen und Umwandlungsmöglichkeiten	27
Abbildung 2-11: Qualitative Zustandsbeschreibung der Bedarfsgruppen.....	29
Abbildung 2-12: Aufbau und Schaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine.....	32
Abbildung 2-13: Prinzipieller Aufbau einer Synchronmaschine.....	33
Abbildung 2-14: Aufbau einer Asynchronmaschine	34
Abbildung 3-1: Typische Energieverbrauchsaufteilung einer Werkzeugmaschine	35
Abbildung 3-2: Kühlschmierstoffsystem.....	37
Abbildung 3-3: Schraubenspindelpumpe	38
Abbildung 3-4: Funktionsprinzip des Flüssigkeitskühlsystems.....	39

Abbildung 3-5: Darstellung einer Werkzeugmaschinensteuerung.....	40
Abbildung 3-6: Schema einer pneumatischen Steuerung	41
Abbildung 3-7: Aufbau einer Hydraulischen Steuerung	43
Abbildung 3-8: Antriebe einer Werkzeugmaschine	45
Abbildung 3-9: Hauptantriebe einer Werkzeugmaschine	46
Abbildung 3-10: Kennlinie des Hauptantriebes	46
Abbildung 3-11: Elektromechanischer Vorschubantrieb einer Werkzeugmaschine.....	47
Abbildung 3-12: Kennlinie des Vorschubantriebes	48
Abbildung 3-13: Aufbau eines Schmierstoffsystems.....	49
Abbildung 3-14: Aufbau einer Außenzahnradpumpe	50
Abbildung 3-15: Aufbau einer Zahnringpumpe	50
Abbildung 3-16: Aufbau eines Hochdruckventilators.....	51
Abbildung 3-17: Scharnierbandförderer mit Kühlmittelbehälter.....	53
Abbildung 3-18: Komponentenbaum für allgemeine Werkzeugmaschine	54
Abbildung 4-1: Leistungskennlinie von Hydraulikpumpe	63
Abbildung 4-2: Technische Daten von Zahnradpumpen-Aggregat.....	64
Abbildung 4-3: Elektrische Daten von FLKS-170S	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich von Drehmaschine und Drehbearbeitungszentrum	18
Tabelle 3-1: Vergleich der hydraulischen und pneumatischen Steuerung.....	42
Tabelle 3-2: Typische Kennwert einer Hydraulikpumpe.....	44
Tabelle 4-1: Einschaltzustand der Baugruppen einer Drehmaschine.....	60
Tabelle 4-2: Übersicht der Ergebnisse.....	66

Abkürzungsverzeichnis

WZM	Werkzeugmaschine
KSS	Kühlschmierstoff

1. Einleitung

Im einleitenden Kapitel werden die Problemstellung und die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit besprochen. Gleichzeitig erfolgt ein kurzer Überblick zu den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit.

1.1 Problemstellung

Energieeffizienz und Energiesparen sind heutzutage immer die wichtigen Themen in der Forschung. Die Statistik (Abb.1-1) zeigt, dass die Industrie allein fast die Hälfte (47 %) des gesamten Stroms in Deutschland verbraucht.

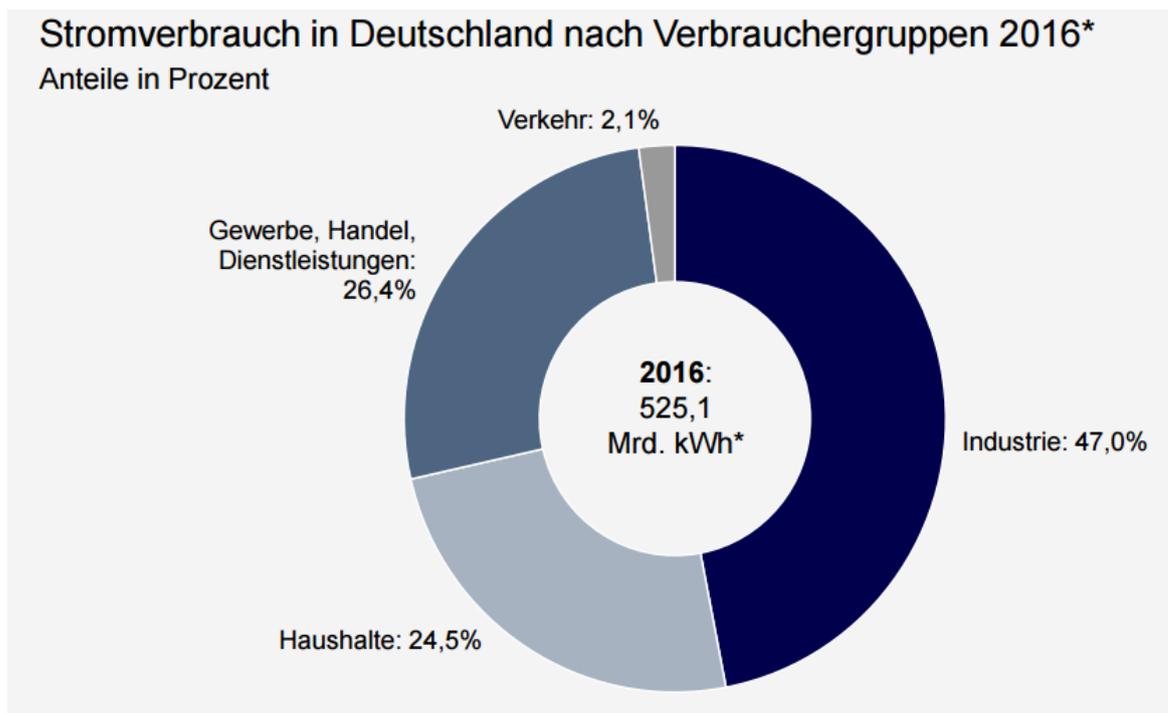


Abb.1-1: Stromverbrauch nach Verbrauchergruppen 2016 [Bund2017]

„Die elektrischen Antriebe in der Industrie verursachen rund zwei Drittel des Stromverbrauchs.“ [Fichtner2009] „Mehr als 90 Prozent der Gesamtkosten eines Elektromotors über die Lebensdauer entfallen auf den Stromverbrauch, weniger als zehn Prozent auf die Anschaffung. Gerade bei elektrischen Antrieben und

den davon angetriebenen Aggregaten besteht ein großes und wirtschaftliches Stromesparpotenzial.“ [Roswandowicz2015] Dadurch kann man die CO₂-Emissionen reduzieren und die Kosten der Unternehmen senken.

„Ziel der Bundesregierung ist es, die Energieproduktivität bis 2020 gegenüber 1990 zu verdoppeln.“ [König2011] Die Energieproduktivität ist das Verhältnis von Bruttoinlandsprodukt und Energieverbrauch. Das heißt, dass im Jahr 2020 pro Einheit Produkt nur noch halb so viel Energie wie 1990 verbraucht werden. Um dieses Ziel zu erreichen, muss man beispielsweise die Energie von Werkzeugmaschinen bei der Produktion effizienter nutzen bzw. weniger verbrauchen.

„In Deutschland sind rund 70 Prozent der Produktion spanende Maschinen. Volumenstärkste unter den zerspanenden Werkzeugmaschinen sind die Drehmaschinen/Drehzentren und die Bearbeitungszentren/flexible Fertigungssysteme.“ [Jürgen2016, S.11] Die Statistik (Abb.1-2) zeigt den Produktionswert von Werkzeugmaschinen nach Maschinengruppe in Deutschland. Im Jahr 2015 produzierte die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie Drehmaschinen und Drehzentren im Wert von rund 1700 Millionen Euro.

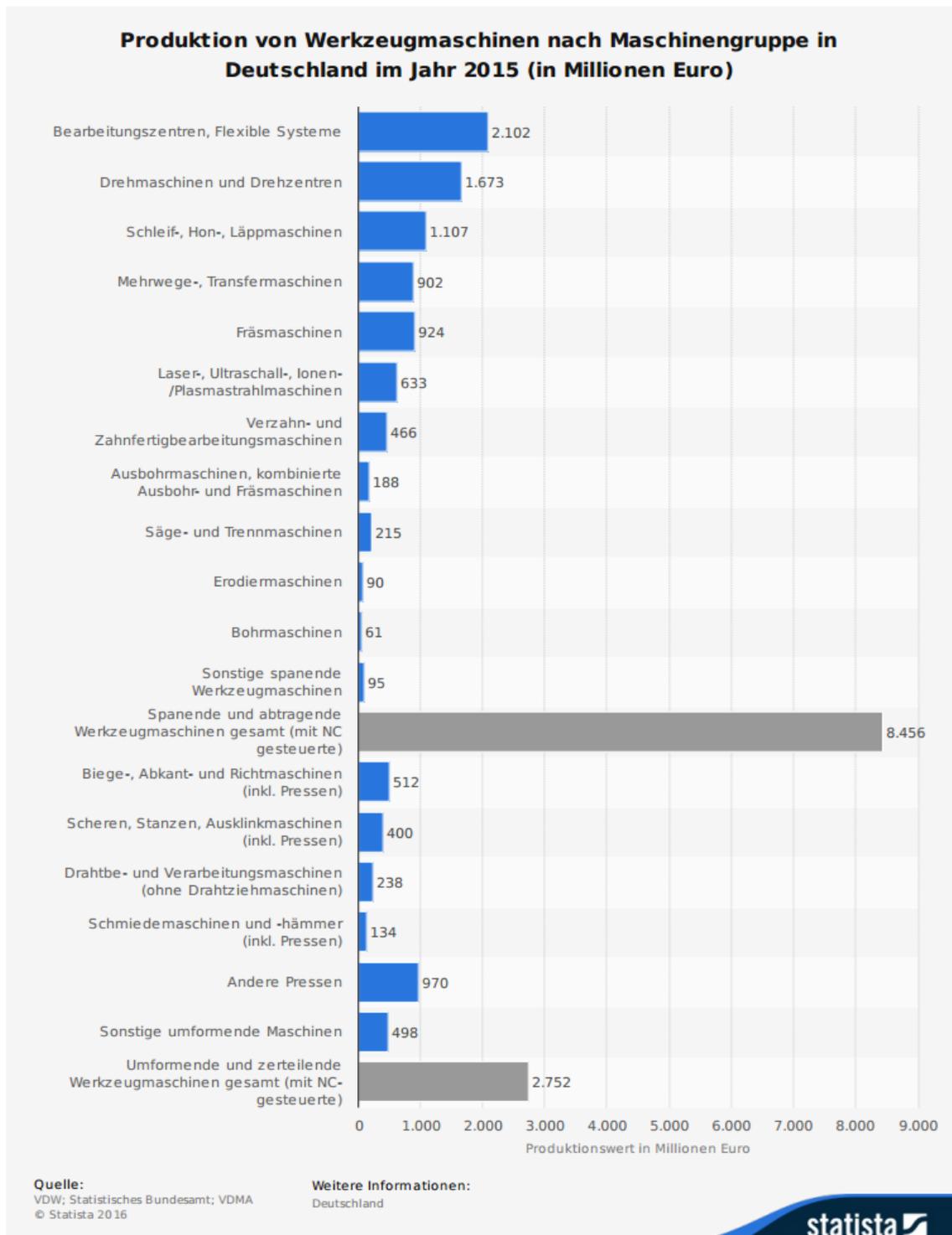


Abb.1-2: Produktion von WZM nach Maschinengruppe [Stat2016]

Die Drehmaschinen und Drehzentrum sind die am häufigsten vertretenen Werkzeugmaschinen in der Industrie. Um die größere Energieproduktivität in der Industrie zu erreichen, sind die Drehmaschinen und Drehzentrum im Fokus.

1.2 Aufgabenstellung

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Modellierung des energetischen Verbrauchs der Komponenten von Werkzeugmaschinen. Die Arbeit ist Bestandteil des Forschungsprojektes „Entwicklung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle sowie Qualifizierungskonzepte für die ressourceneffiziente Fertigung hochbeanspruchter Bauteile“ (MoQuaRT) und leistet einen Beitrag zur energetischen Bewertung von Werkzeugmaschinen.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist, dass die Energieumwandlung in einer Referenzmaschine (CTX alpha 500) untersucht und die Ursachen von Energieverlusten herausgefunden werden.

Das zu entwickelnde allgemeiner energetischen Gesamtmodell für Werkzeugmaschinen soll generisch sein, d.h. es soll für verschiedene Drehmaschinen bzw. Werkzeugmaschinen anwendbar sein.

1.3 Lösungsweg

Im Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen von Fertigungsverfahren, Werkzeugmaschinen und Energie im Fabrikbetrieb erklärt. Die Einteilungen der Fertigungsverfahren und der Werkzeugmaschinen werden erklärt. Anschließend werden der allgemeine Aufbau und die Arbeitsweise von Drehmaschinen und Drehbearbeitungszentrum vorgestellt. Die beiden Maschinenarten werden dann verglichen und die Unterschiede dargestellt. Weiterhin werden in diesem Kapitel die Begriffe wie Energieformen, Energieumwandlungen, energetische Verbraucher sowie elektrische Antriebe im Bereich Werkzeugmaschine erklärt.

Im Kapitel 3 wird die komponentenorientierte Analyse von Werkzeugmaschine durchgeführt. Zunächst werden alle Komponenten von einer Werkzeugmaschine

analysiert. Danach wird der Komponentenbaum für die allgemeine Werkzeugmaschine dargestellt. Abschließend werden die Betriebszustände von Werkzeugmaschinen bzw. Drehmaschinen analysiert.

Anschließend wird im Kapitel 4 das allgemeine Energiebedarfsmodell für Drehmaschinen aufgestellt. Zunächst wird eine Darstellung für alle energetischen Verbraucher der Drehmaschine erstellt. Im Anschluss werden die Rahmenbedingungen für das energetische Modell untersucht. Danach wird das Modell auf die Referenzmaschine CTX alpha 500 angewendet. Als Erstes werden die Herstellerdaten der Referenzmaschine CTX alpha 500 zusammengefasst. Dann wird die Drehmaschine in einzelne Komponenten, wie beispielsweise den Vorschubantrieb, dem Kühlsystem, der Hydraulik zerlegt. Danach werden die Wirkungsweisen der einzelnen Komponenten untersucht. Abschließend wurden die Ergebnisse zusammengefasst und mit Messdaten verglichen, um das energetische Modell der CTX alpha 500 zu bewerten.

Im vorletzten Abschnitt werden ein Fazit und Ausblick erfolgen.

Im abschließenden Kapitel 6 wird diese Arbeit mit ihren Ergebnissen zusammengefasst.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen von Fertigungsverfahren, Werkzeugmaschinen und Energie im Fabrikbetrieb erklärt. Zunächst werden die Einteilung der Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen sowie das Fertigungsverfahren Drehen erklärt. Danach werden der allgemeine Aufbau und die Arbeitsweise von Drehmaschinen sowie Drehbearbeitungszentrum vorgestellt. Anschließend werden die beiden Maschinenarten verglichen und die Unterschiede dargestellt. Weiterhin werden in diesem Kapitel die Themen Energieformen, energetische Verbraucher sowie Energieumwandlungen im Bereich Werkzeugmaschine erklärt.

2.1 Einteilung der Fertigungsverfahren

Die Fertigungsverfahren werden in der Norm DIN 8580 in sechs Hauptgruppen (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaft ändern) eingeteilt (Bild 2-1).

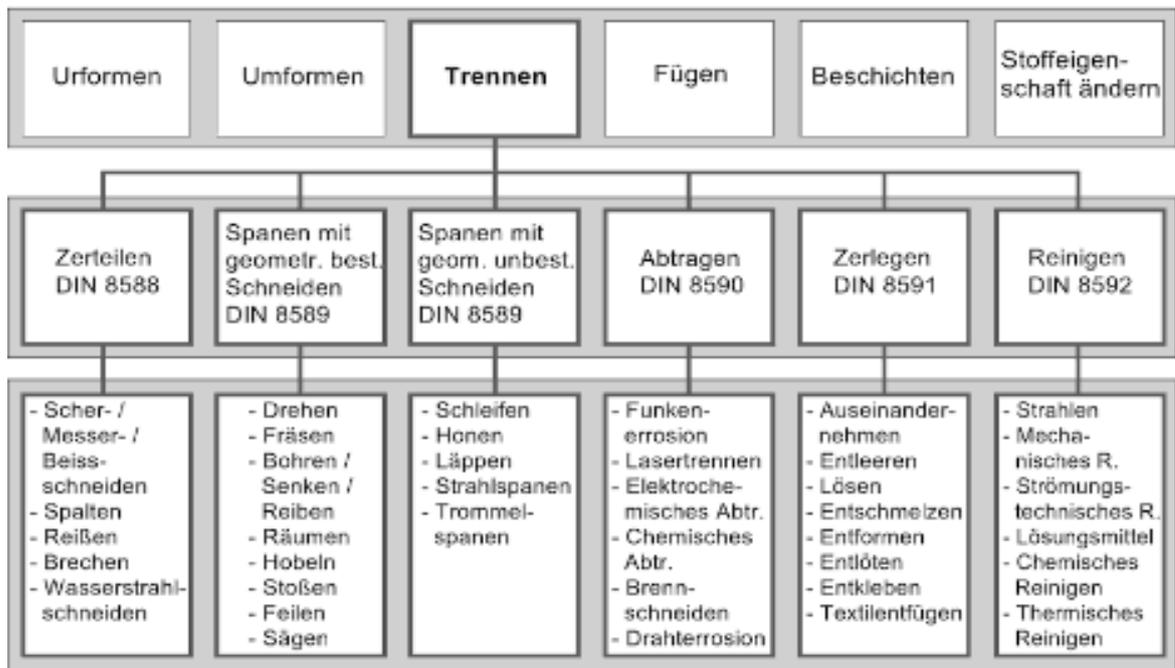


Abb.2-1: Gliederung der Fertigungsverfahren [Weck, Brecher2005, S.16]

Die Hauptgruppe **Trennen** wird wieder in sechs Untergruppen (Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden, Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden, Abtragen, Zerlegen und Reinigen) eingeteilt.

Das Fertigungsverfahren **Drehen** ist das am häufigsten angewandten Fertigungsverfahren für Einzel- und Kleinserienfertigung. Es befindet sich in der Untergruppe **Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden**.

2.2 Einteilung der Werkzeugmaschinen

Die Maschinen, die man für Fertigungsverfahren wie beispielsweise Drehen, Fräsen, Schleifen usw. benötigt, werden als **Werkzeugmaschinen** bezeichnet.

Die Gliederung, Einteilung und Bezeichnung von Werkzeugmaschinen ist durch die DIN 69651 festgelegt und das Fertigungsverfahren ist nach DIN 8580 eingeteilt. Die Einordnung der Werkzeugmaschinen ist im folgenden Bild (Abb. 2-2) gezeigt. Die Werkzeugmaschinen werden überwiegend für die Fertigungsverfahren des Umformens, Trennens und Fügens verwendet. Weiterhin gibt es noch Werkzeugmaschinen zum Beschichten und Urformen.

Die **Werkzeugmaschinen zum Trennen** werden hauptsächlich nach der Arbeitsverfahren in 2 Gruppen, **die spanlose Formgebung** und **spanende Formgebung**, unterteilt.

Werkzeugmaschinen sind heutzutage eine der wichtigsten Produktionsmittel der metallverarbeitenden Industrie. „Die Bundesrepublik Deutschland nimmt bei der Werkzeugmaschinenproduktion eine führende Stellung in der Welt ein. Innerhalb der Bundesrepublik Deutschland entfallen auf den Werkzeugmaschinenbau etwa 10% des Umsatzes des gesamten Maschinenbaus; 10% der Beschäftigten des Maschinenbaus sind im Werkzeugmaschinenbau tätig.“ [Weck, Brecher1991, S.V]

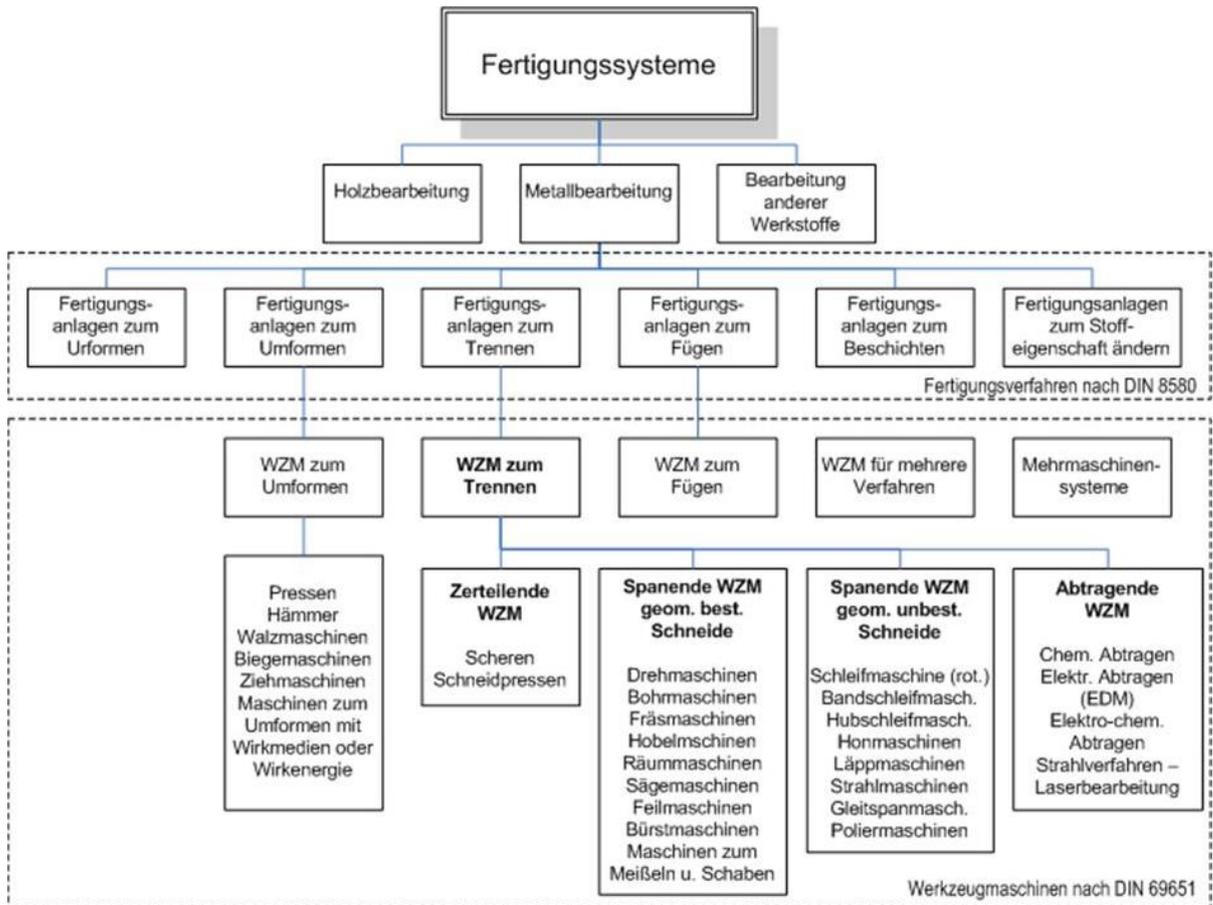


Abb.2-2: Gliederung der Werkzeugmaschinen [DIN 69651]

2.3 WZM zur Bearbeitung rotationssymmetrischer Teile

Zur Herstellung eines rotationssymmetrischen Teils wird das Fertigungsverfahren **Drehen** am häufigsten angewandt. Beim Drehen wird die Schnittbewegung durch Rotation des Werkstücks erzeugt. Die Drehverfahren werden nach der erzeugenden Fläche in beispielsweise Runddrehen, Plandrehen, Gewindedrehen usw. eingeteilt (Abb. 2-3). Für Drehverfahren werden insbesondere **Universaldrehmaschinen** bzw. **Drehbearbeitungszentren** verwendet.

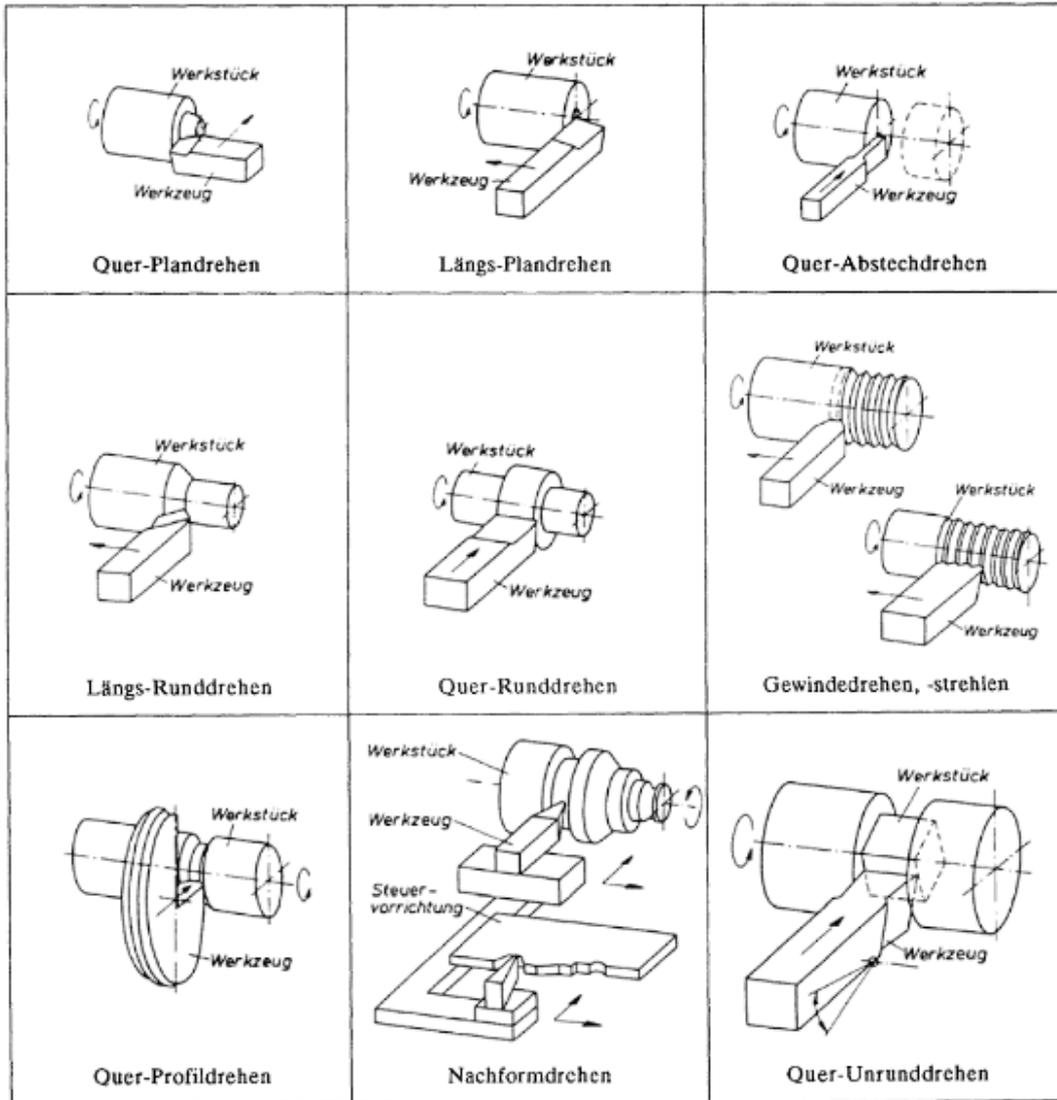


Abb.2-3: Einige Drehverfahren [DIN 8589]

2.3.1 Universaldrehmaschine

Die Universaldrehmaschinen sind die am häufigsten vertretenen Werkzeugmaschinen für Einzel- und Kleinserienfertigung. Sie werden in vielen Ausführungsformen gebaut.

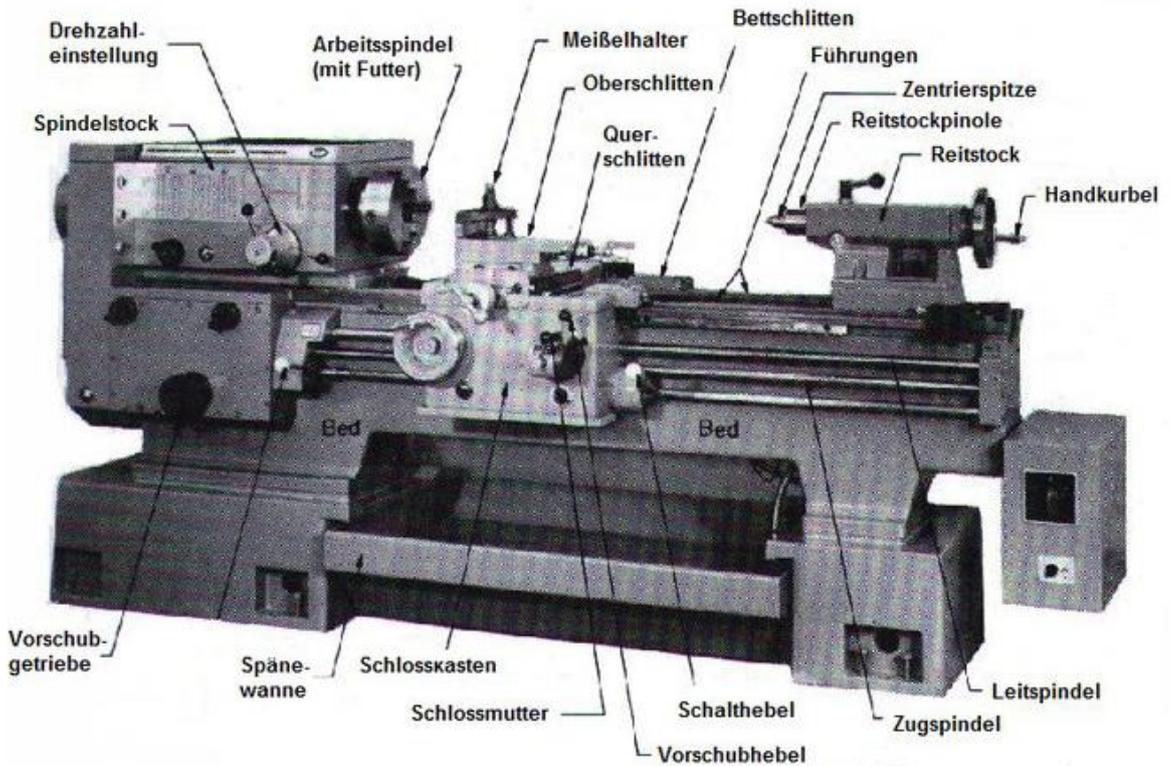


Abb.2-4: Aufbau einer konventionellen Drehmaschine [Fach1998]

Bild 2-4 zeigt eine konventionelle handbediente Universaldrehmaschine in Flachbettbauweise. Diese Maschine wird hauptsächlich zur Herstellung von Drehteilen und Ausführung von Dreharbeiten, beispielsweise Außen- und Innendrehen, Konturdrehen sowie Bohr- und Gewindeschneidarbeiten, genutzt.

Wegen der Weiterentwicklung von Drehmaschine werden heutzutage die konventionellen handbedienten Universaldrehmaschinen in der Industrie nicht mehr so häufig genutzt. Bild 2-5 zeigt eine CNC-gesteuerte Universaldrehmaschine **DMG MORI CTX alpha 500**. Sie ist die Beispielsmaschine dieser Bachelorarbeit.



Abb.2-5: CNC-gesteuerte Universaldrehmaschine CTX alpha 500 [DMGM2017]

Die CNC-gesteuerte Universaldrehmaschine arbeitet vom Prinzip genauso wie die konventionelle Drehmaschine, mit dem Unterschied, dass viele Vorgänge und Arbeiten computergesteuert durchgeführt werden. Bei der CNC-gesteuerten Universaldrehmaschine gibt es für jede Achse eigene Antriebe und einen programmierten Arbeitsablauf. Alle Bewegungen, die sonst mit der Hand durchgeführt werden, werden bei CNC-gesteuerten Universaldrehmaschinen programmiert, gespeichert und können beliebig oft wiederholt werden. Die Umschaltungen auf andere Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten und andere Wege sowie der Wechsel und die Positionierung von Werkzeugen werden auch gesteuert durchgeführt.

Der Einsatzbereich in der Industrie ist die Einzel- bis Serienfertigung von Maschinenbauteilen beispielsweise Futter-, Stangen- und Wellenarbeiten. Außerdem kann diese Maschine noch im Labor für Prozessoptimierungen und Zerspanungsversuche verwendet werden. Mehrere Technologien sowie genauere technische Daten werden in Kapitel 3 erläutert werden.

Die wichtigsten Aufbaugruppen der Universaldrehmaschine sind:

- das Maschinenbett
 - Das Maschinenbett bezeichnet das Maschinengestell einer Drehmaschine. Das Bett ist der Träger aller Teile und muss deshalb starr, biege- und torsionssteif sein. Es soll eine hohe Dämpfung haben. Es wird beim Drehen durch die Schnittkräfte, das Werkstückgewicht und das Eigengewicht auf Biegung und Verdrehung beansprucht. Kleinere Maschinen werden überwiegend mit Flachbett und Maschinen mit großen Drehlängen mit Schrägbett ausgeführt.
- der Spindelstock
 - Der Spindelstock dient zur Lagerung der Arbeitsspindel und nimmt zugleich das Hauptgetriebe auf. Er ist als Getriebekasten ausgebildet und als Aufbaueinheit mit einem wärmedämmenden Schmiersystem auf das Bett aufgeschraubt. Das System Spindel-Lagerung muss robust und wartungsfrei sein
- der Spindelantrieb
 - Die Spindelantriebe haben die Aufgabe, die Schnittkraft an der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Werkstück zu erzeugen. Die Spindel muss einen großen Drehzahlbereich haben und stufenlos regelbar sein. Deshalb werden heute für Hauptspindelantriebe nur noch die regelbaren Drehstrommotoren eingesetzt. In den meisten Fällen treibt der Motor über einen Zahnriemen die Hauptspindel direkt an. Bei der normalen Drehmaschine besteht der Hauptantrieb aus einem asynchronen Drehstrommotor mit konstanter Drehzahl und einem 12 bis 24-stufigen mechanischen Schieberadgetriebe mit dem Stufensprung zwischen 1,25 und 1,4.
- der Vorschubantrieb
 - Die Vorschubantriebe sind verantwortlich für die Vorschubbewegung des Bauteils oder des Werkzeugs. Sie erzeugen die Bewegung der Schlitten in den einzelnen Achsen. Für die Vorschubantriebe setzt man häufig Drehstrom-Servomotoren, Permanent-erregte Gleichstrommotoren und Schrittmotoren ein.
- der Bettschlitten mit Bettschlittengetriebe

- Das Bettschlittengetriebe hat die Aufgabe, die Drehbewegung der Zug- und Leitspindel in eine geradlinige Bewegung umzuwandeln. Außerdem wird von ihm auch die mechanische Querbewegung des Planschiebers abgeleitet.
- der Reitstock
 - Der Reitstock dient zum Abstützen langer Werkstücke mittels einer Zentrierspitze, die in die stirnseitig in das Werkstück eingebrachte Zentrierbohrung eingreift. Der auf separaten Führungsbahnen angeordnete Reitstock kann unabhängig vom Werkzeugschlitten positioniert werden.
- die Spannbacken
 - Die Spannbacken dienen zur Befestigung von Werkstück und Werkzeug bei Bearbeitung.
 - Das Wählen vom Spannmittel für die Werkstückspannung ist abhängig von der zu bearbeitenden Werkstückform und der Art der Bearbeitung. Es gibt beispielsweise Selbstzentrierendes Dreibackenfutter, Spannzange, Stirnseitenmitnehmer.
 - Für die Werkzeugspannung werden bei Universal-Drehmaschine häufig der Vierfachmeißelhalter oder der Schnellwechselmeißelhalter verwendet.
- das Sonderzubehör
 - Für die Bearbeitung wird zusätzlich das Sonderzubehör benötigt. Es gibt beispielsweise die Spänewanne, das Kegellineal oder der Späneförderer.

[Tschätsch2003, S.136-146]

2.3.2 Drehbearbeitungszentrum

„CNC-Drehautomaten, die mit mehreren Revolvern ausgestattet sind, die zusätzlich zu Drehbearbeitungen auch Fräs- und Bohrbearbeitungen ausführen, die

eine Werkstückwechseleinrichtung und in manchen Fällen auch eine Werkzeugwechseleinrichtung besitzen, werden **Drehzentren** oder **Produktionszentren** genannt. Kennzeichnende Eigenschaften der Drehzentren sind ihre große Flexibilität und Produktivität.“ [Perovic2006, S.708]



Abb.2-6: Drehbearbeitungszentrum CTX beta 800 TC [DMMO2017]

Bild 2-6 zeigt das Drehbearbeitungszentrum CTX beta 800 TC. Sie ist für die Komplettbearbeitung von Bauteilen bis 800 mm Länge geeignet. Durch die Haupt- und Gegenspindel bis 5.000 min^{-1} oder bis 770 Nm wird die 6-Seiten Komplettbearbeitung auf dieser Maschine realisiert. Der Platzbedarf ist nur $17,7 \text{ m}^2$. Sie hat direkte Wegmesssysteme in X-, Y- und Z-Achse und ein Scheibenmagazin mit 24 Werkzeugplätzen. Sie ist im Standard mit der neuesten 3D-Steuerungstechnologie „CELOS“ von DMG MORI und SIEMENS ausgerüstet. Durch die Komplettbearbeitung auf einem Drehbearbeitungszentrum werden Transport-, Raum- und Lagerungskosten verringert. [DMMO2017]

Der Aufbau des Drehbearbeitungszentrums ist prinzipiell wie bei Drehmaschine. Aber beim Drehbearbeitungszentrum gibt es noch zusätzlichen Komponenten.

Die zusätzlichen Komponenten der Drehbearbeitungszentrum sind:

- die Steuerung
 - Mit der Steuerung können einfache Werkstücke mit üblichen Konturen manuell im Büro oder in der Werkstatt direkt an der Maschine programmiert werden. Geometrie, Zyklen und Schneidenradiuskompensation werden von der Steuerung automatisch berechnet.
- der Schlitten und die Achsen
 - Bei den CNC-Drehmaschinen gibt es drei Hauptachsen.
 - X-Achse : für Quer- oder Planvorschub
 - Z-Achse : für Längsvorschub in Richtung Werkstückachse
 - Y-Achse : steht senkrecht zur Werkstückachse und ist seitlich versetzt. Sie wird bei der Komplettbearbeitung zur Erzeugung räumlicher Konturen benötigt.

Neben die drei Hauptachsen gibt es noch drei Drehachsen (siehe Abb. 2-7). Sie haben die Bezeichnung A, B und C und drehen sich jeweils um die Hauptachse (X, Y, Z).
- der Werkzeugschlitten
 - Sie bewegen sich in den Achsen X und Z. Einspindel-Drehautomaten sind überwiegend mit einem oder zwei bahngesteuerten Kreuzschlitten (für X- und Z-Richtung) mit Revolvern ausgerüstet. Jeder Schlitten hat seinen eigenen Antrieb.
- der Werkzeugträger
 - Überwiegend werden Revolverköpfe eingesetzt. Dabei unterscheidet man zwischen Stern-, Scheiben- und Kronenrevolver.
- Zusatzeinrichtungen
 - Z.B. Späneförderer, Kühlschmierstoff-Reinigungsanlagen, Temperiergeräte, Zentralschmieranlagen... [Tschätsch2003, S.156-162]

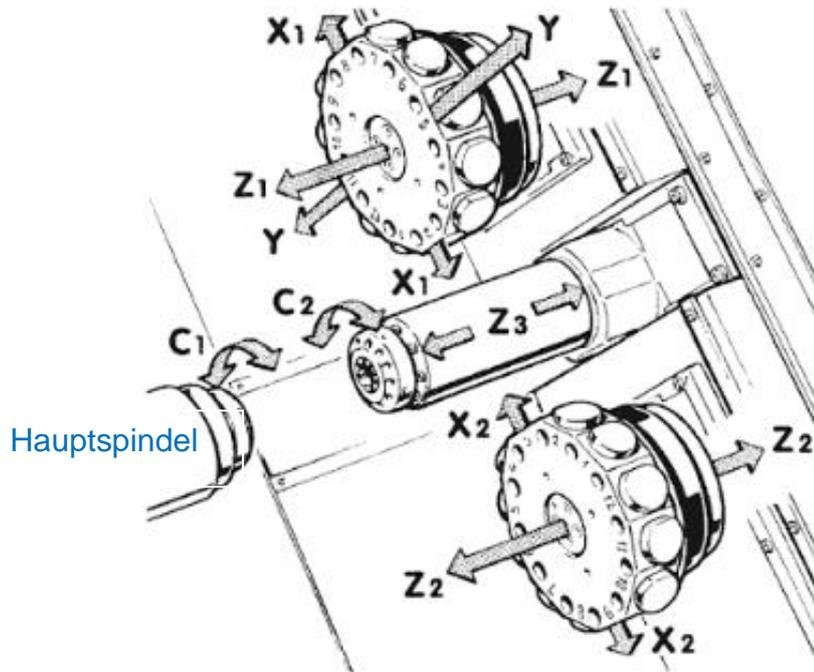


Abb.2-7: Hauptachsen und Drehachsen [Böge2015, S.69]

2.3.3 Vergleich von Drehmaschine und Drehbearbeitungszentrum

Im Vergleich zur Drehmaschine kann man mit dem Drehbearbeitungszentrum nicht nur Dreharbeiten, sondern auch Bohr- und Fräsarbeiten durchführen. Deswegen besitzt das Drehbearbeitungszentrum außer der Haupt- und Gegenspindel noch eine Frässpindel. Für Frässpindel von CTX beta 800 TC wird eine Dreh-Frässpindelmotor HSK-A63 mit 22 kW und 120Nm verwendet. Durch Zusammenarbeiten von Haupt-, Gegen- und Frässpindel kann eine 6-Seiten-Komplettbearbeitung auf dem Drehbearbeitungszentrum realisiert werden. Auf Drehmaschine kann man nur durch Haupt- und Gegenspindel das rotationssymmetrische Werkstück bearbeiten.

Auf CTX beta 800 TC kann ein Werkstück mit Durchmesser bis 500 mm und Länge bis 800 mm gefertigt werden. Für größeren Bearbeitungsbereich ist einen

größeren Bewegungsabstand von Reitstock notwendig. CTX beta 800 TC hat einen hydraulischen Reitstock mit Hub von 800 mm.

Das Drehbearbeitungszentrum besetzt eine Werkzeugaufnahme mit mehreren Plätzen, damit wird die Rüstzeit verringert. Auf CTX beta 800 TC kann entweder ein Scheibenmagazin mit 24 Plätze oder ein Kettenmagazin mit bis zu 80 Plätze verwendet werden. Auf CTX alpha 500 kann nur ein 12-fach-Rovoler verwendet werden.

Die Unterschiede sind in folgenden Tabelle (Tab. 2-1) für die Beispielsmaschinen CTX alpha 500 und CTX beta 800 TC zusammengefasst.

Kriterien	CNC-gesteuerte Unversaldrehmaschine (CTX alpha 500)	Drehbearbeitungszentrum (CTX beta 800 TC)
Max. Drehdurchmesser	bis \varnothing 240 mm	bis \varnothing 500 mm
Max. Drehlängen	Bis 525 mm	bis 800 mm
Hauptspindelmotor	Spindelmotor ISM 52 synchro mit 6.000 min^{-1}	Spindelmotor ISM 102 mit 5.000 min^{-1}
Leistung vom Hauptspindelmotor	14 kW	34 kW
Drehmoment vom Hauptspindelmotor	192 Nm	380 Nm
Gegenspindelmotor	ISM 36 mit 6.000 min^{-1}	ISM 52 mit 6.000 min^{-1}
Leistung vom Gegenspindelmotor	16,2 kW	27 kW
Drehmoment vom Gegenspindelmotor	62Nm	170 Nm
Frässpindel	nicht vorhanden	Dreh-Frässpindelmotor HSK-A63 mit 12.000 min^{-1} 22 kW 120 Nm

Y-Achse für komplexe Bearbeitungen	Mit ± 40 mm Hub	Mit ± 100 mm Hub
C-Achse	Integrierte C-Achse mit $0,001^\circ$ Auflösung	Integrierte C-Achse mit $0,001^\circ$ Auflösung
Werkzeugaufnahme	12-fach-Revolver mit Direct Drive (VDI 30) 5.000 min^{-1} 5,4 kW 18 Nm	Scheibenmagazin mit 24 Plätze oder Kettenmagazin mit bis zu 80 Plätze
Bearbeitung	Bearbeitung durch Hauptspindel und Gegenspindel	6-Seiten-Komplettbearbeitung durch Hauptspindel, Gegenspindel und Frässpindel
Steuerung	CELOS von DMG MORI mit SIEMENS und ShopTurn 3G HEIDENHAIN Steuerung	CELOS von DMG MORI mit SIEMENS 840D solutionline und ShopTurn 3G
Reitstock	Reitstock mit Hub von 550 mm	Hydraulisch Reitstock mit Hub von 800 mm
Wegmesssystem	Wegmesssysteme in allen Linearachsen	Direkte Wegmesssysteme in allen Linearachsen

Tab. 2-1 Vergleich von Drehmaschine und Drehbearbeitungszentrum [DMGM2017] [DMMO2017]

2.4 Energie im Fabrikbetrieb

Energie ist die Voraussetzung aller natürlichen Prozesse und die Grundbedingung für die Existenz des Menschen und seiner Gesellschaften. [Schabbach, Wesselak2012, S.1]

Im Fabrikbetrieb spielt die Energie auch eine zentrale Rolle. Sie kann in verschiedenen Energieformen erscheinen, beispielsweise als kinetische Energie, thermische Energie, elektrische Energie oder chemische Energie. Sie lässt sich auch von einer Form in eine andere bzw. von einem System zu einem anderen umwandeln, beispielweise durch Verbrennung wird die chemische Energie in thermischen Energie umgewandelt.

In diesem Abschnitt werden die auftretenden Energieformen zum Betrieb von Werkzeugmaschine erklärt, wobei auch auf die entsprechenden energetischen Verbraucher, Energieumwandlungen sowie Energiebedarf innerhalb der Werkzeugmaschine eingegangen wird.

2.4.1 Allgemeine Energieformen

Energie hat die Einheit Joule J. Energie tritt in verschiedenen Erscheinungsformen auf und kann gemäß Abb. 2-8 klassifiziert werden.

Kinetische und potenzielle Energie zählen zur mechanischen Energie, magnetische und elektromagnetische zur elektrischen Energie, thermische und chemische Energie sowie Kernenergie zur Innere Energie. Die thermische Energie ist am häufigsten erscheinende Form. Sie wird oft als Wärme bezeichnet, da die thermische Energie i.d.R. durch die Übertragung von Wärme geändert wird. [Zahoransky2009, S.7]

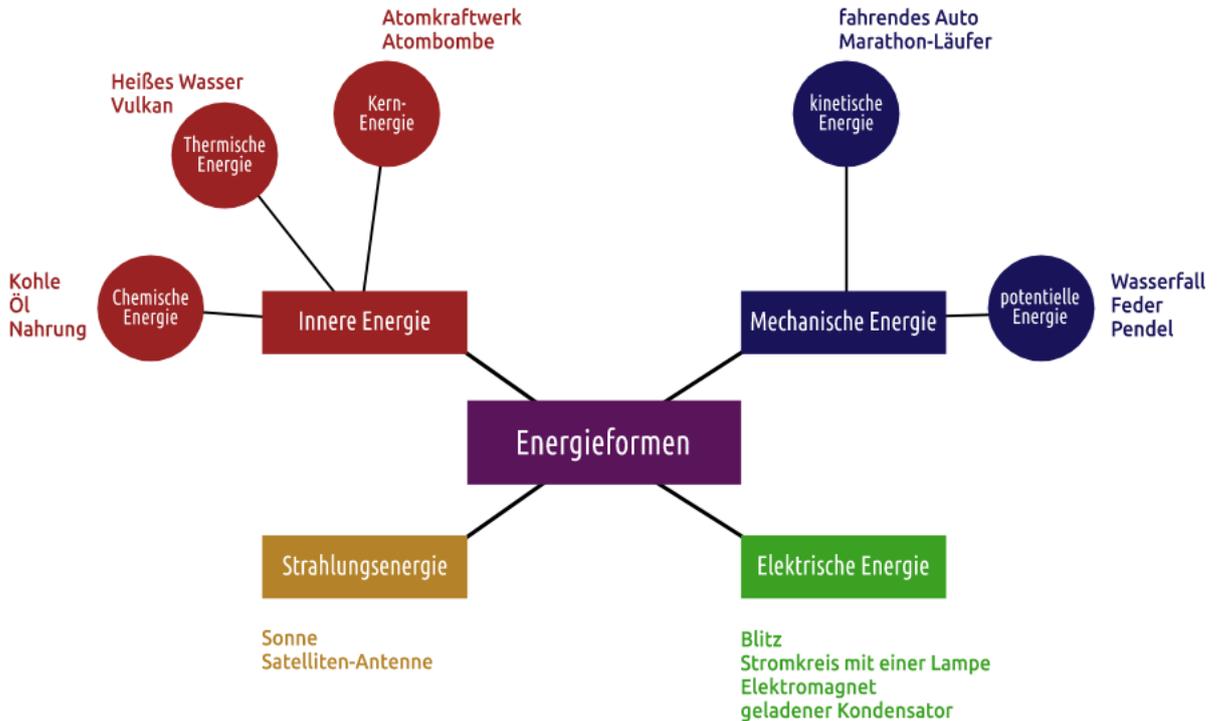


Abb.2-8: Energieformen [Stiftung2017]

2.4.2 Energieformen zum Betrieb von Werkzeugmaschinen

Zum Betrieb von Werkzeugmaschinen wird zunächst elektrische Energie genutzt, die dann in andere Energieformen, wie z.B. mechanische, hydraulische, pneumatische oder Wärmeenergie, umgewandelt wird. Beispielweise wird in einem Motor die Energie von der elektrischen Form in die kinetischen sowie die thermische Form umgewandelt.

- Elektrische Energie
 - Elektrische Energie, häufig Strom genannt, ist die Energie, die in elektrischen Feldern gespeichert oder mittels Elektrizität übertragen wird. Sie kann durch elektrische Arbeit zu anderen Energieformen umgewandelt werden, beispielweise durch einen elektrischen Antrieb wird die elektrische Energie zu mechanischen Energie und thermischen Energie umgewandelt.

„Werkzeugmaschinen werden ab einer bestimmten installierten Leistung mit 3-Leiter oder 4-Leiter Anschluss an das Stromnetz angeschlossen. Nach dem Hauptschalter verzweigen sich die Phasen auf zwei Stränge, die als Antriebsstrang und Peripheriestrang bezeichnet werden.

Am Antriebsstrang werden alle frequenzgeregelten Antriebe, die vom sogenannten Zwischenkreis gespeist werden, betrieben. Das sind in der Hauptachse die Hauptspindel- und die Vorschubantriebe. Darüber hinaus werden aber auch rotatorische Antriebe in Arbeitstischen, Werkzeugwechseleinrichtungen oder Werkzeugrevolvern vom Zwischenkreis gespeist.

An den Peripheriestrang werden vor allem direkt am dreiphasigen Netz betriebene Elektromotoren angeschlossen. Darüber hinaus wird das 400 Volt Netz über ein Schaltnetzteil auf 24 Volt umgesetzt, um z.B. die SPS mit Steuerspannung zu versorgen und an anderer Stelle auf 230 Volt transformiert, um damit einphasige Verbraucher wie den PC zu betreiben.

Noch vor dem Hauptschalter werden Verbraucher angeschlossen, die auch bei ausgeschalteter Maschine funktionsfähig sein sollen. Das sind zum Beispiel die Arbeitsraum- und Schaltschrankbeleuchtung oder aber die 230 Volt-Steckdose, die häufig im Schaltschrank installiert wird.“ [Kuhrke2011, S.30]

In Abbildung 2-9 ist beispielhaft ein vereinfachter Elektronik Schaltplan dargestellt, an dem die vorangegangenen Erläuterungen veranschaulicht werden.

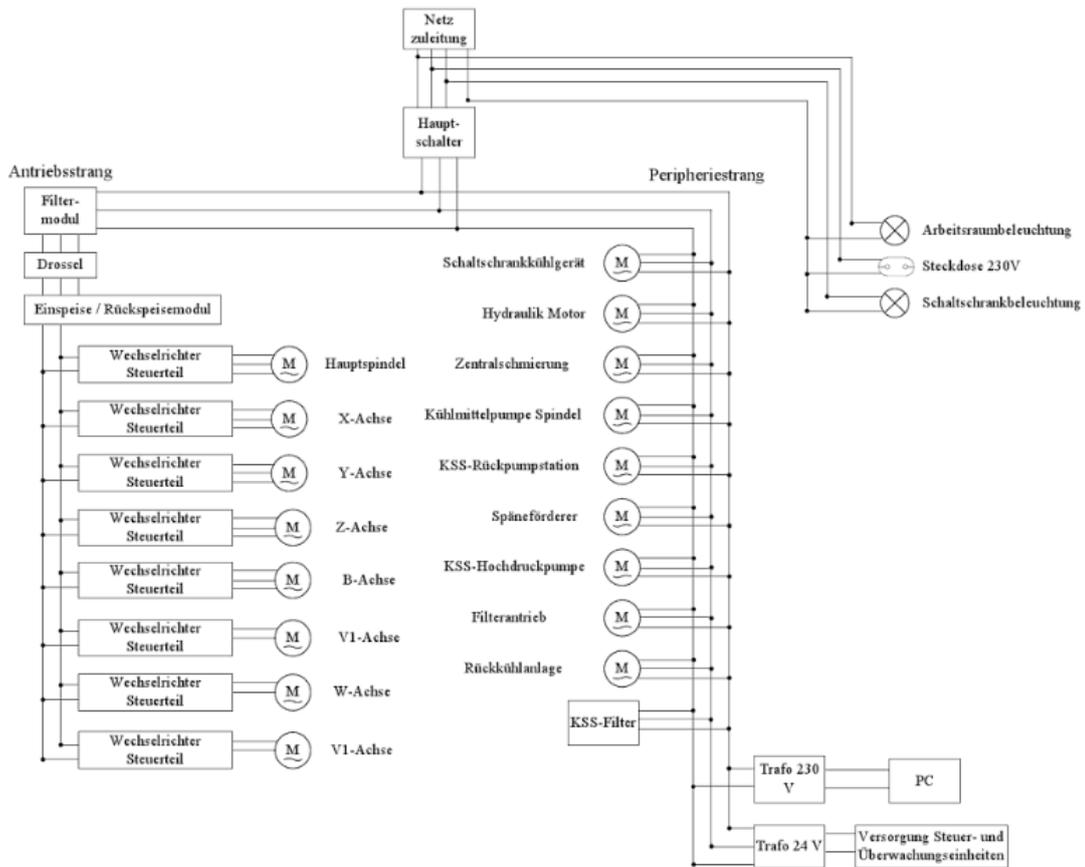


Abb.2-9: Vereinfachter Elektronik-Schaltplan einer Werkzeugmaschine [Kuhrke2011, S.31]

Für die Wirkleistung in einphasigen Wechselstromsystemen gilt mit den Momentanwerten für Spannung $u(t)$ und den Strom $i(t)$:

$$P_{el} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) dt$$

P_{el} - Wirkleistung

T - Periodendauer

oder einfacher aus den Effektivwerten

$$P_{el} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

$\cos(\varphi)$ - Phasenverschiebung

mit φ als Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom. Die Wirkleistung ist die tatsächliche Leistung, die zur Umwandlung in andere Energieformen verwendet werden kann. Des Weiteren existiert eine Blindleistung Q aus induktiven oder kapazitiven Verbrauchern, die zusätzlich übertragen werden muss, aber nicht umgewandelt wird, sondern zwischen dem Verbraucher und dem Energieversorger hin und her fließt.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$$

$\sin(\varphi)$ - Blindfaktor

Die Multiplikation der komplexen Spannung \underline{U} mit dem konjugiert komplexen Strom \underline{I} ergibt die Scheinleistung S . Diese Leistung ergibt sich auch, wenn Spannung und Strom getrennt voneinander ohne Betrachtung der Phasenverschiebung gemessen und multipliziert werden

$$S = U \cdot I$$

Die Scheinleistung ergibt sich auch aus der geometrischen Addition von Wirkleistung und Blindleistung.

$$S = \sqrt{P_{el}^2 + Q^2}$$

Als Einheiten werden für die Wirkleistung Watt (W), für die Blindleistung Voltampere reaktiv (var) und für die Scheinleistung Voltampere (VA) benutzt.

Die elektrische Energie berechnet sich aus dem Produkt der Leistung und der Zeit und hat die Einheit Wattsekunde (Ws) oder Kilowattstunde (kWh). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Leistung über

der Zeit nicht konstant sein muss ergibt sich als allgemeingültige Gleichung [Kuhrke2011, S.31-32]

$$E_{el} = \int U(t) \cdot I(t) \cdot \cos(\varphi) dt$$

- Mechanische Energie

- Mechanische Energie kennzeichnet den Zustand eines Körpers. Sie wird deshalb auch als Zustandsgröße bezeichnet. Mechanische Energie kann durch Arbeit in andere Energieformen umgewandelt und von einem Körper auf andere Körper übertragen werden.

Spezielle Formen mechanischer Energie sind die potenzielle Energie E_{pot} (Energie der Lage, auch Lageenergie genannt)

$$E_{pot} = m g h$$

und die kinetische Energie E_{kin} (Energie der Bewegung)

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 . [Rebhan2002, S.15]$$

- Thermische Energie

- Die thermische Energie ist ungeordnete, statistisch verteilte kinetische und inkohärente potenzielle Energie der mikroskopischen Bausteine (Atome oder Moleküle) makroskopischer Körper. Die kinetische Energie kann dabei in Form von Translationen, Rotationen und Vibrationen auftreten.

Die Thermische Energie wird durch Zufuhr oder Abfuhr von Wärme geändert, d.h. die Wärme ist keine Zustandsgröße. [Rebhan2002, S.18]

- Hydraulische Leistung

- Bei Werkzeugmaschine lässt die Werkstückspannung sich häufig hydraulisch schließen und die Werkzeugbewegungen sich hydraulisch antreiben, damit man für Einspannung bzw. Aufspannung des Werkstücks mehr Zeit sparen und die erforderliche Fertigungsgenauigkeit erreichen kann. Dafür sorgen die hydraulischen Antriebe.

Die hydraulische Leistung ist das Produkt aus Druckdifferenz Δp und Volumenstrom Q .

$$P = \Delta p \cdot Q$$

mit

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

P - Leistung in Watt [W]

Δp - Druckdifferenz in bar [bar]

Q - Volumenstrom in Kubikmeter pro Sekunde [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

t - Zeit in Sekunden [s]

V - Volumen in Kubikmeter [m^3] [Masc2017]

- Pneumatische Energie

- Um den Automatisierungsgrad bei Fertigungsprozess zu erhöhen und die Taktzeiten zu verkürzen, verwendet man häufig die pneumatische Automatisierungstechnik für beispielsweise das Öffnen und Schließen von Türen, den Schutz der Messsysteme sowie die Positionierung von Werkstücken. Der größte Vorteil der Pneumatik ist die Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung. Aber für die Pneumatik ist die Druckluft beim Betrieb der Werkzeugmaschine erforderlich. Im Vergleich zu anderen Energieformen ist die Druckluft relativ aufwändig. Deswegen werden heutzutage die pneumatischen Antriebe häufig durch elektrische Antriebe ersetzt.

„Der Energieverbrauch in pneumatischen Komponenten wird hauptsächlich durch den Luftverbrauch bestimmt. In den meisten Fällen wird der Luftverbrauch in Normlitern oder Normkubikmetern pro Zeiteinheit oder pro Bewegungszyklus angegeben. Ein Normliter bezeichnet hierbei das Volumen, das eine bestimmte Luftmasse bei Normbedingungen einnimmt. Als Normbedingungen wird meist Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur nach ISO6358 angenommen.“ [Watter2015, S.85-89]

- Reibungsenergie

- Reibung ist nach Fleischer „der Verlust an mechanischer Energie beim Ablufen, Beginnen oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Stoffbereiche.“ [Fleischer1983]

Durch Reibung wird die verlorengangene mechanische Energie in Wärmeenergie umgewandelt.

„In Werkzeugmaschinen tritt Reibung u.a. in folgenden Systemen auf:

- Elektromotor (Lager, Dichtungen)
- Linearführungen
- Getriebe (Kugelgewindetrieb, Zahnstangegetriebe)
- Abdeckungen
- Pumpen
- Ventilatoren“ [Kuhrke2011, S.34]

2.4.3 Energieumwandlungen innerhalb der Werkzeugmaschine

„Die Energietechnik wandelt natürlich Energievorkommen in für den Menschen nutzbare Formen um. Die in vier Klassen einteilbaren Energieformen lassen sich alle umwandeln, wie Bild 2-10 veranschaulicht.“ [Zahoransky2009, S.17]

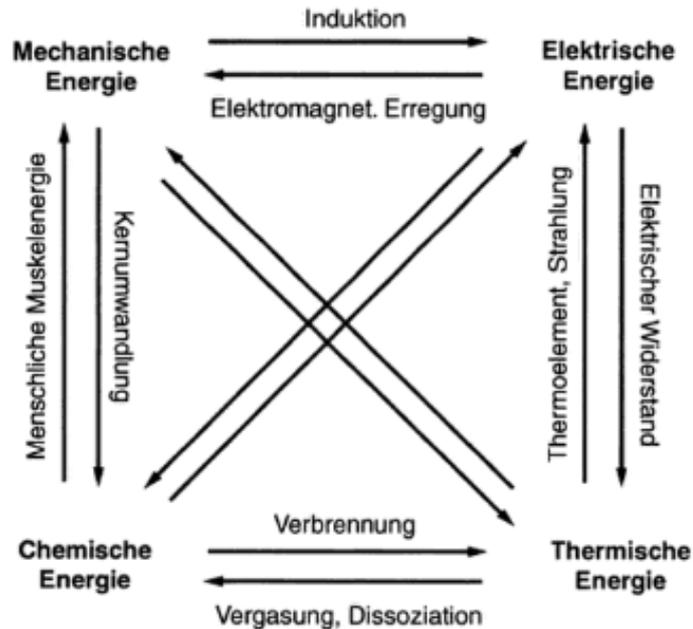


Abb.2-10: Energieformen und Umwandlungsmöglichkeiten [Zahoransky2009, S.17]

Energie kann durch chemischen, physikalischen oder technischen Vorgängen von einer Energieform in andere Energieformen umgewandelt werden. Beispielsweise wird die elektrische Energie durch die Induktion in mechanischer Energie umgewandelt.

Bei jeder Energieumwandlung geht im Energiewandler (z.B. Motor) ein Teil der Energie als Verlustenergie bzw. Verlustleistung P_V irreversibel verloren. Energieumwandlung in Werkzeugmaschinen ist stets mit Verlusten beispielsweise in Form von Wärme, Reibung und Abluft verbunden. Man versteht deshalb als Wirkungsgrad η das Verhältnis der Arbeit, die bei einer Energieumwandlung erhalten wird zur aufgewendeten Arbeit, so wie folgende Gleichung zeigt. [Paul2014, S.48]

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Gesamtarbeit}} = \frac{\text{Ausgangsleistung}}{\text{Eingangsleistung}}$$

Bei elektrischen Maschinen erfolgt die Energiewandlung im Vergleich zu anderen energetischen Prozessen mit einem hohen Wirkungsgrad, insbesondere bei elektrischen Maschinen großer Leistung. [Kremser2008, S.1]

2.4.4 Leistungsbedarf einer Werkzeugmaschine

Der Leistungsbedarf einer Werkzeugmaschine setzt sich aus **Nutz-** und **Verlustleistung** zusammen.

Unter der **Nutzleistung** versteht man bei den spanenden Werkzeugmaschinen die benötigte Schnittleistung, die sich im Wesentlichen aus der Hauptschnittkraft des Zerspanungsvorganges und der Schnittgeschwindigkeit ergibt.

Die **Verlustleistung** entsteht durch Reibung an den Führungen, in den Wellenlagern der Getriebe und beim Abwälzen der Zahnräder.

Die **Antriebsleistung** P_{an} lässt sich aus der **Nutzleistung** P_n an der Maschine und dem **Wirkungsgrad** η_M der Maschine rechnerisch bestimmen.

$$P_{an} = \frac{P_n}{\eta_M}$$

P_{an} - Antriebsleistung [kW]

P_n - Nutzleistung [kW]

η_M - Wirkungsgrad der Maschine [Tschätsch2003, S.23]

Ziel der Weiterentwicklung von Werkzeugmaschine ist die Verlustleistung zu verringern und den Wirkungsgrad zu verbessern. Damit mehr Energie wird durch den Fortschritt der Technologie gespart werden.

2.4.5 Energetische Verbraucher in Werkzeugmaschinen

„Die energetisch relevanten Baugruppen sind im Wesentlichen die in der Maschine verbauten Antriebe, Diese können für spanende Fertigungsverfahren in Hauptantriebe und Hilfsantriebe unterteilt werden. Die Hauptantriebe ermöglichen die Spanabnahme durch die Erzeugung der Schnittbewegung. Die Nebenantriebe sind verantwortlich für die Vorschubbewegung des Bauteils oder des Werkzeugs. Nicht direkt am formgebenden Prozess beteiligt sind die Hilfsantriebe, welche beispielweise den Werkzeugwechsel ermöglichen, die Kühlmittelpumpe und das Hydraulikaggregat antreiben oder den Maschineninnenraum absaugen. Die Nutzungsprofile der einzelnen Baugruppen sind in stationäre und instationäre Zustände unterteilt. Einen konstanten Leistungsbedarf, unabhängig vom Betriebszustand der Maschine, haben meist Nebenaggregate bzw. Hilfsantriebe mit einer festen Drehzahl. Dazu zählen z.B. Absaugeinrichtungen, Spänefördersysteme sowie Kühl- und Schmierstoffeinrichtungen. Diese vom Fertigungsprozess entkoppelten Baugruppen sind verantwortlich für die Grundlast der Werkzeugmaschine und stellen in unproduktiven Phasen die energetischen Hauptverbraucher dar.“ [Goy2016, S.7] Bild 2-11 zeigt die Zustandsbeschreibung der Bedarfsgruppen.

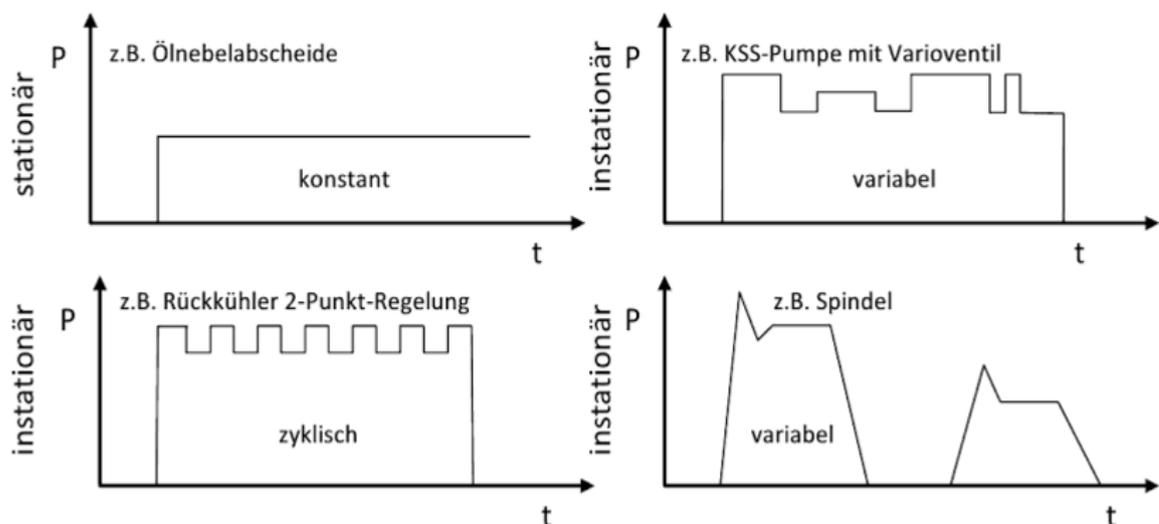


Abb.2-11: Qualitative Zustandsbeschreibung der Bedarfsgruppen [Goy2016, S.7]

Innerhalb eines Betriebszustands bleibt der Leistungsbedarf einer Baugruppe konstant, ist dieser Baugruppe in einem stationären Zustand. Wenn der Leistungsbedarf einer Baugruppe sich ändert, ist dieser Baugruppe in einem instationären Zustand. Die Leistungsänderung kann variabel oder zyklisch sein. Beispielsweise ist der Leistungsänderung von einer Spindel oder einer KSS-Pumpe mit Varioventil variabel. Im Kapitel 4 werden die Leistungsänderungen von jeden Baugruppen untersucht.

2.5 Elektrische Antriebe in Werkzeugmaschinen

2.5.1 Funktionale Sicht

Unter dem elektrischen Antrieb einer Werkzeugmaschine versteht man ihren **Motor** und **Stromrichter**.

Bei den Werkzeugmaschinenantrieben unterscheidet man wie bereits erwähnt zwischen **Hauptantrieb**, **Nebenantrieb** und **Hilfsantrieb**.

Die **Hauptantriebe** haben die Aufgabe, die Schnittkraft an der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Werkstück zu erzeugen. Die Hauptspindel, die bei Drehmaschinen der Werkstückträger ist, bei Fräsmaschinen und Bohrmaschinen der Werkzeugträger ist, wird durch den Hauptantrieb angetrieben. Die Hauptantriebe müssen die Leistung für den Bearbeitungsprozess aufbringen. Sie werden nach der aufzubringenden Leistung und dem erforderlichen Drehzahlbereich ausgewählt. Dabei wird gefordert, dass die Hauptantriebe über einen möglichst großen Drehzahlbereich mit konstanter Leistung belastet werden können.

Die **Nebenantriebe** werden häufig auch **Vorschubantriebe** genannt. Sie sind verantwortlich für die Vorschubbewegung des Bauteils oder des Werkzeugs. Sie erzeugen die Bewegung der Schlitten in den einzelnen Achsen. Für Nebenantriebe setzt man Drehstrom-Servomotoren, Permanenterregte Gleichstrommotoren und Schrittmotoren ein. Vorschubantriebe bezeichnet man auch als Servoantriebe.

Die **Hilfsantriebe** sind bei Werkzeugmaschinen verantwortlich für den Werkzeug- bzw. Werkstückwechsel, die Absaugung des Maschineninnenraum und die Erzeugung der Einstell-, Schalt-, Kontroll- und Messbewegung. Die Kühlmittelpumpe und das Hydraulikaggregat werden auch von Hilfsantriebe angetrieben. [Hirsch2000, S.109]

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Motorarten vorgestellt sowie ihr grundsätzlicher Aufbau und ihre Wirkungsweise beschrieben.

2.5.2 Motortypen

2.5.2.1 Gleichstrommotoren

„Ein Gleichstrommotor dient der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie, mit der mechanische Arbeit verrichtet wird. Dabei wird eine Drehbewegung erzeugt, die man zum Antrieb von Geräten und Anlagen verwendet. Genutzt wird das Prinzip, dass auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eine Kraft wirkt.“ [Biln2010]

In Bild 2-12 sind der prinzipielle Aufbau und das Schaltbild einer fremderregten Gleichstrommaschine dargestellt. Der Gleichstrommotor besteht aus dem Feldmagnet, dem Anker, dem Kollektor und der Kohlebürsten. Der stationäre Teil wird als Ständer und der rotierende Teil wird als Anker bezeichnet.

Die Gleichstrommaschine sind zwar vom Aufbau komplexer als die Drehstromasynchronmaschine, können mit weniger Gleichungen beschrieben werden. [Kremser1997, S.6]

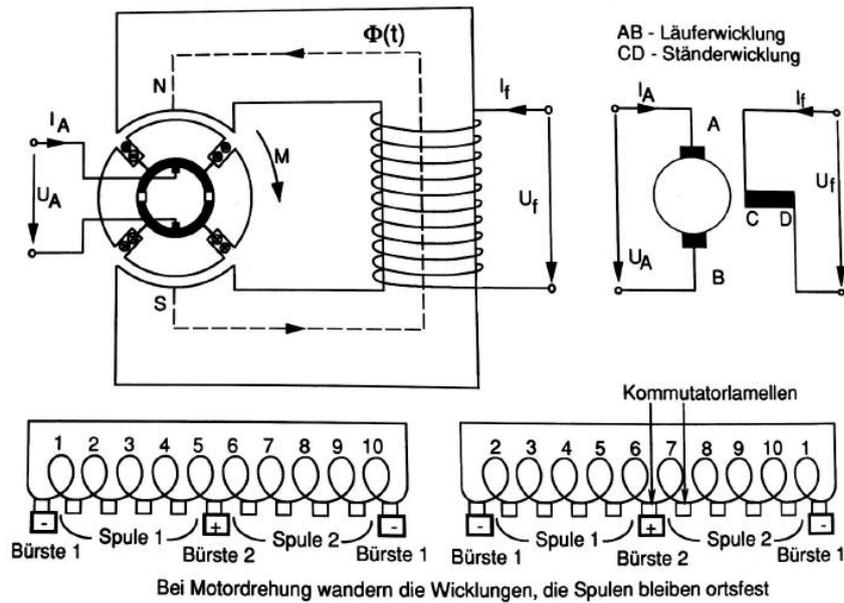


Abb.2-12: Aufbau und Schaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine [WeckM1991, S.430]

Vorteile des Gleichstrommotors sind der einfachere Aufbau der Stromrichter, die starre Kopplung der Drehzahl und der Winkellage an die Betriebsfrequenz, die hohe Regeldynamik und die hohe Leistungsdichte.

Nachteilig ist der höhere Wartungsaufwand (Kommutator, Bürsten) und die unerwünschte mechanische Drehschwingungen des Läufers. [Kremser2008, S.7]

2.5.2.2 Synchronmotoren

„Der Synchronmotor ist dem bürstenlosen Gleichstrommotor sehr ähnlich. Der größte Unterschied zwischen beiden liegt in der Art der Ströme, die vom Steuergerät in die Ständerwicklungen eingeprägt werden. Beim bürstenlosen Gleichstrommotor werden die Wicklungen zyklisch mit positiven und negativen Stromblöcken beaufschlagt. Beim Synchronmotor hingegen fließen in den Wicklungen sinusförmige Ströme.“ [Wtec2017] „Die im Bereich Werkzeugmaschinen und Industrieroboter eingesetzten Synchronmaschinen sind ausnahmslos permanent erregte Synchronmotoren.“ [WeckM1991, S.438]

Bild 2-13 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Synchronmaschine.

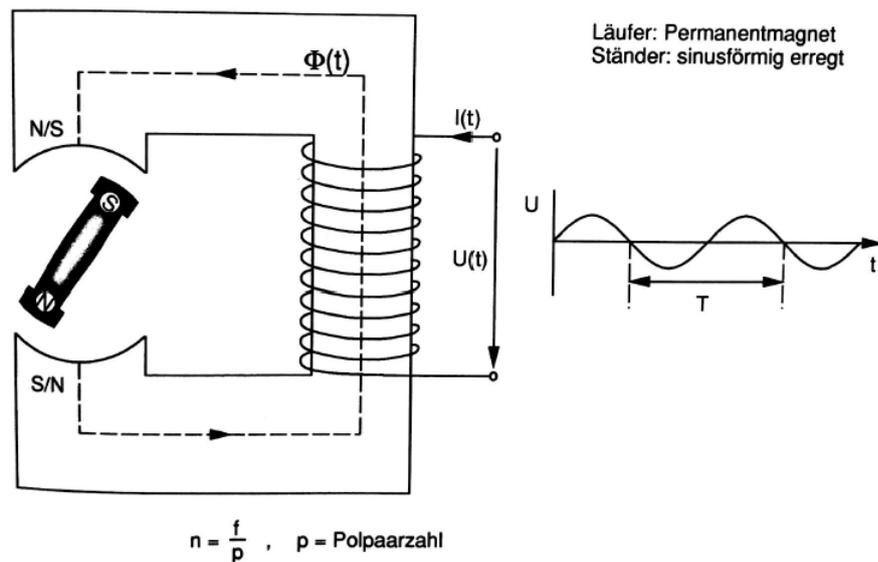


Abb.2-13: Prinzipieller Aufbau einer Synchronmaschine [WeckM1991, S.439]

„Als motorische Antriebe werden Synchronmaschinen häufig über Umrichter gespeist. Der Leistungsbereich von Synchronmotoren reicht von unter 1 kW (Servoantriebe) bis weit in den Megawatt-Bereich (Antrieb für Zementmühlen, Hochofengebläse, Pumpen).“ [Kremser2008, S.145]

„Im Vergleich zu Gleichstrommotoren ist als Nachteil die aufwendigere elektronische Drehzahlverstellung, der geringere Drehzahlstellbereich aufgrund der hohen Zentrifugalkräfte an den Permanentmagneten, und die geringere Gleichlaufgüte zu nennen. Die Synchronmotoren weisen jedoch eine gegenüber dem Gleichstrommotor höhere Dynamik auf, da die Kommutierungsgrenze entfällt und sie somit kurzzeitig auch bei hohen Drehzahlen mit höheren Strömen beaufschlagt werden können. Im Bereich der Werkzeugmaschinen wird der Synchronmotor hauptsächlich als Vorschubantriebe eingesetzt.“ [WeckM1991, S.441]

2.5.2.3 Asynchronmotoren

„Der Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer zählt zu den am weitesten verbreiteten Motortypen. Er ist einfach herzustellen, robust und praktisch wartungsfrei. Er kann ohne Stellgerät direkt am Drehstrom- oder Wechselstromnetz betrieben

werden. Gerade dieser Umstand sorgt dafür, dass Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufer in allen Bereichen der Industrie, des Verkehrswesens aber auch im Konsumgüterbereich so stark vertreten sind.“ [Wtec2017]

Bild 2-14 zeigt den Aufbau einer Asynchronmaschine. Der Asynchronmaschine besteht aus dem Ständer und dem Läufer. Der Ständer ist ähnlich dem der Synchronmaschine aufgebaut. Im Ständer befinden sich drei um 120° versetzte Drehstromwicklungen. Der Läufer besteht aus mehreren zylinderförmig angeordneten Leiterstäben. [WeckM1991, S.441]

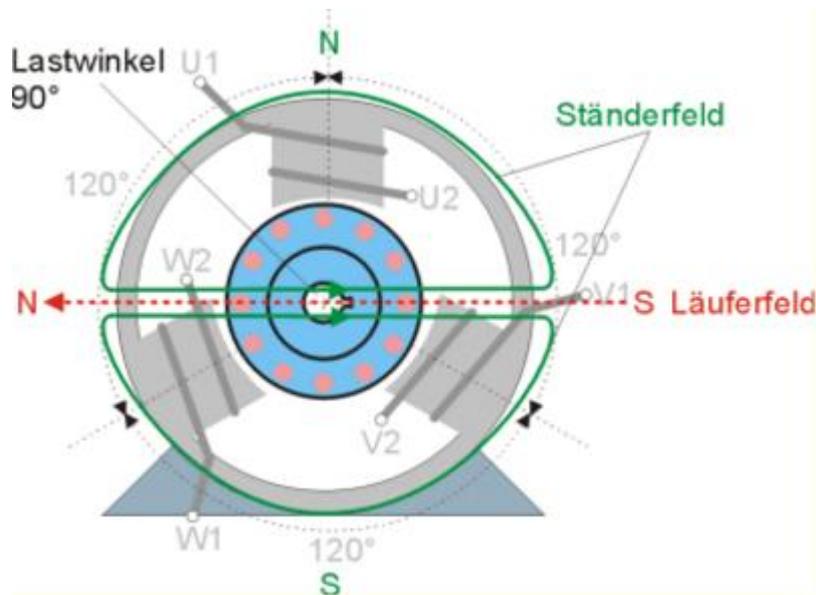


Abb.2-14: Aufbau einer Asynchronmaschine [Tele2017]

Vorteile der Asynchronmotoren sind die lange Lebensdauer, kurzzeitig stark Überlastbarkeit und geringe Herstellungskosten.

Nachteilig sind der hohe Anlaufstrom, komplexe theoretische Verfahren zur Berechnung und kein Haltemoment im Stillstand.

3. Komponentenorientierte Analyse von WZM

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die theoretischen Grundlagen vorgestellt sind, sollen die komponentenorientierte Analyse in den folgenden Kapiteln durchgeführt werden. Hierfür muss zuerst die komponentenorientierte Analyse für jedes System durchgeführt werden. Danach wird der Komponentenbaum für die allgemeine Werkzeugmaschine dargestellt werden. Abschließend werden die Betriebszustände von WZM bzw. Drehmaschinen analysiert.

3.1 Allgemeine Analyse

Um den Energieverbrauch zu erfassen, ist es notwendig, die energetisch Baugruppen in verschiedenen Systemen zu untersuchen.

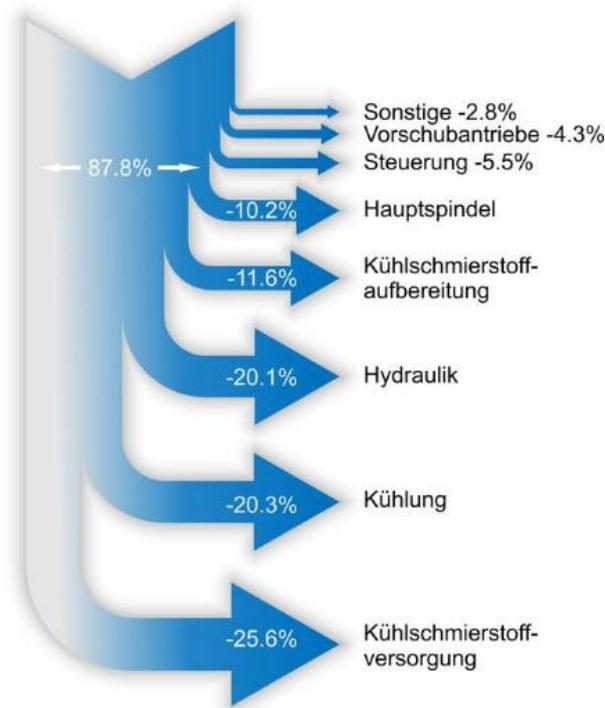


Abb.3-1: Typische Energieverbrauchsaufteilung einer Werkzeugmaschine [Langbein2012]

Das Sankey-Diagramm (Abb.3-1) zeigt eine typische Energieverbrauchsaufteilung einer Werkzeugmaschine. In diesem Diagramm kann man erkennen, dass

das Kühlschmierstoffsystem (Kühlschmierstoffversorgung + Kühlschmierstoffaufbereitung) einer Werkzeugmaschine etwa 37 (25.6 + 11.6) Prozent ihres Gesamtenergiebedarfs ausmacht. Durch den Einsatz einer drehzahlvariablen Hochdruckpumpe kann die Leistungsaufnahme der Hochdruckpumpe vom Kühlschmierstoffsystem um bis zu 45% reduziert werden. Danach folgen die Kühlung mit 20.3 Prozent und die Hydraulik mit 20.1 Prozent. Durch den Einsatz des Druckübersetzers kann die Leistungsaufnahme des Hydraulikaggregates um rund 60% reduziert werden. Der Bedarf von etwa einem Drittel verteilt sich auf Steuerung, Hauptspindel, Vorschubantriebe und Sonstige (z.B. Druckluft, Absaugung). Die Hauptspindel besitzt nur etwa 10 Prozent des Gesamtenergiebedarfs einer Werkzeugmaschine. [Langbein2012]

Die komponentenorientierte Analyse für jedes System wird im folgenden Abschnitt durchgeführt werden.

3.1.1 Kühlschmierstoffsystem

Die energetisch hauptsächlich relevanten Baugruppen sind, wie im Punkt 3.1 erwähnt, im Wesentlichen die in der Maschine verbauten Kühlschmierstoffsysteme. Das Kühlschmierstoffsystem dient dazu, bei der Bearbeitung das Werkzeug und Werkstück abzukühlen, die entstehende Wärme abzuführen, die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück zu reduzieren, den Verschleiß zu vermindern und die Späne wegzuspülen. Durch die Verwendung von Kühlschmierstoff wird die Standzeit des Werkzeuges erhöht und die Oberflächengüte verbessert. Die Kühlschmierstoffe werden unterteilt in wasserhaltige und wasserfreie Arten. Die Auswahl von Kühlschmierstoffen hängt hauptsächlich von der Schnittgeschwindigkeit und der erzeugten Wärme ab.

Bei der Bearbeitung muss eine ausreichende Menge an sauberem Kühlschmierstoff mit dem richtigen Druck und der richtigen Temperatur an das Werkzeug geleitet werden. Dafür wird das Kühlschmierstoffsystem verwendet.

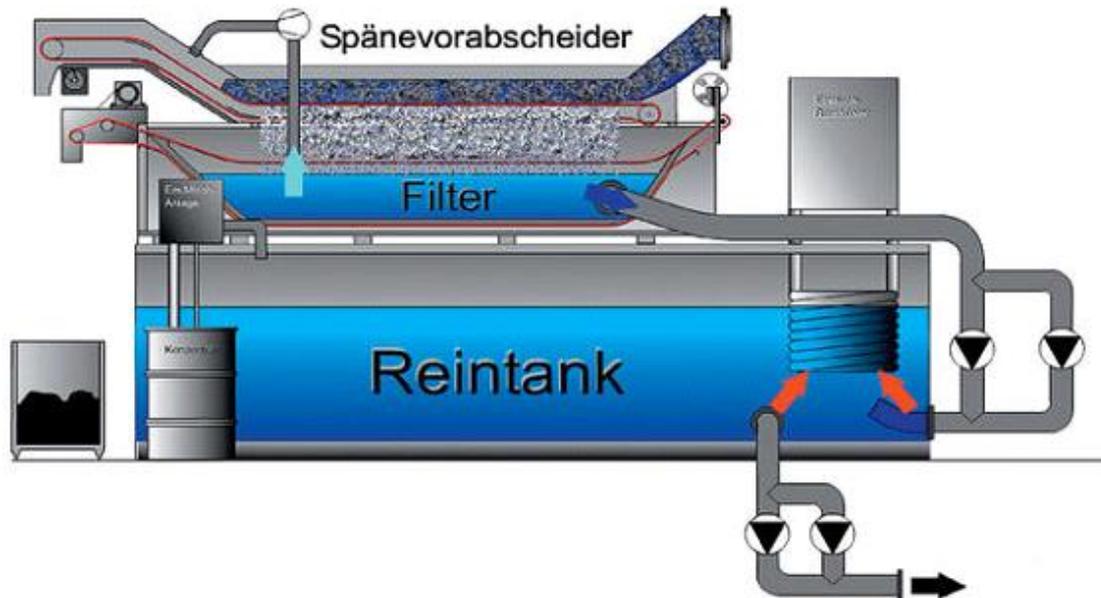


Abb.3-2: Kühlschmierstoffsystem [Polo2007]

Bild 3-2 zeigt ein Kühlschmierstoffsystem. Das Kühlschmierstoffsystem besteht aus einer **Reinigungsanlage** (Spänevorabscheider, Filter und Reintank), einer **Kühlschmierstoffversorgung** sowie einer Kühlung. [Perovic2006, S.353]

❖ Kühlschmierstoff-Reinigungsanlagen

- Die Kühlschmierstoff-Reinigungsanlagen sind die Hauptkomponenten des KSS-Kreislaufs. Sie dienen zur Entfernung der durch Bearbeitungsprozess eingetragenen Spänen und Schmutz. Zu mechanischen Trennverfahren gehören die Verfahren Filtrieren und Magnetabscheiden.

❖ Kühlschmierstoffversorgung

- Die Kühlschmierstoffversorgung besteht aus dem Tank und der **Pumpe** sowie der Auslegung der Versorgung der Bearbeitungsmaschinen und des Rücklaufs zur Reinigungsanlage. Als Pumpe werden in der Regel Kreisel- oder Schraubenspindelpumpen (siehe Abb.3-3) eingesetzt.

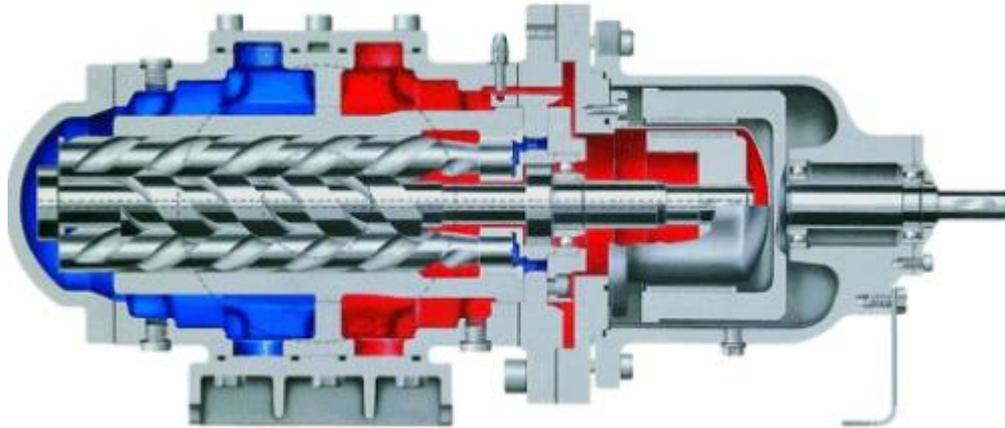


Abb.3-3: Schraubenspindelpumpe [Winkler2016, S.18]

Für Standard-Bearbeitungsverfahren werden meist niedrige Drücke an den Werkzeugmaschinen benötigt. In diesem Fall werden Kreiselpumpen eingesetzt. Für besondere Bearbeitungsverfahren, wie beispielsweise die Verwendung innengekühlter Werkzeuge, werden höhere Drücke benötigt. In diesem Fall reicht die Leistungsfähigkeit der Kreiselpumpen nicht mehr aus und es werden Schraubenspindelpumpen eingesetzt. [Grin2017] [WeckM1991, S.606-612]

3.1.2 Kühlsystem

In der Abb.3-1 kann man erkennen, dass die Kühlung einer Werkzeugmaschine etwa ein Fünftel ihres Gesamtenergiebedarfs verbraucht. Die Kühlung ist verantwortlich für das Absenken der Temperatur an Hauptspindelmotor, Lager, Schaltschrank und der Maschine selber, damit die Maschine bei dem Bearbeitungsprozess stets auf idealer Betriebstemperatur bleibt. Für die Spindeln und Lager werden häufig die Flüssigkeitskühlungen verwendet. Für den Schaltschrank verwendet man Luftkühlung. Die Abb.3-4 zeigt das Funktionsprinzip eines Flüssigkeitskühlsystems.

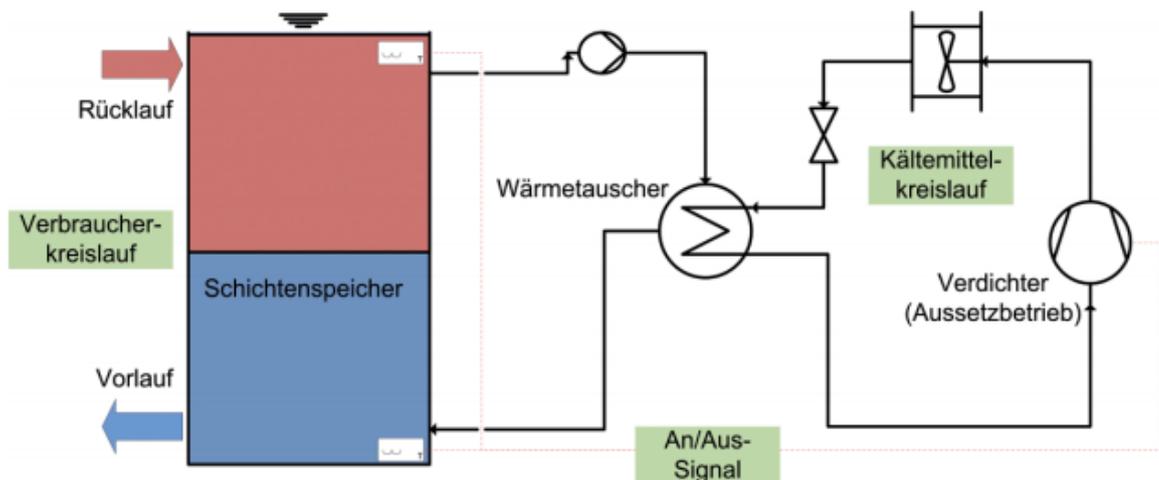


Abb.3-4: Funktionsprinzip des Flüssigkeitskühlsystems [Bund2012, S.309]

Die Hauptenergieverbraucher eines Flüssigkeitskühlsystems sind der Kühlmittel-Verdichter und die Kühlwasserpumpe. Der Kältemittel-Verdichter verbraucht etwa zwei Drittel der eingesetzten Energie und die Kühlwasserpumpe verbraucht das restliche Drittel.

❖ Kältemittel-Verdichter

- Das Kältemittel wird mit einem Kältemittel-Verdichter verdichtet und auf eine höhere Temperatur erwärmt. Als Kältemittel-Verdichter werden Schraubenverdichter, Drehkolbenverdichter oder Rohrkolbenverdichter verwendet. Der Kältemittel-Verdichter läuft im Dauerbetrieb.

❖ Kühlwasserpumpe

- Die Kühlwasserpumpe dient zum Umlaufen des Kühlwassers in einem Kühlwasserkreislauf. Als Kühlwasserpumpe kann man fast alle handelsüblichen Kreiselpumpen verwenden. [Bund2012, S.306-311]

❖ Ventilator

- Der Ventilator ist verantwortlich für die Kühlung von Schaltschrank und Elektromotor. Als Ventilator wird häufig das Ventilatorrad, das von einem Elektromotor angetrieben wird, verwendet.

3.1.3 Maschinensteuerung

Die Abb.3-5 zeigt eine prinzipielle Darstellung einer Werkzeugmaschinensteuerung. Eine Steuerung besteht aus der Steuereinrichtung (z.B. Steuergerät, Signalumformer, Verstärker und Stellglied) und der Steuerstrecke (z.B. Werkzeugwechsel, Schrittmotor, Kugelrollspindel und Nebenantrieb).

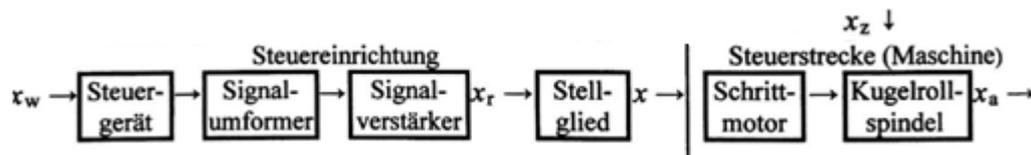


Abb.3-5: Darstellung einer Werkzeugmaschinensteuerung [Perovic2006, S.526]

Es gibt 3 verschiedenen Werkzeugmaschinensteuerungsarten: die verbindungsprogrammierbaren Steuerungen, die unprogrammierbaren Steuerungen und die Speicherprogrammierbaren Steuerungen. Zu den verbindungsprogrammierbaren Steuerungen gehören mechanische, pneumatische, hydraulische und elektrische Steuerung. Bei den Speicherprogrammierbaren Steuerungen gibt es speicherprogrammierbare Steuerung SPS und numerische Steuerung CNC. [Perovic2006, S.526-528]

Die Wichtigen Steuerungen in Werkzeugmaschine sind:

❖ Pneumatische Steuerung

- Die pneumatische Steuerung wird häufig für den Nebenantrieb einer Werkzeugmaschine angewandt. Für die Anwendung der Pneumatischen Steuerung ist die Druckluft immer erforderlich. Wegen der Druckbegrenzung von Druckluft ist sie nur für geringere Vorschub-

kräfte geeignet. Im Vergleich zu anderen Steuerungen ist sie eine relativ kostengünstige Steuerung. Die Abb.3-6 zeigt das Schema einer pneumatischen Steuerung.

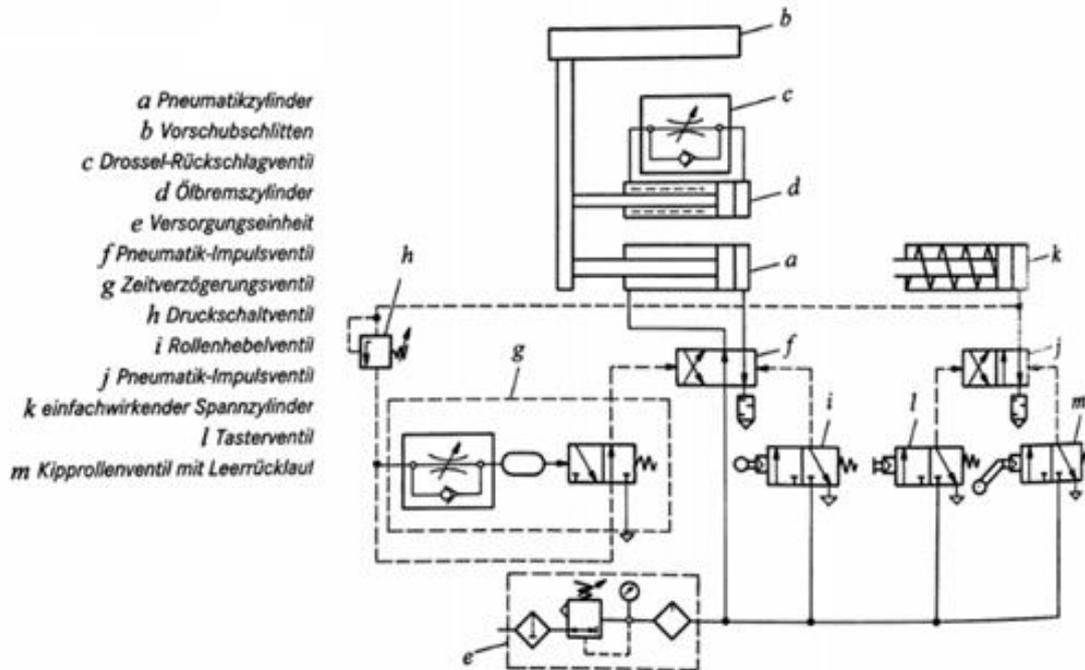


Abb.3-6: Schema einer pneumatischen Steuerung [Perovic2006, S.532]

Die Hauptenergieverbraucher eines pneumatischen Systems ist der **Pneumatikzylinder**. Dieser ist der Antrieb des Systems. Als Pneumatikzylinder werden beispielsweise einfachwirkende Arbeitszylinder, doppelwirkende Arbeitszylinder, Kurzhubzylinder oder Kompaktzylinder eingesetzt.

❖ Hydraulische Steuerung

- Die hydraulische Steuerung wird häufig für Sonderwerkzeugmaschine und Nebenantrieb verwendet. Im Vergleich zu pneumatischen Steuerung hat sie eine höhere Zuverlässigkeit und längere Lebensdauer. Außerdem kann die hydraulische Steuerung wesentlichen höhere Vorschubkräfte als die pneumatische Steuerung tragen. Ein Vergleich zwischen die hydraulische Steuerung und pneumatischen Steuerung ist in folgenden Tabelle zusammengefasst.

	Hydraulik	Pneumatik
Energiequelle	Elektromotor	Elektromotor
Energieumwandlung	Pumpen	Verdichter
Energieübertragung	Rohrleitung, Schläuche	Rohrleitung, Schläuche
Energieträger	Öl	Luft
Energiesteuerung und Regelung	Ventile	Ventile
Stellglieder	hydraulische Wegevventile	Pneumatische Wegevventile
Steuerglieder	hydraulische Wege-, Strom- und Druckventile	pneumatische Wege-, Wechsel- und Druckventile
Signalglieder	hand- oder mechanisch betätigte Ventile	hand- oder mechanisch betätigte Ventile
Energieumformung in Drehbewegung	Hydromotoren	Druckluftmotoren
Energieumformung in geradlinige Bewegung	Hydrozylinder	Druckluftzylinder

Tab.3-1: Vergleich der hydraulischen und pneumatischen Steuerung
[Tschätsch2000, S.67]

Die Abb.3-7 zeigt das Schema einer hydraulischen Steuerung. Eine hydraulische Steuerung besteht aus vielen Hydraulik-Steuerungselementen.

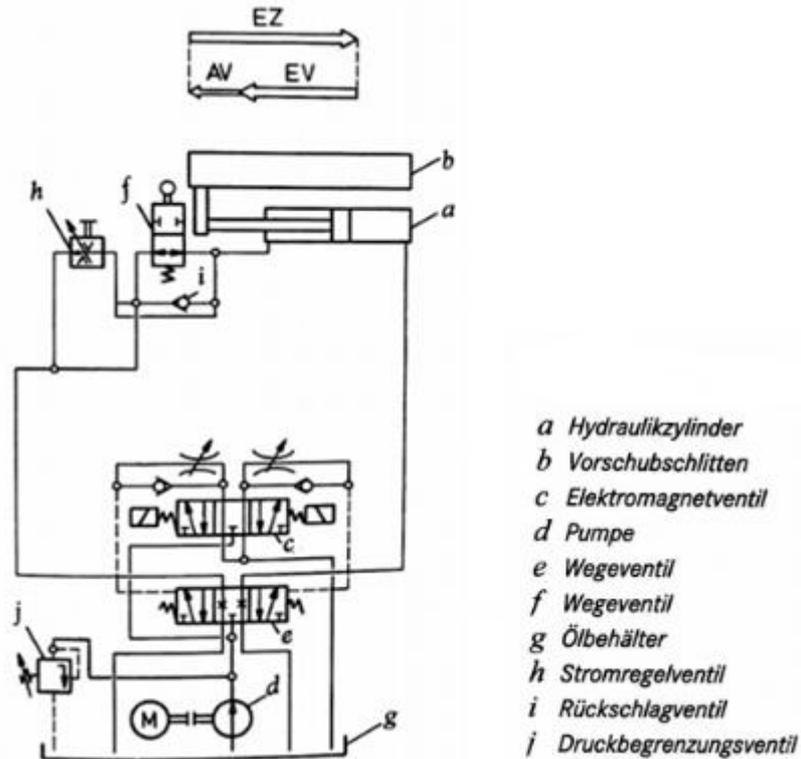


Abb.3-7: Aufbau einer Hydraulischen Steuerung [Perovic2006, S.533]

Die Hauptenergieverbraucher eines hydraulischen Systems ist die **Hydraulikpumpe**. Sie dient zur Erzeugung von einem kontinuierlichen Volumenstrom. Es gibt verschiedenen Bauarten der Hydraulikpumpe. In der Regel wird eine Außenzahnrادpumpe, Zahnringpumpe, Flügelzellenpumpe, Schraubenspindelpumpe oder Kolbenpumpe in einem hydraulischen System eingesetzt. Die entscheidenden Kennwerte für Auswahl der Hydraulikpumpe sind in der Tabelle 3-2 aufgelistet.

Bauart	Druck p_{\max} in bar	Drehzahl von bis in min^{-1}	Fördermenge \dot{V}_{\max} in l/min	Förderstrom	Gesamt- wirkungs- grad η_{ges} in %
1. Außenzahnradpumpen (mit Ausgl.)	120 bis 200	500 bis 3 500	300	pulsierend	50 ... 90
2. Innenzahnradpumpen	300	300 bis 3 000	100	pulsationsarm	60 ... 90
3. Flügelzellenpumpen, konstantes Verdrängungsvolumen variables Verdrängungsvolumen	200	1 000 3 500	200	pulsationsarm	65 ... 85
	150	1 000 2 500	200	pulsationsarm	70 ... 80
4. Axialkolbenpumpen	250 bis 350	500 bis 3 500	100 ... 500	pulsierend	80 ... 90
5. Radialkolbenpumpen	300 bis 700	200 bis 3 000	125	pulsierend	80 ... 90
6. Schraubpumpe	160	500 bis 3 500	100	pulsationsfrei	60 ... 80

Tab.3-2: Typische Kennwert einer Hydraulikpumpe [Winkler2016, S.21]

❖ Numerische Steuerung

- Die numerische Steuerung, kurz NC (numerical control), hat die Aufgabe, die Drehzahlen und Vorschübe von Haupt- und Nebenspindel während des Arbeitsablaufes zu verändern. Sie wird auch als CNC (computer numeruca control) genannt, weil die meisten NC-Steuerungen rechnergesteuert sind.

Bei der numerischen Steuerung werden zuerst die Produktionsdaten (z.B. Zeichnung, Arbeitsplan, Werkzeugplan und Maschinendaten) durch eine Programmier-Anweisung zur Steuerbefehle mit Zahlen und Buchstaben umgesetzt. Danach werden die Steuerbefehle in die Steuerung eingegeben. Diese Steuerbefehle werden in der Steuerung verarbeitet und als Weg- oder Schaltinformation an die Stellglieder weitergegeben. Die Abstandmessung während des Arbeitsablaufes wird

durch ein Wegmesssystem realisieren. [Perovic2006, S.526-546]
[Tschätsch2000, S.110-125] [Winkler2016, S.12-40]

3.1.4 Antriebe

Die anderen energetisch relevanten Baugruppen sind im Wesentlichen die in der Maschine verbauten Antriebe. Diese können für spanende Fertigungsverfahren in Hauptantriebe, Nebenantriebe und Hilfsantriebe unterteilt werden (siehe Abb.3-8). Jeweiligen Aufbau und Aufgaben sind schon im Abschnitt 2.4 erläutert geworden.

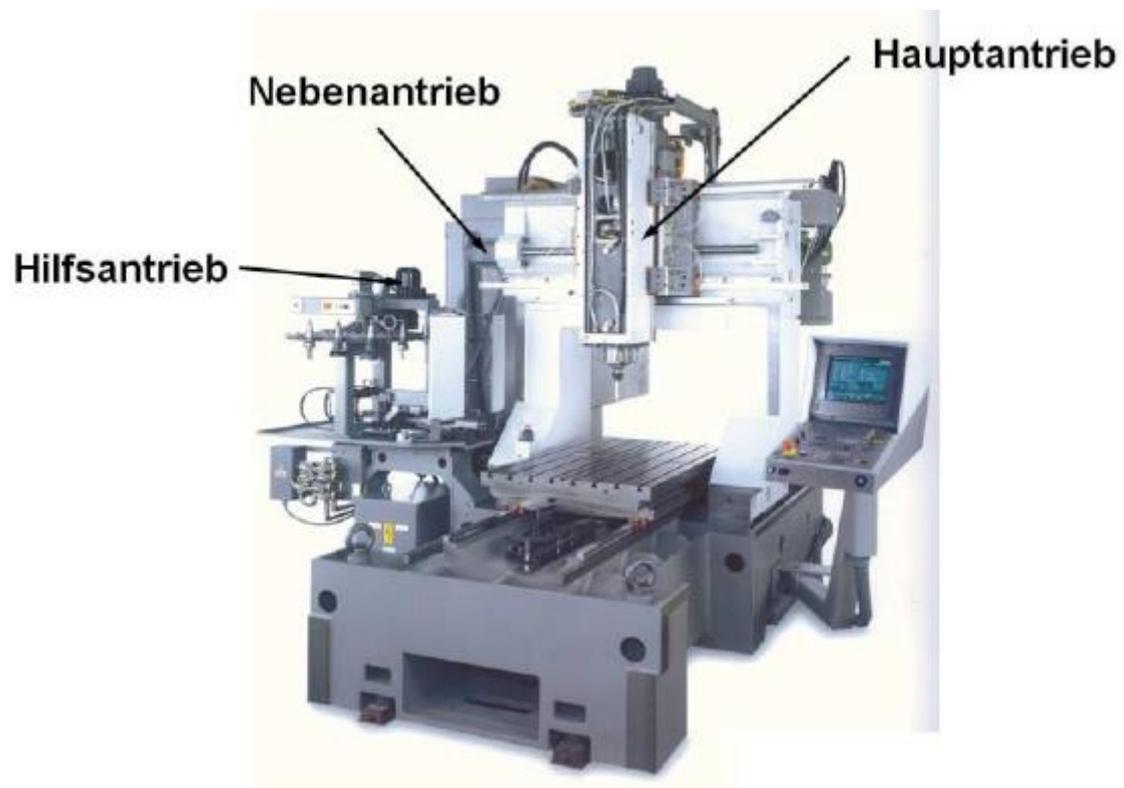


Abb.3-8: Antriebe einer Werkzeugmaschine [Wißuwa2006, S.3]

❖ Hauptantriebe

- Hauptantriebe werden als **elektromechanischer Antrieb** oder **Direktantrieb** ausgeführt (siehe Abb.3-9).

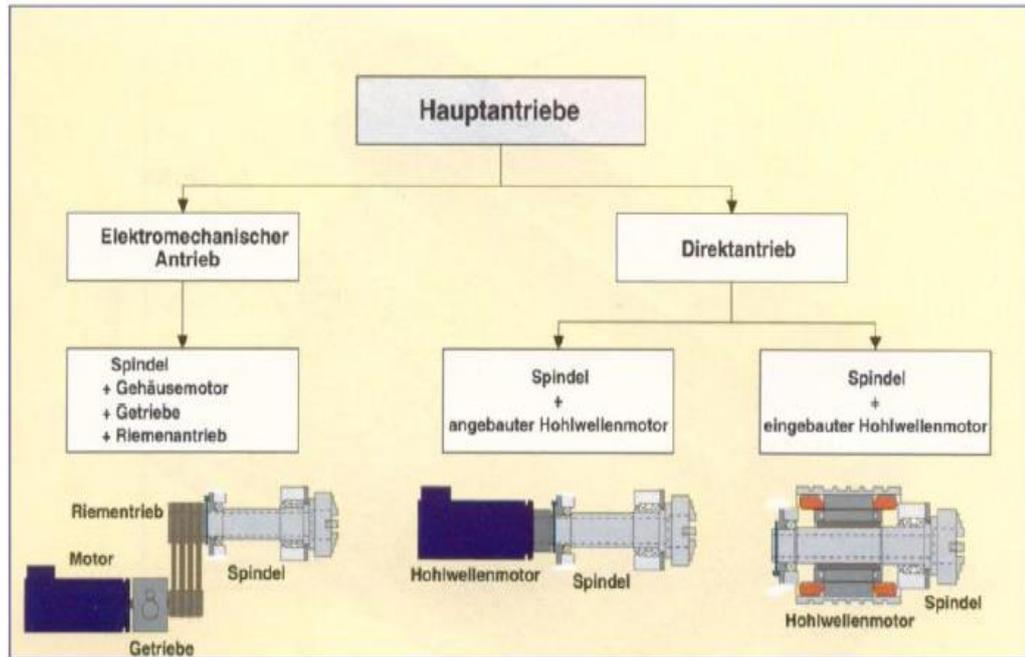


Abb.3-9: Hauptantriebe einer Werkzeugmaschine [Wißuwa2006, S.3]

Der elektromechanische Antrieb besteht aus dem **Drehstromasynchronmotor** oder **Gleichstrommotor** und mechanischem Getriebe. Das mechanische Getriebe wird als Riemengetriebe oder Schieberadgetriebe ausgeführt. Der Direktantrieb wird als Spindel mit angebauter oder eingebauter Hohlwellenmotor ausgeführt.

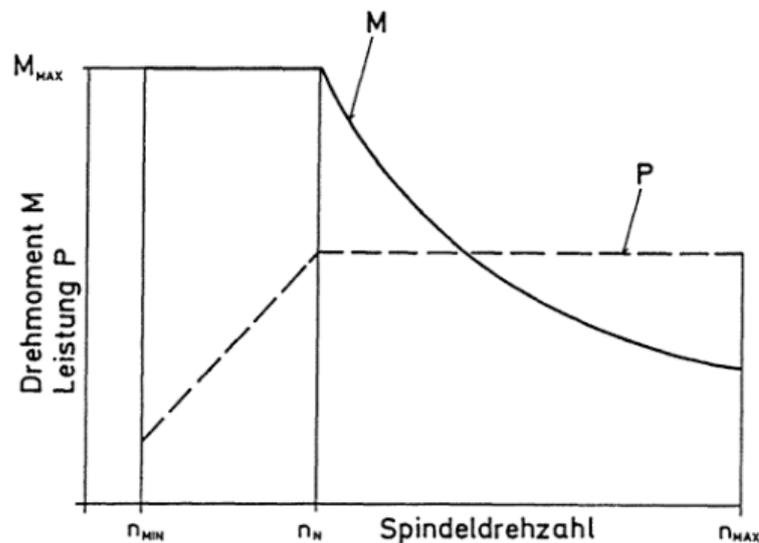


Abb.3-10: Kennlinie des Hauptantriebes [Perovic2006, S.685]

In der Abb.3-10 ist die Kennlinie eines Hauptantriebes dargestellt.

❖ Nebenantriebe

- Nebenantriebe werden durch **elektromechanischen Antrieb, Hydraulikzylinder, Hydromotor, Drehstrom-Servomotor, Drehstrom-Linearmotor** oder **elektrische Schrittmotor** angetrieben.

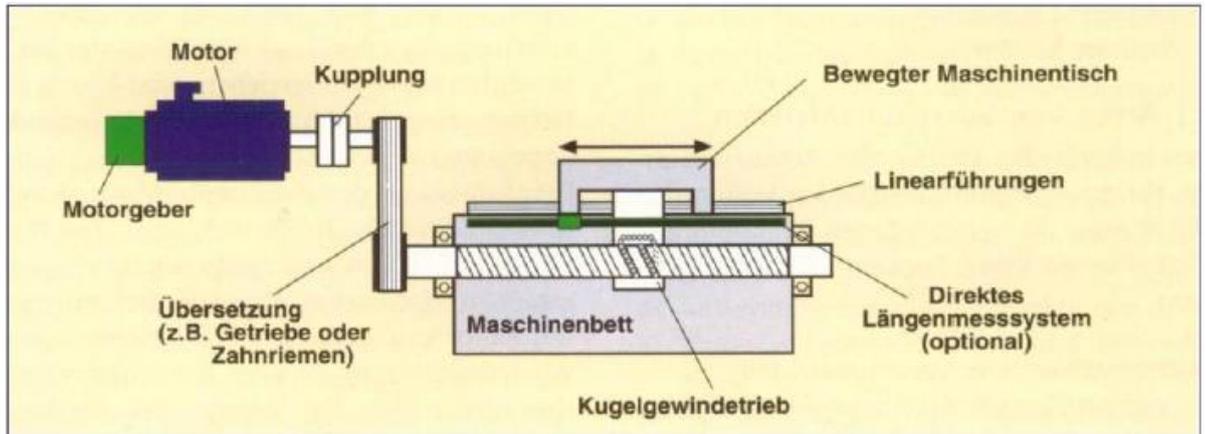


Abb.3-11: Elektromechanischer Vorschubantrieb einer Werkzeugmaschine
[Wißuwa2006, S.3]

Die Abb.3-11 zeigt den elektromechanische Vorschubantrieb einer Werkzeugmaschine. Dieser Nebenantrieb besteht aus einem asynchronen Drehstrommotor und einem mechanischen Getriebe. [Perovic2006, S.659]

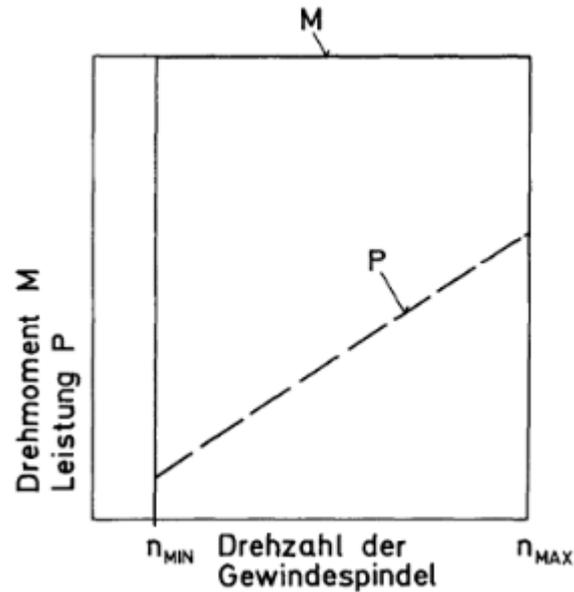


Abb.3-12: Kennlinie des Vorschubantriebes [Perovic2006, S.659]

Die Abb.3-12 zeigt die Kennlinie eines Vorschubantriebes. In diesem Diagramm kann man erkennen, dass die Leistung P mit der Drehzahl linear ansteigt.

3.1.5 Schmierstoffsystem der Maschine

Die Relativbewegung in allen Materialkontaktstellen ist die Hauptursache von Reibung und Verschleiß. Um die Reibung und Verschleiß in Werkzeugmaschine zu reduzieren, werden Zentralschmieranlagen immer in Werkzeugmaschine eingebaut. Zentralschmieranlagen haben die Aufgabe, die den Lagerungen, Führungen und Getrieben zuverlässig dosierte Schmierstoffmengen zu zuführen.

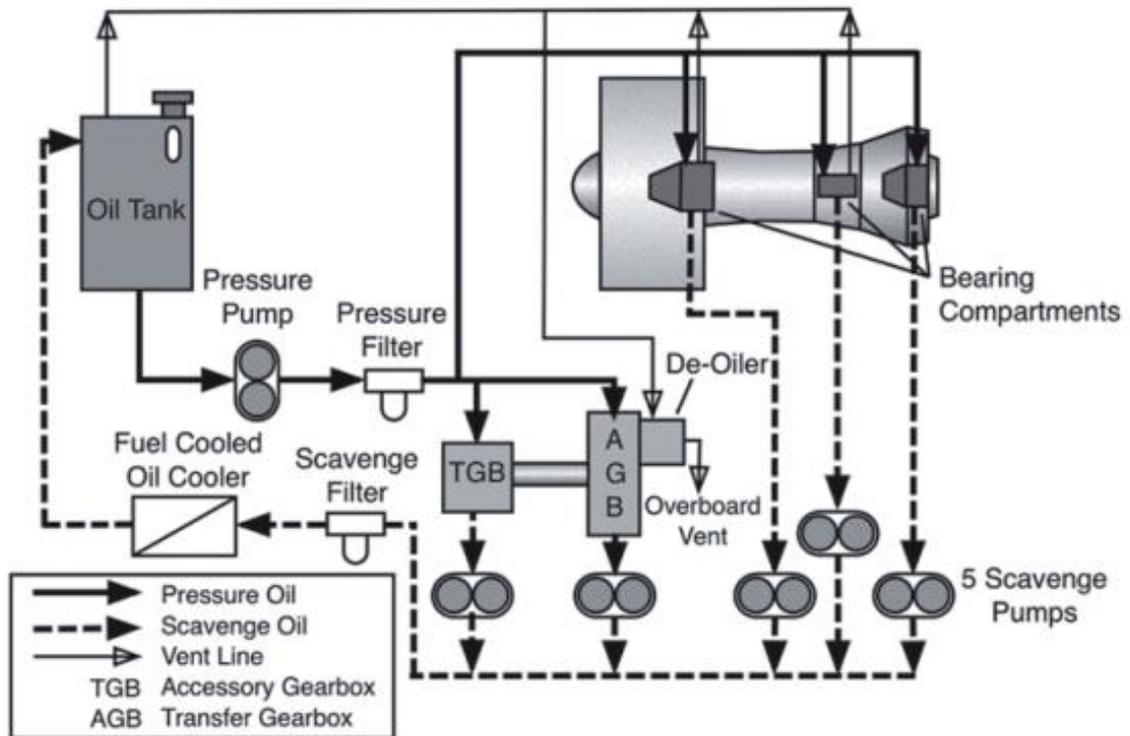


Abb.3-13: Aufbau eines Schmierstoffsystems [Diesinger2014, S.53]

Bild 3-13 zeigt den Aufbau eines Schmierstoffsystems. Das Schmierstoffsystem bestehe aus einem Öltank, einer **Druckpumpe** für den Schmierstofftransport, einer Ölkühlung, einem Filter, einem Verteiler und Mengenregler, der Hauptrohrleitung zwischen Pumpe und Verteiler und der Schmierstellenleitung zwischen dem Verteiler und den Schmierstellen.

❖ Pumpen

- In Schmierstoffsystemen werden Zahnradpumpen oder Kolbenpumpen verwendet. Die Zahnradpumpen sind entweder mit zwei nebeneinander angeordneten Wellen (siehe Abb.3-14) oder als Zahnringpumpe mit koaxial angeordneten Zahnrädern (siehe Abb.3-15) ausgeführt.

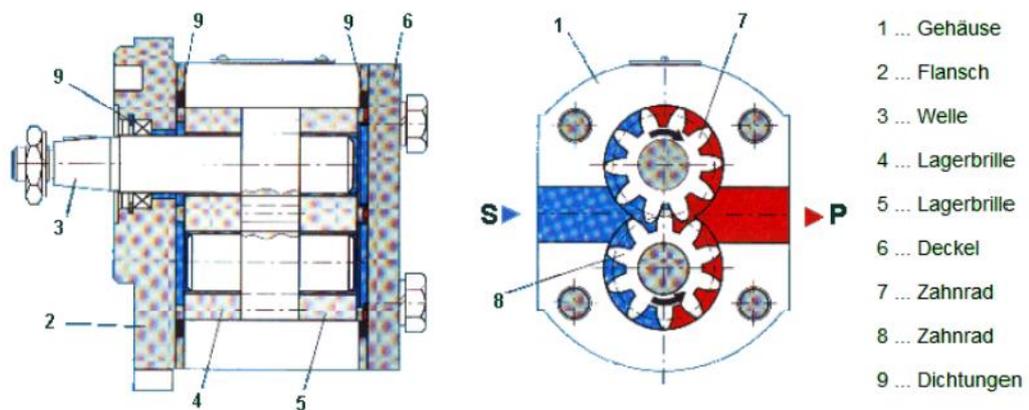


Abb.3-14: Aufbau einer Außenzahnradpumpe [Winkler2016, S.18]

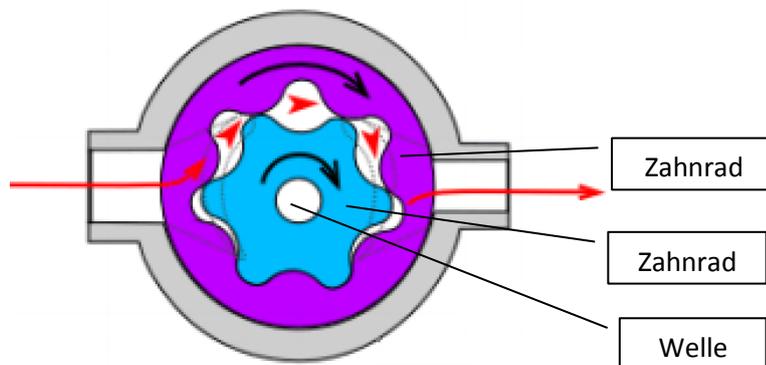


Abb.3-15: Aufbau einer Zahnringpumpe [Winkler2016, S.18]

Es kommen elektrische, hydraulisch oder pneumatisch betätigte Zahnradpumpen zum Einsatz. Üblicherweise wird in einem Schmierstoffsystem eine Druckpumpe verwendet und pro Lagersumpf ist eine Rückölpumpe vorhanden. [Diesinger2014, S.53-59] [WeckM1991, S.614-623]

3.1.6 Absaugsystem

Das Absaugsystem dient zur Absaugung von Grob- und Feinstaub, Rauch sowie KSS-Nebel und -dämpfe, die bei der spanenden Bearbeitung unter Einsatz von

Kühlschmierstoffen entstehen. Der Staub und KSS-Nebel werden durch das Absaugsystem abgesaugt, gefiltert und abgeschieden. Die Luftbewegung in einen Bearbeitungsraum muss stets gerichtet sein und nicht umgekehrt. Das Absaugsystem besteht aus Rohrsystem, Filtereinheit und **zentralen Vakuumerzeuger**.

❖ Absaugventilator

- Der Absaugventilator ist eine fremd angetriebene Strömungsmaschine. Er dient zur Erzeugung eines konstant hohen Luftvolumenstroms. Bild 3-16 zeigt den Aufbau von einem Hochdruckventilator. Durch kontinuierliche Rotation des Laufrads erzeugt er eine Druckdifferenz zwischen Ansaug- und Druckseite.



Abb.3-16: Aufbau eines Hochdruckventilators [ESTA2017]

Die Absaugleistung ist vom Aufbau der Werkzeugmaschine und Bearbeitungsverfahren abhängig. Nach folgender Formel kann man die benötigte Absaugleistung ausrechnen und den passende Absaugventilator auswählen.

$$\text{Absaugleistung (m}^3/\text{h)} = \text{Luftwechselrate (h}^{-1}\text{)} \times \text{Arbeitsraum (m}^3\text{)}$$

Die Luftwechselrate ist das Verhältnis zwischen dem Volumen der beim Lüften ausgetauschten Luft und dem Volumen des gelüfteten Raumes. In der Formel wird der Luftwechselrate innerhalb des Arbeitsraumes von 100 bis 300 h⁻¹ empfohlen, d.h. das 100- bis 300-fache Raumvolumen wird in einer Stunde ausgetauscht. [Rocker2010, S.301-304]

3.1.7 Zusatzeinrichtungen

❖ Späneförderer

- Ein Späneförderer ist eine Zusatzeinrichtung für die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine mit großen Produktivität. Er dient dazu, die Späne aus dem Arbeitsraum in ein Spänecontainer abzutransportieren und gleichzeitig vom Kühlschmierstoff zu trennen. Je nach der Spanform, dem zeitlichen Späneaufkommen und der anfallenden Menge an Kühlschmierstoff werden unterschiedliche Förderer, z.B. Scharnierbandförderer, Kratzerbandförder, Magnetbandförderer und Schneckenförderer, eingesetzt. [WeckM1991, S.604-606]

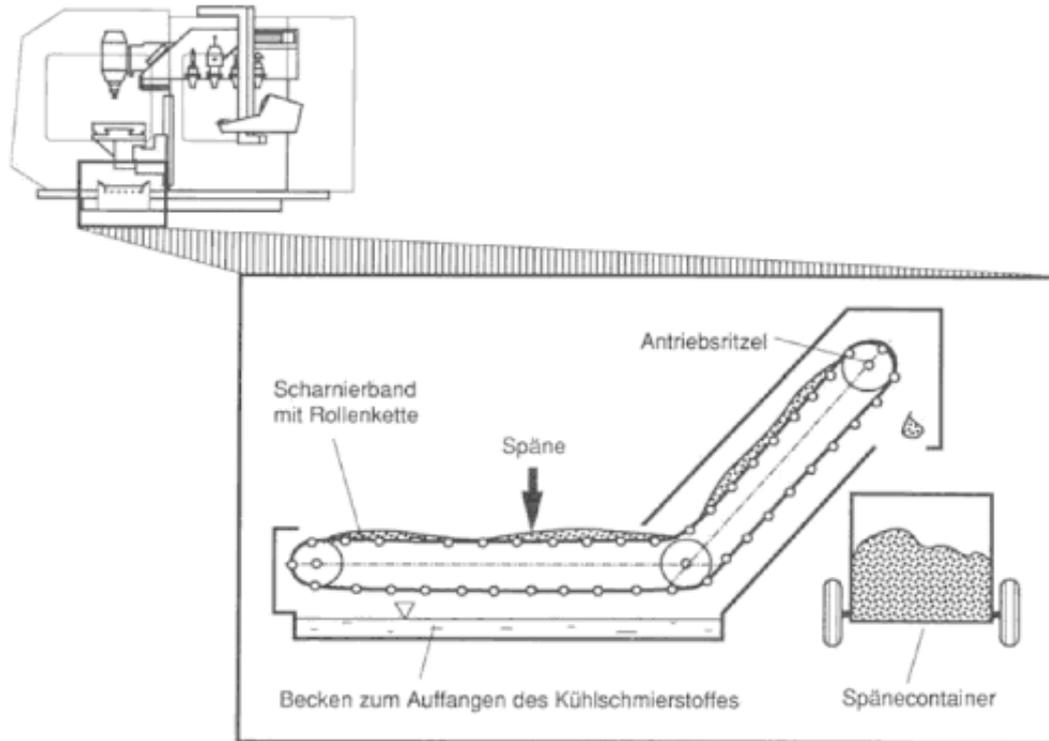


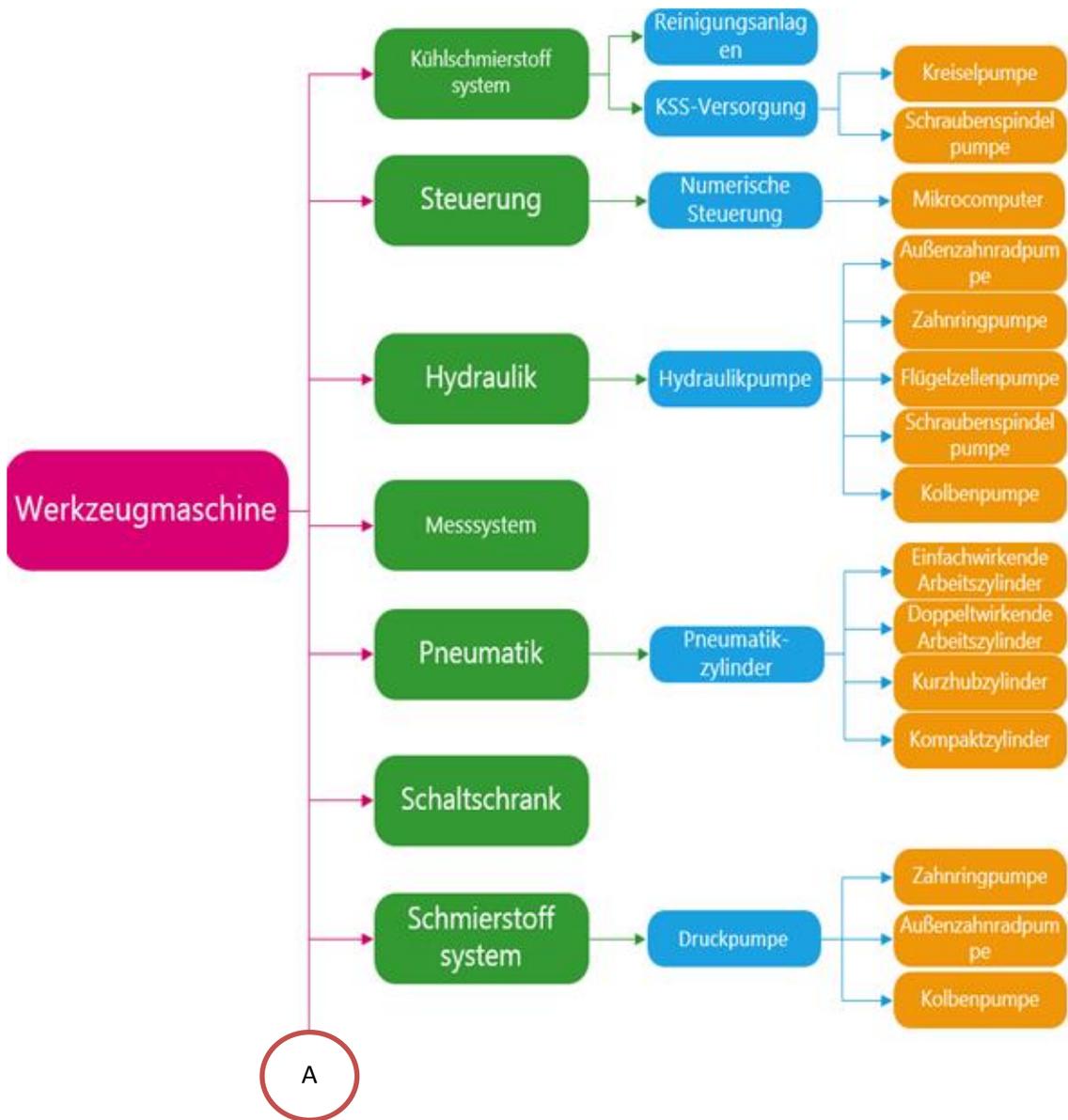
Abb.3-17: Scharnierbandförderer mit Kühlmittelbehälter [WeckM1991, S.604]

Bild 3-17 zeigt einen Scharnierbandförderer. Er ist die am weitesten verbreitete Bauform im Werkzeugmaschinenbau. Der Transport der Späne erfolgt über ein Scharnierband, welches durch einen **Drehstrommotor** angetrieben wird. Die Leistung vom Motor hängt von der Förderaufgabe ab.

3.2 Komponentenbaum für WZM

Die Abb.3-18 zeigt den Komponentenbaum für die allgemeine Werkzeugmaschine. Dieser Komponentenbaum besteht aus 4 Ebenen. Die grüne Ebene zeigt die Hauptbaugruppen von einer WZM. Eine Werkzeugmaschine besteht aus Kühlschmierstoffsystem, Schaltschrank, Steuerung, Schmierstoffsystem, Antrieb, Absaugung, Kühlsystem und Zusatzeinrichtung. Die blaue Ebene zeigt die Komponenten bzw. energetischen Verbraucher von einer Baugruppe. Die gelbe

Ebene zeigt die Varianten, die als energetischen Verbraucher eingesetzt werden kann.



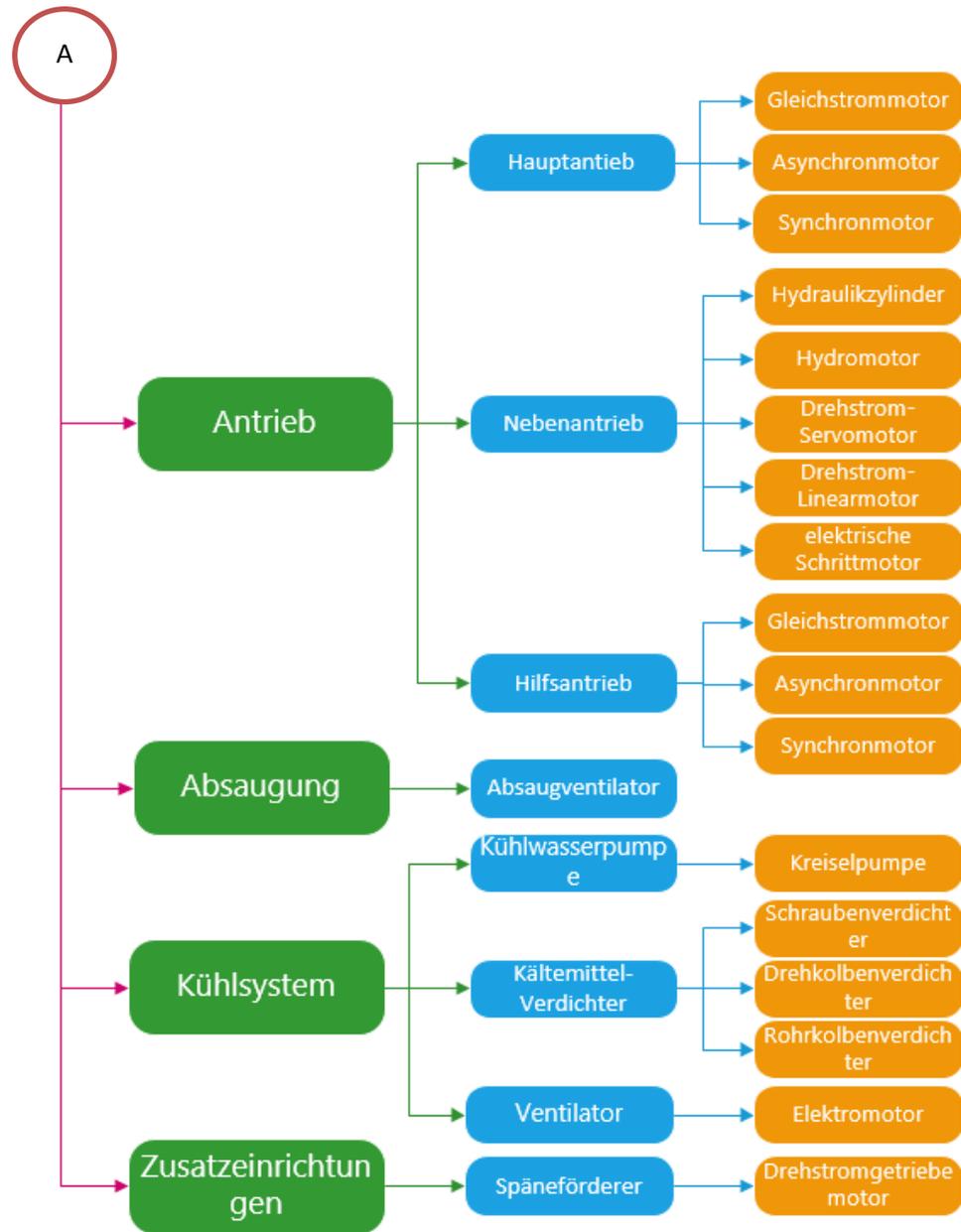


Abb.3-18: Komponentenbaum für allgemeine Werkzeugmaschine

3.3 Betriebszustände von WZM / Drehmaschine

Beim Produktionsprozess ist der Energiebedarf einer Werkzeugmaschine vom Betriebszustand abhängig. Der Betriebszustand einer Werkzeugmaschine besitzt einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf einer Baugruppe bzw. einer gesamten Werkzeugmaschine. Zur späteren Bewertung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen ist die Kenntnis der Betriebszustände erforderlich.

Die Betriebszustände einer Drehmaschine werden in 4 wesentliche Betriebszustände unterteilt, welche den Energiebedarf beeinflussen:

- ❖ Hauptschalter Aus
 - Alle energetischen Verbraucher sind ausgeschaltet.
- ❖ Hauptschalter Ein
 - Schaltschrank, Anzeige und Beleuchtung eingeschaltet.
- ❖ Betriebsbereit
 - Maschine ist betriebsbereit. Maschinesteuerung, Hydraulik, Pneumatik und Hilfsantriebe sind teilweise eingeschaltet. Haupt- und Nebenantriebe, KSS-System, Absaugung, Schmierstoffsystem sowie Kühlsystem stehen noch still.
- ❖ In Betrieb
 - Maschine im Bearbeitungsprogramm, Haupt- und Nebenantriebe arbeiten unter Zerspanungslast. KSS-System, Schmierstoffsystem, Kühlsystem, Absaugung und Zusatzeinrichtungen sind nach Bedarf eingeschaltet. [Eisele2014, S.13]

Dieser Betriebszustand wird bei Drehmaschine wieder in 7 Betriebszustände unterteilt:

- Leerlauf
- Leerlauf mit KSS
- Eilgangfahrt
- Schlichten ohne KSS
- Schruppen ohne KSS
- Schlichten mit KSS
- Schruppen mit KSS

Im folgenden Kapitel werden die Energiebedarfe von allen Baugruppen einer Drehmaschine bei verschiedenen Betriebszustände untersucht.

4. Aufstellung eines allgemeinen Modells für Drehmaschinen

In diesem Kapitel werden die Energiebedarfsmodelle für Drehmaschinen aufgestellt. Dabei werden die in Kapitel 3.2 vorgestellten Komponentenmodelle und in Kapitel 3.3 vorgestellten Betriebszustände verwendet. Dieses Energiebedarfsmodell wird anschließend an der Beispielmachine CTX Alpha 500 angewendet. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und mit Messdaten verglichen, um das energetische Modell der CTX alpha 500 zu bewerten.

4.1 Modellbildung

„Ein Modell ist ein (vereinfachtes) Abbild eines realen Systems oder Problems (= Urbild). Erfolgt die Abbildung so, dass jedem Element bzw. jeder Beziehung zwischen Elementen des Urbildes ein Element bzw. eine Beziehung im Modell gegenübersteht und umgekehrt, so spricht man von einem isomorphen oder strukturgleichen Modell.“ [Wirt2017]

Mit der Analyse im Kapitel 3 ist es nun möglich, abhängig vom Betriebszustand den Energiebedarf der einzelnen Baugruppen einer Drehmaschine zu ermitteln. Dies wird maschinenspezifisch in eine Tabelle dargestellt, wo für jeden Betriebszustand, der Einschaltzustand und der Lastzustand der Baugruppe dargestellt ist.

Eine Übersicht vom Einschaltzustand aller Baugruppen ist in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Baugruppen einer Drehmaschine sind dunkelblau hinterlegt. Die energetisch hauptsächlich relevanten Baugruppen der Drehmaschine sind Kühlschmierstoffsystem, Schaltschrank, Steuerung, Schmierstoffsystem, Haupt- und Nebenantrieb, Absaugung, Kühlsystem und Zusatzeinrichtung (Späneförderer).

Der Betriebszustand einer Werkzeugmaschine besitzt einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf einer Baugruppen bzw. einer gesamten Werkzeugmaschine. Die verschiedenen Betriebszustände der Drehmaschine sind schon in Punkt 3.3 vorgestellt und werden in Tabelle 4-1 mit den Farben grün, gelb und orange hinterlegt.

Der Einschaltzustand der jeweiligen Baugruppen ist in dieser Tabelle farblich dargestellt (Rot = Baugruppe aktiv, Grün = Baugruppe inaktiv). Wegen der Bearbeitungsaufgabe gibt es, wie im Punkt 2.4.5 erwähnt, verschiedene Lastzustände von Baugruppen, d.h. bei „aktiv“ gibt es die 2 Möglichkeiten stationär und instationär. Bleibt der Leistungsbedarf einer Baugruppe innerhalb eines Betriebszustands konstant, ist diese Baugruppe in einem stationären Zustand, z.B. Schaltschrank, Beleuchtung, Messsystem und Absaugung. Ändert sich der Leistungsbedarf einer Baugruppe, ist diese Baugruppe in einem instationären Zustand, z.B. Haupt- und Vorschubantrieb. Die Leistungsänderung kann zyklisch oder variabel sein. Für solchen Baugruppen wird noch eine Bemerkung an entsprechender Stelle eingefügt (zyklisch, variabel). Alle roten Felder sollen mit Zahlenwert ausgefüllt werden, damit der gesamte Energiebedarf bei einem Betriebszustand ausgerechnet werden kann.

Der Leistungsbedarf von jeder Baugruppe wird entweder aus dem Handbuch der Maschine herausgesucht oder von einem Leistungsdiagramm der Baugruppe abgelesen. Der gesamte Energiebedarf ergibt sich dann aus der Addition der einzelnen Leistungsbedarfe der Baugruppen.

Durch die Erweiterung von Komponenten und Betriebszustände ist dieses Modell für alle Drehmaschinen bzw. Werkzeugmaschinen anwendbar.

Der gesamte Energiebedarf E einer Werkzeugmaschine wird aus dem Integral der zeitweiligen elektrischen Leistungsaufnahme aller in einer Werkzeugmaschine vorhandenen Baugruppen i über die Zeit berechnet:

$$E = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^i P_i(t) dt$$

Die elektrische Leistungsaufnahme einer Baugruppe ist, wie im Punkt 2.4.5 erwähnt, in der Regel zeitlich nicht immer konstant, sondern je nach Bearbeitungsprozess und Betriebszustand in stationäre und instationäre (variabel oder zyklisch) Zustände unterteilt. [Eisele2014, S.14]

4.2 Anwendung des energetischen Modells an CTX alpha 500

4.2.1 Referenzmaschine CTX alpha 500

Die Referenzmaschine DMG MORI CTX alpha 500 ist eine CNC-gesteuerte Universal Drehmaschine und wird hauptsächlich zur Herstellung von Drehteilen und Ausführung von Dreharbeiten, beispielsweise Außen- und Innendrehen, Konturdrehen sowie Bohr- und Gewindeschneidarbeiten, genutzt. Sie hat einen integrierten Hauptspindelmotor mit 14 kW Antriebsleistung und 192 Nm Drehmoment und einen Gegenspindelmotor mit 16,2 kW Antriebsleistung und 62 Nm Drehmoment. Auf dieser Drehmaschine kann ein Werkstück mit Durchmesser bis 240 mm und Länge bis 525 mm gefertigt werden. [DMGM2017]

4.2.2 Ausgewählter Betriebszustand für das Modell

Der ausgewählte Betriebszustand für das Modell ist „Schruppen mit KSS“. Das Schruppverfahren wird beim Drehen sehr häufig angewendet. Es ist eine grobe Vorbearbeitung des Werkstücks zur späteren Feinbearbeitung und hat die Aufgabe, das Werkstück innerhalb kurzer Zeit der Endform so weit wie möglich anzunähern. Das wird durch eine große Schnitttiefe realisiert. Wie in Tab.4-1 gezeigt sind allen Baugruppen bei diesem Betriebszustand rot hinterlegt, d.h. allen Baugruppen sind eingeschaltet und die Haupt- und Nebenantriebe sind vollbelastet. Die Leistungsbedarfe von Schaltschrank, Beleuchtung, Steuerung, Hydraulik, Pneumatik, Schmierstoffsystem, Kühlsystem, KSS-System, Hauptantrieb, Vorschubantrieb, Messsystem, Absaugung und Zusatzeinrichtungen müssen untersucht werden.

4.2.3 Ausgewählte Material-, Werkzeug- und Bearbeitungsparameter

Das ausgewählte Material C45 ist ein sehr häufig eingesetzter Vergütungsstahl. Der Stahl hat eine sehr hohe Zugfestigkeit, gute Zerspanbarkeit und eine hohe Dauerfestigkeit sowie Härte. Das angewendete Werkzeug ist die Wendeschneidplatte „CNMG 120404-PM“ der Firma Sandvik. Für Längsbearbeitung von C45 werden die Schnitttiefe mit 0,2 mm, der Vorschub mit 1,5 mm und die Schnittgeschwindigkeit von 210 m/min verwendet.

4.2.4 Energiebedarfsmodelle der Baugruppen

❖ Hydraulik

- Die Hydraulikpumpe der CTX alpha 500 ist die Eintauchpumpe **MTR 1-22/22 A-W-A-HUUV** vom Hersteller Grundfos. Die ist eine vertikale, mehrstufige Kreiselpumpe. Der erforderliche Volumenstrom der Pumpe ist 14 l/min. Die Leistungsänderung der Kreiselpumpe ist stationär. In Abbildung 4-1 ist die Leistungskennlinie der Hydraulikpumpe

abgebildet. Der Leistungsbedarf der Kreiselpumpe ist vom Volumenstrom Q abhängig und der Volumenstrom Q ist mit 14 l/min eingegeben. Dort kann man erkennen, dass der Leistungsbedarf (P_2) der Pumpe am Betriebspunkt (Volumenstrom $Q=14$ l/min) etwa **942,8 W** beträgt.

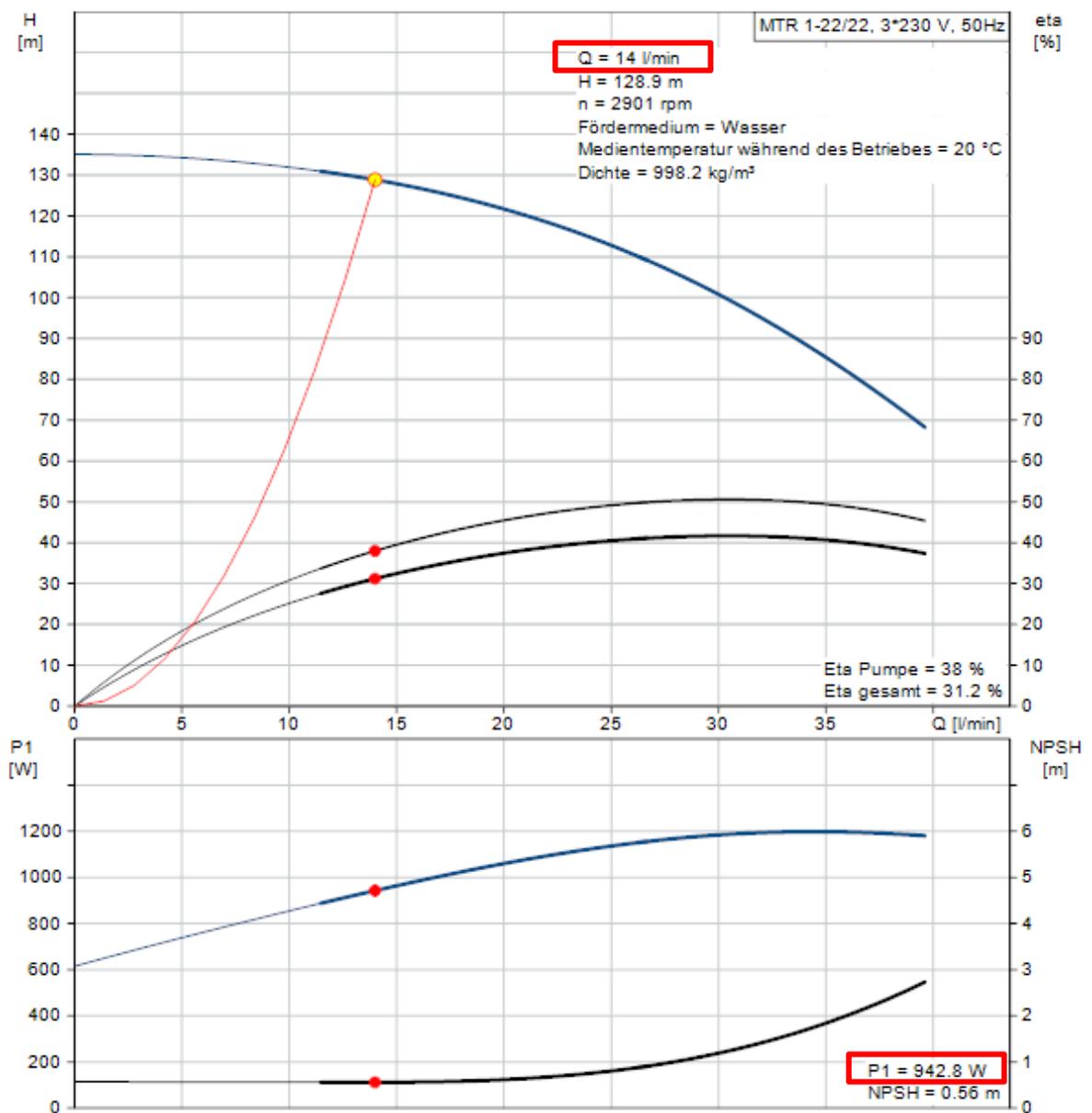


Abb. 4-1: Leistungskennlinie von Hydraulikpumpe [Grundfos2017]

❖ Schmierstoffsystem

- Das Schmierstoffsystem der CTX alpha ist als eine intermittierend betriebene Einleitungs-Zentralschmieranlage ausgeführt. Sie enthält eine Schmierstoffversorgung, einen Schmierstoffbehälter aus Kunststoff sowie den für die Druckentlastung und Druckbegrenzung erforderlichen Ventilatz. Die Schmierstoffversorgung dieser Anlage ist das Zahnradpumpe-Aggregat **MKF1-KW2-20036** vom Hersteller SINNTEC. Die Leistungsänderung des Zahnradpumpe-Aggregats ist stationär.

Technische Daten	
Zahnradpumpen-Aggregat	Niveauschalter
Förderstrom 50 Hz: 0,1 l/min 60 Hz: 0,12 l/min bezogen auf eine Betriebsviskosität von 140 mm ² /s bei einem Gegendruck = 5 bar	Funktion Öffnet bei zu niedrigem Füllstand (PNP)
Betriebsdruck 30 +1/-2 bar entspricht dem Istwert des eingebauten Druckbegrenzungsventils	Spannungsbereich . . . 10...36 V DC
Betriebstemperatur . . . +10 bis +40 °C	Dauerstrom max. 250 mA
Behälterinhalt nominal 1,8; 3 oder 6 l	Eigenstromaufnahme max. 20 mA
Behältermaterial Kunststoff	Druckschalter
Schutzart IP 54	Kontaktart Schließer
Frequenz/Spannung 50/60 Hz, 115 V AC oder 50/60 Hz, 230 V AC bei Bestellung bitte angeben	Schaltspannung, max. 42 V AC
Fördermedium Fließfett NLGI-Kl. 000, 00 Verträglich mit Kunststoffen, NBR-Elastomeren, Kupfer, Kupferlegierungen	Schaltstrom, max. 2,5 A (ohmsche Last)
Motor mit eingebautem Thermo- schalter	Kontaktbelastung, max. 30 VA ²⁾
Betriebsart S3, 20% (1,25 bis 25 min) Einschaltdauer ¹⁾	Schaltdruck 20 bar
Leistungsaufnahme ca. 50 Hz: 115W; 60 Hz: 140 W	
Drehzahl 50 Hz: 2600 min ⁻¹ ; 60 Hz: 3050 min ⁻¹ ;	

¹⁾ Die Einschaltdauer von 20% ist das Verhältnis zwischen der Pumpenlaufzeit und anschließender Stillstandszeit.
Beispiel:
1 Minute Pumpenlaufzeit erfordert mindestens 5 Minuten Stillstandszeit.
Die maximal zulässige Pumpenlaufzeit beträgt 3 Minuten.
Damit ergibt sich eine erforderliche Stillstandszeit von 15 Minuten

²⁾ Beim Schalten von induktiven Verbrauchern, Kontakte durch geeignete Maßnahmen schützen.

Abb. 4-2: Technische Daten von Zahnradpumpe-Aggregat [Sinntec2017]

Die Abbildung 4-2 zeigt die technische Daten von dem Zahnradpumpe-Aggregat. Die Leistungsaufnahme vom Motor beträgt bei 50 Hz etwa **115 W**.

❖ Kühlsystem

- Das Kühlsystem der CTX alpha ist als ein Flüssigkeitsluftkühlsystem **FLKS-170S*1700*50Hz** ausgeführt. Es besteht aus Umwälzpumpe,

Wärmetauscher, Lüfter sowie Kunststofftank. Die Umwälzpumpe befördert das gekühlte Wasser aus dem Kunststofftank durch das zu kühlende Bauteil. Dort nimmt das Betriebsmedium die Wärme auf und fließt zurück zum Wärmetauscher, wo es durch den Luftstrom des integrierten Lüfters wieder abgekühlt wird. [HYDAC2017]

2.11. ELEKTRISCHE DATEN

Bemessungsspannungsbereich:
380-420V 50HZ
440-480V 60HZ

Spannungstoleranzen nach
EN 60034-1 ±5%

Motornennstrom:
siehe Leistungsschild E-Motor

Motorleistung bei 50HZ:
Ausführung:

FLKS-170S	
Lüfter	4 pol. 0.37 KW
Pumpe	2 pol. 0.5 KW
FLKS-340S	
Lüfter	4 pol. 1.1 KW
Pumpe	2 pol. 0.5 KW
FLKS-340SL	
Lüfter	4/6 pol. 1.1/0.38 KW
Pumpe	2 pol. 0.5 KW

Abb. 4-3: Elektrische Daten von FLKS-170S [HYDAC2017]

Die Abbildung 4-3 zeigt die elektrische Daten von **FLKS-170S**. Die Leistungsaufnahme vom Lüfter beträgt **0,37 kW** und von der Pumpe beträgt **0,5 kW**. Der Leistungsbedarf des Kühlsystems beträgt **0,87 kW**.

4.2.5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Tabelle 4-2 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse der Baugruppen in dem ausgewählten Betriebszustand „Schruppen mit KSS“. Zudem sind die Messergebnisse der Leistungsaufnahme von einer studentischen Arbeit und die Abweichungen der Ergebnisse gegenüber dem Messergebnis aufgeführt.

Baugruppen	Ergebnisse		Abweichungen gegenüber Messung	
	Modell [W]	Messung [W]	Absolut [W]	Relativ [%]
Hydraulik	942,8	942,4	0,4	0,42
Lüfter	370	285,3	84,7	29,69
Schmierstoffsystem	115	/	/	/
Kühlsystem	870	/	/	/
KSS-Pumpe	/	1002,3	/	/
Gesamtmaschine	/	4447,9	/	/

Tab.4-2: Übersicht der Ergebnisse

Wie aus der Tabelle zu erkennen ist, liegt die Abweichung der modellierten Leistungsaufnahme der Hydraulik bei 0,42% und des Lüfters bei 29,69%.

Wegen fehlenden Daten konnten die Leistungsbedarfe der anderen Baugruppen sowie der Gesamtleistungsbedarf der Drehmaschine in dieser Arbeit leider nicht ermittelt werden. Aber mit dem im Abschnitt 4-1 entwickelten Modell und den vollständigen Daten der Werkzeugmaschine ist der Leistungsbedarf von jeder Baugruppe sowie der Gesamtleistungsbedarf der Werkzeugmaschine ermittelbar.

5. Fazit und Ausblick

5.1 Fazit

Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführten Untersuchungen konnten erste Erkenntnisse zum Forschungsprojekt „Entwicklung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle sowie Qualifizierungskonzepte für die ressourceneffiziente Fertigung hochbeanspruchter Bauteile“ (MoQuaRT) liefern.

Mit Hilfe der im Kapitel 3.2 entwickelten Komponentenmodelle für die allgemeine Werkzeugmaschine konnte der Energiebedarf einzelner Baugruppen einer Werkzeugmaschine untersucht werden. Damit ist es möglich, den Gesamtenergiebedarf der Werkzeugmaschine zu bewerten.

Durch die Modellbildung im Kapitel 4 und die Zusammenfassung der Baugruppen sowie der Betriebszustände in einer Tabelle, wird die Untersuchung des Energiebedarfs der einzelnen Baugruppen sowie der Gesamtwerkzeugmaschine unter verschiedenen Betriebszustände erheblich vereinfacht.

5.2 Ausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse können zusammengefasst und für die Weiterentwicklung der Werkzeugmaschinen bzw. die Optimierung des Fertigungsprozesses verwendet werden.

Die Untersuchung des Gesamtenergiebedarfs eines spezifischen Bearbeitungsprozesses bzw. einer Bearbeitungsaufgabe kann durch Weiterentwicklung des Modells realisiert werden. Durch diese Weiterentwicklung des Modells und der Berücksichtigung der jeweiligen Bearbeitungszeit ist es möglich, den Gesamtenergiebedarf eines zu fertigenden Bauteils vorherzusagen. Dadurch kann der Fertigungsprozess optimiert und die Herstellkosten gesenkt werden. Das Modell kann auch von Maschinenhersteller im Entwicklungsprozess der Maschine genutzt werden.

6. Zusammenfassung

Werkzeugmaschinen weisen ein hohes Potenzial zur wirtschaftlichen Steigerung ihrer Energieeffizienz auf. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Modell entwickelt, das den Energiebedarf einzelner Baugruppen bzw. der Gesamtmaschine bewerten kann.

Im Zuge des Kapitel 2 wurden alle für die Aufgabestellung relevanten Grundlagen von Fertigungsverfahren, Werkzeugmaschinen und Energie im Fabrikbetrieb zusammengefasst beschrieben. Insbesondere wurden der allgemeine Aufbau und die Arbeitsweise von Drehmaschinen und Drehbearbeitungszentrum vorgestellt. Anschließend wurden die beiden Maschinenarten verglichen und die Unterschiede dargestellt. Danach wurden die Begriffe wie Energieformen, Energieumwandlungen, energetische Verbraucher sowie elektrische Antriebe im Bereich Werkzeugmaschine erklärt. Vorteile und Nachteile von verschiedenen elektrischen Antrieben wurden dabei beschrieben.

Die komponentenorientierte Analyse von Werkzeugmaschine wurde im Kapitel 3 durchgeführt. Zunächst wurden alle Komponenten von einer Werkzeugmaschine analysiert. Danach wurde ein Komponentenbaum für die allgemeine Werkzeugmaschine dargestellt. Mit Hilfe des Komponentenbaums kann der Energiebedarf einzelner Baugruppen von Werkzeugmaschine untersucht werden. Abschließend wurden die Betriebszustände von Werkzeugmaschine bzw. Drehmaschinen analysiert.

Im vorletzten Kapitel wurde das allgemeine Energiebedarfsmodell für Drehmaschinen aufgestellt. Danach wurden die Rahmenbedingungen für das energetische Modell untersucht. Dieses Energiebedarfsmodell wurde anschließend an der Beispielmachine CTX alpha 500 angewendet. Abschließend wurden die Ergebnisse zusammengefasst und mit Messdaten verglichen, um das energetische Modell der CTX alpha 500 zu bewerten.

Das Fazit wurde am letzten Kapitel nach der Bewertung angeschlossen. Ein Ausblick wurde für eine mögliche weitere Entwicklung an dem Thema vorgestellt.

Literaturverzeichnis

- [Biln2010] Bibliographisches Institut GmbH: *Gleichstrommotor*, URL:<
[https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/arti-
kel/gleichstrommotor](https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/gleichstrommotor)> 2010
- [Bund2012] Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Energieeffiziente Kühlsysteme für Werkzeugmaschinen*, URL:
<<http://www.perpendo.de/files/wtonline-5-2012.pdf>>, 2012
- [Bund2017] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: *Stromverbrauch in Deutschland nach Verbrauchergruppen 2016*, URL:<[https://www.bdew.de/internet.nsf/id/F20AF6EFB29AC5BDC1257A610047087D/\\$file/Nettostromverbrauch%20nach%20Verbrauchergruppen%202016_online_o_jaehrlich_Ki_03032017.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/F20AF6EFB29AC5BDC1257A610047087D/$file/Nettostromverbrauch%20nach%20Verbrauchergruppen%202016_online_o_jaehrlich_Ki_03032017.pdf)>, 02.2017
- [Böge2015] Alfred Böge, Wolfgang Böge: *Handbuch Maschinenbau-Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, Springer Vieweg, Braunschweig, 2015
- [Diesinger2014] Andreas Linke-Diesinger: *Systeme von Turbofan-Triebwerken-Funktionen der Triebwerkssysteme von Verkehrsflugzeugen*, Springer Vieweg, Hamburg, 2014
- [DIN 69651] Deutsches Institut für Normung 69651

- [DMGM2017] DMG MORI Global Marketing GmbH: CTX alpha 500, URL:<<http://de.dmgmori.com/produkte/drehmaschinen/uni-versal-drehmaschinen/ctx/ctx-alpha-500>>, 2017
- [DMMO2017] DMG MORI Global Marketing GmbH: CTX beta 800 TC, URL:< <http://de.dmgmori.com/produkte/drehmaschinen/turn-mill-komplettbearbeitungszentren/ctx-tc/ctx-beta-800-tc#Intro>>, 2017
- [Eisele2014] Dipl.-Ing. Christian Eisele: *Simulationsgestützte Optimierung des elektrischen Energiebedarfs spanender Werkzeugmaschinen*, Dissertation TU Darmstadt, Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2014
- [ESTA2017] ESTA Apparatebau GmbH: *Hochdruckventilator HDV*, URL:<<https://www.esta.com/de/produkte/zentrale-absaug-anlagen/hdv/>>, 2017
- [Fach1998] www.fachwissenmetall.com. URL:<<https://www.fachwissenmetall.com/zerspanung/aufbau-einer-drehmaschine/>>
- [Fichtner2009] Fichtner, Nikolai: *Industrie/Gewerbe, Handel, Dienstleistungen*. URL: < <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/energieeffizienz/indriegewerbe-handel-dienstleistungen/>>, 01.08.2009
- [Fleischer1983] Gerd Fleischer (Hrsg): *Grundlagen zu Reibung und Verschleiß*, Dt. Verlag d. Grundstoffindustrie, 1983
- [Goy2016] Simon Goy: *Stand-by-Betrieb von Maschinen und Anlagen*, Kassel University press, Kassel, 2016

- [Grin2017] Grindaix GmbH: *Effiziente Auslegung Ihres KSS-Kreislaufs*, URL:< http://www.kss-filtration.de/pflichtenheft_fuer_filtrationsanlagen_erstellen.html >, 2017
- [Grundfos2017] Grundfos GmbH: *Leistungskennlinie von MTR 1-22/22 A-W-A-HUUV*, URL:< <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?lang=DEU&productnumber=96514885&productrange=gps&qcid=270511187>>, 2017
- [Hirsch2000] Andreas Hirsch: *Werkzeugmaschinen Grundlagen-Lehr- und Übungsbuch*, Vieweg, Braunschweig, 2000
- [HYDAC2017] HYDAC INTERNATIONAL GmbH: *Flüssigkeits-Luft-Kühlsysteme FLKS*, URL:< http://www.volkerbeitz.de/uploads/d5603-0-05-02_flks.pdf>, 2017
- [Jürgen2016] Dispan Jürgen: *Werkzeugmaschinen Strukturwandel und strategische Herausforderungen*, IG Metall, Frankfurt a.M., 11.2016
- [Kremser1997] Andreas Kremser: *Grundzüge elektrischer Maschinen und Antriebe*, B.G. Teubner Stuttgart, Stuttgart, 1997
- [Kremser2008] Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremser: *Elektrische Maschinen und Antriebe*, B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- [Kuhrke2011] Benjamin Kuhrke: *Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen*, epubli GmbH, Darmstadt, 2011

- [König2011] König, Caroline: *Die Klimapolitik der Bundesregierung*. URL: < http://www.bundesregierung.de/statisch/klimakonferenz/nn_930090/Webs/Breg/un-klimakonferenz/Content/StatischeSeiten/klimapolitik-der-bundesregierung_page-2.html >, 01.11.2011
- [Langbein2012] Dr. Rolf Langbein: *Verbrauch auf Bedarf reduziert*, URL:< <http://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/verbrauch-auf-bedarf-reduziert/#slider-intro-2>>, 2012
- [Masc2017] Maschinenbau-Wissen.de: *Mechanische Leistung berechnen*, URL:< <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinetik/305-leistung>>, 2017
- [Paul2014] Steffen Paul, Reinhold Paul: *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1*, Springer Vieweg, Bremen, 2014
- [Perovic2006] Prof. Dr.-Ing. Bozina Perovic: *Handbuch Werkzeugmaschinen*, Hanser, Berlin, 2006
- [Polo2007] Polo Filter-Technik: *Im Duett vereint: Späneförderer und Filteranlage*, URL:< <http://mav.industrie.de/allgemein/im-duett-vereint-spaenefoerderer-und-filteranlage/#slider-intro-3>>, 2007
- [Rebhan2002] Prof. Dr.-Ing. Eckhard Rebhan: *Energiehandbuch*, Springer, Düsseldorf, 2002
- [Rocker2010] Michael Rocker: *Kompendium Kühlschmierstoffe Normen, Richtlinien und Regelwerke*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010

- [Roswando-
wicz2015] Roswandowicz, Holger: *Wie die Energieeffizienz in Gewerbe und Industrie erhöht werden kann*. URL: < <http://www.hr-energiemanagement.de/single-post/2015/10/25/Wie-die-Energieeffizienz-in-Gewerbe-und-Industrie-erh%C3%B6ht-werden-kann>>, 25.10.2015
- [Schabbach,Wes-
selak2012] Thomas Schabbach, Viktor Wesselak: *Energie - Die Zukunft wird Erneuerbar*, Springer Vielweg, Nordhausen, 2012
- [Sinntec2017] Sinntec Schmiersysteme GmbH: Einleitungspumpen, URL:<<https://www.schmieranlagen.com/skf-einleitungspumpe-mkf1.html?MODsid=34fddefc03940e05634ec000a8cab0c3>>, 2017
- [Stat2016] Statistisches Bundesamt: *Produktion von Werkzeugmaschinen nach Maschinengruppe in Deutschland im Jahr 2015 (in Millionen Euro)*, 06.2016
- [Stiftung2017] Joachim Herz Stiftung: *Energieformen*, URL:<<https://www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/energieformen>>, 2017
- [Tele2017] Teleos-web.de: *Antriebe mit Asynchronmotor*, URL:<<http://home.teleos-web.de/vsteinkamp/antriebe/asynchronmotor/asynchronmotor.htm>>, 2017
- [Tschätsch2003] Prof. Dr.-Ing. E. h. Heinz Tschätsch: *Werkzeugmaschinen*, Hanser, Köln, 2003
- [Watter2015] Holger Watter: *Hydraulik und Pneumatik-Grundlagen und Übungen-Anwendungen und Simulation*, Springer Vielweg, Flensburg, 2015

- [Weck1991] Prof. Dr.-Ing. Manfred Weck: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme Band 1*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991
- [WeckM1991] Prof. Dr.-Ing. Manfred Weck: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme Band 2*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991
- [Weck,Brecher2005] Manfred Weck, Christian Brecher: *Werkzeugmaschinen 1 Maschinenarten und Anwendungsbereiche*, 2005
- [Winkler2016] Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Winkler: *Vorlesungsfolien zur Lehrveranstaltung Hydraulik/Pneumatik im Bachelorstudengang Maschinenbau*, Springer Vieweg, Aachen, 2016
- [Wirt2017] Wirtschaftslexikon24.com: *Modell*, < <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/modell/modell.htm> >, 2017
- [Wißuwa2016] Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa: *Vorlesungsfolien zur Lehrveranstaltung CNC-Programmierung im Bachelorstudiengang Maschinenbau*, Mittweida, 2016
- [Wtec2017] w-tech: *Elektrische Motoren*, URL:< http://www.servotechnik.de/fachwissen/motoren/f_beitr_00_309.htm >, 2017
- [Zahoransky2009] Richard A. Zahoransky: *Energietechnik-Systeme zur Energieumwandlung*, Springer Vieweg, Offenburg, 2009

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 27.09.2017

Chao Qin