



Werner Bahmann

Werkzeugmaschinen kompakt

Baugruppen, Einsatz und Trends

21. Auflage

 Springer Vieweg

Werkzeugmaschinen kompakt

Werner Bahmann

Werkzeugmaschinen kompakt

Baugruppen, Einsatz und Trends

21., überarbeitete Auflage

 Springer Vieweg

Prof. Dr.-Ing. Werner Bahmann
Pesterwitz, Deutschland

Dem Text dieses Buches liegt das Kapitel 0 im Handbuch Maschinenbau 2013 zugrunde.

ISBN 978-3-658-03747-5
DOI 10.1007/978-3-658-03748-2

ISBN 978-3-658-03748-2 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Thomas Zipsner | Imke Zander

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Dieses Fachbuch vermittelt als Leitfaden Kenntnisse über Aufbau, Funktion und Einsatz von Werkzeugmaschinen in der Ingenieur- und Techniker Ausbildung. Aber auch dem Praktiker werden wertvolle Hinweise für deren Anwendung in der metallverarbeitenden Industrie gegeben.

Ein besonderes Ziel des Buches ist es, die Trends in der Metallbearbeitung und die Gestaltung der dazu benötigten Maschinen den Lesern nahezubringen.

Ausgangspunkt ist die Beschreibung der Zielfunktionen, welche die Grundlage für eine neu zu entwickelnde Werkzeugmaschine bilden. Der Schwerpunkt des Buches ist auf die Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise der Baugruppen der Werkzeugmaschine unter Sicht des technischen Fortschritts gerichtet. Außerdem ist der Automatisierung der Werkzeugmaschine und ihres wichtigsten Gebietes, der CNC-Steuerungs- und Antriebstechnik, ein eigenes Kapitel gewidmet.

Es wird auch auf die Entwicklung der spanenden Werkzeugmaschine zum Komplettbearbeitungszentrum in den vergangenen zwei Jahrzehnten eingegangen. Dabei werden die Innovationen in der Baugruppen- und Zulieferindustrie, die diesen für die Produktivität und Arbeitsgenauigkeit bedeutsamen Trend ermöglichen. Deshalb findet auch die klassische Aufteilung der Werkzeugmaschinen nach den Fertigungsverfahren (Drehen, Fräsen etc.) keine Anwendung.

Analog ist das Kapitel „Umformende und schneidende Werkzeugmaschinen“ zu sehen. Dem großen Gebiet der Maschinen zur Herstellung von Verzahnungen wurde, seiner industriellen Bedeutung entsprechend, ein entsprechender Raum gegeben. Der Zunahme der Feinstbearbeitung in der metallverarbeitenden Industrie trägt das gleichnamige Kapitel Rechnung.

Der Dank gilt allen Unternehmen, die durch Bereitstellung von Bild- und Informationsmaterial das Buchvorhaben konstruktiv unterstützten.

Der Autor bedankt sich beim Lektorat Maschinenbau des Springer Vieweg Verlages, insbesondere bei Frau Imke Zander und Herrn Thomas Zipsner für die gute und engagierte Zusammenarbeit.

E-Mail-Adresse des Autors: w.bahmann@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
1 Grundlagen	1
1.1 Definition	1
1.2 Gebrauchswertparameter einer Werkzeugmaschine	1
1.2.1 Produktivität P	2
1.2.2 Arbeitsgenauigkeit/Maschinenfähigkeit	2
1.2.3 Flexibilität	3
1.2.4 Verfügbarkeit (Funktionsicherheit)	4
1.2.5 Spezifischer Energie-Werkzeug- und Hilfsstoffverbrauch	5
1.2.6 Arbeits- und Umweltschutz	5
1.2.7 Formgestaltung und Ergonomie	5
1.3 Kenngrößen und Kennlinien von Werkzeugmaschinen	6
1.3.1 Arbeitsbewegungen zur Erzeugung der Werkstückkontur (spanende Fertigung, DIN 8589)	6
1.3.2 Baureihen bei Werkzeugmaschinen	6
1.3.3 Geschwindigkeits- und Drehzahlbereiche	7
1.3.4 Auslegung von Drehmoment und Leistung als Funktion der Arbeitsspindeldrehzahl bei WZM	7
2 Baugruppen von Werkzeugmaschinen	9
2.1 Arbeitsspindeln (Hauptspindeln) und ihre Lagerungen	9
2.1.1 Anforderung an das System Arbeitsspindel – Lagerung	9
2.1.2 Lagerbauarten für Arbeitsspindeln	15
2.1.3 Anwendungsbeispiele des Systems Arbeitsspindel – Wälzlagerung mit Antriebskopplung	20
2.2 Hauptantriebe	26
2.2.1 Gleichförmig übersetzende Getriebe oder Antriebe	27
2.2.2 Gestufte mechanische Getriebe, gleichförmig übersetzend	28

2.2.3	Ungleichförmig übersetzende mechanische Getriebe	35
2.2.4	Elektrische Hauptantriebe	36
2.3	Vorschub- und Stellantriebe	42
2.3.1	Ausführungsvarianten von Vorschubantrieben	42
2.3.2	Gestufte mechanische Vorschubgetriebe	44
2.3.3	Schraubtriebe	49
2.3.4	Hydraulische (hydrostatische) Vorschubantriebe	57
2.4	Geradführungen an Werkzeugmaschinen	65
2.4.1	Grundlagen	65
2.4.2	Gleitführungen	66
2.4.3	Wälzführungen	73
2.4.4	Hydrostatische Führungen	82
2.4.5	Aerostatische Führungen	86
2.5	Gestelle von Werkzeugmaschinen	86
2.5.1	Aufgaben von Werkzeugmaschinengestellen	86
2.5.2	Gestellwerkstoffe	88
2.5.3	Auslegung und konstruktive Gestaltung von Werkzeugmaschinengestellen	90
2.6	Werkzeug- und Werkstückspanner	99
2.6.1	Werkzeugspannsysteme für rotierende Werkzeuge	99
2.6.2	Werkzeugspannsysteme für feste und angetriebene Werkzeuge	101
2.6.3	Werkstückspanner für rotierende Werkstücke	103
2.6.4	Werkstückspanneinrichtungen für feststehende Werkstücke	106
3	Steuerungs- und Automatisierungstechnik an Werkzeugmaschinen	109
3.1	Definitionen	109
3.2	Konventionelle Steuerungstechnik an Werkzeugmaschinen	110
3.2.1	Mechanisch gesteuerte Automaten	110
3.2.2	Programmsteuerungen	112
3.3	Numerische Steuerungen	114
3.3.1	Definition	114
3.3.2	Aufbau und Funktion von CNC-Steuerungen	115
3.4	Die numerische Achse	118
3.4.1	Grundforderungen	118
3.4.2	Der Regelkreis einer numerischen Achse	119
3.4.3	Wegmesssysteme zur Lageistwerterfassung	123
4	Entwicklung der Werkzeugmaschine zum Bearbeitungszentrum für die Komplettfertigung von Werkstücken	129
4.1	Weichbearbeitung von Teilen mit überwiegend runder Gestalt	130
4.1.1	Bearbeitung von Futterteilen	130
4.1.2	Wellenbearbeitung	135

4.2	Hartbearbeitung von Teilen mit überwiegend runder Gestalt	137
4.2.1	Hartbearbeitung von Futterteilen	137
4.2.2	Hartbearbeitung von wellenförmigen Teilen	142
4.3	Bearbeitung von Teilen mit prismatischer Gestalt	143
4.3.1	Mehrseiten-Bearbeitung prismatischer Teile	144
4.3.2	Fünf-Achsen-Bearbeitung	147
4.3.3	Höhere Flexibilität in der Großserienfertigung prismatischer Teile	149
4.4	Bearbeitung gehärteter prismatischer Teile	150
5	Werkzeugmaschinen zur Herstellung von Verzahnungen	151
5.1	Grundlagen der spanenden Verzahnungsherstellung	152
5.1.1	Wälzende Verfahren	152
5.1.2	Formverfahren	154
5.2	Verzahnmaschinen mit geometrisch bestimmten Schneiden zur Bearbeitung von Zylinderrädern und Zylinderschnecken	154
5.2.1	Wälz- und Formfräsmaschinen	154
5.2.2	Wälzstoßmaschinen	160
5.2.3	Schabemaschinen	163
5.3	Verzahnmaschinen mit geometrisch unbestimmten Schneiden zur Bearbeitung von Zylinderrädern und Zylinderschnecken	164
5.3.1	Wälzschleifmaschinen	164
5.3.2	Profilschleifmaschinen	166
5.3.3	Honmaschinen	168
5.4	Verzahnmaschinen zur Kegelradherstellung	169
5.4.1	Wälzfräsmaschinen	169
5.4.2	Wälzschleifmaschinen	171
6	Werkzeugmaschinen zur Feinstbearbeitung	173
6.1	Definition der Feinstbearbeitung	173
6.2	Spanende Feinstbearbeitungsmaschinen für Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide	175
6.2.1	Feindrehtmaschinen	175
6.2.2	Feinbohrmaschinen	176
6.3	Spanende Feinstbearbeitungsmaschinen für Werkzeuge mit geometrisch unbestimmter Schneide	176
6.3.1	Honmaschinen	176
6.3.2	Läppmaschinen	189
6.4	Umformende Feinstbearbeitungswerkzeuge	190
6.4.1	Werkzeuge zum Glattwalzen	191
6.4.2	Werkzeuge zum Hart-Glattwalzen	191

7 Umformende und schneidende Werkzeugmaschinen (Auswahl)	193
7.1 Maschineneinteilung.....	193
7.2 Werkzeugmaschinen zum Massivumformen	193
7.2.1 Pressen und Hämmer	193
7.2.2 Walzmaschinen zum Warm- oder Halbwarmumformen	199
7.2.3 Kaltwalzmaschinen	204
7.3 Werkzeugmaschinen zur Blechbearbeitung	206
7.3.1 Mechanische Pressen	206
7.3.2 Hydraulische Pressen	213
7.3.3 Stanz- und Laserschneidmaschinen	215
7.3.4 Biege- und Abkantmaschinen	221
 Weiterführende Literatur	 225
 Sachwortverzeichnis	 227

1.1 Definition

Die **Werkzeugmaschine** (*auch als Fertigungsmittel oder Fertigungseinrichtung bezeichnet*) dient der *Erzeugung von Werkstücken* mittels *Werkzeugen* entsprechend der gegebenen Fertigungsaufgabe.

Die *Werkzeugmaschine* gibt dem *Werkstoff* durch *urformende, umformende, trennende* und/oder *fügende Verfahren* die geforderte *geometrische Form* und *Oberflächengestalt* sowie die gewünschten *Abmessungen*.

Die Werkzeugmaschine hat sich heute zum *komplexen Fertigungssystem* mit meist hohem Automatisierungsgrad entwickelt. Sie ist vielgestaltig und komplex geworden. Dadurch ist die moderne, für die Anwendung progressiver Fertigungsverfahren geeignete Werkzeugmaschine einschließlich peripherer Einrichtungen, wie Speicher- und Handhabungstechnik für Werkstücke und Werkzeuge, Qualitätssicherungs- und Prozessüberwachungssysteme sowie Möglichkeiten zur Integration in flexible Fertigungssysteme ein Maßstab für den Stand der Produktionstechnik eines Unternehmens.

1.2 Gebrauchswertparameter einer Werkzeugmaschine

Die Gebrauchswertparameter einer Werkzeugmaschine unterliegen dem technischen Fortschritt und müssen sich mit jeder Neuentwicklung erheblich erhöhen, um den Anforderungen der Werkzeugmaschinenanwender gerecht zu werden.

Die wesentlichen Gebrauchswertparameter der WZM sind:

1.2.1 Produktivität P

Hauptfaktor des Gebrauchswertes bei vergleichbarer Arbeitsgenauigkeit zu vergleichbaren Erzeugnissen des Wettbewerbs. Es gilt:

$$P = \frac{W}{T \cdot A \cdot K} \quad (1.1)$$

Dabei ist

W Anzahl der erzeugten Werkstücke

T Zeiteinheit [Stunde (h), Kalendertag, Monat, Jahr]

A Bruttogrundfläche der WZM [m²]

K Anzahl Bedienerkräfte, bei Bedienung von vier Maschinen durch einen Bediener ist
 $K = 1 / 4$

Dabei ist die Grundproduktivität

$$P_G = \frac{W}{T} \quad (1.2)$$

$$\left. \frac{W}{1} \right| \left. \frac{T}{h} \right| \left. \frac{A}{m^2} \right| \left. \frac{K}{1} \right|$$

Sie wird für die erste Einschätzung des technischen Niveaus einer Werkzeugmaschine, z. B. im Vergleich zum Wettbewerb, herangezogen.

Werden längere Zeiteinheiten zugrunde gelegt, wie Monat oder Jahr, setzen vor allem Ausfälle die Produktivität P herab.

Die Bruttogrundfläche A ist die Fläche, welche zusätzlich zur Maschinengrundfläche benötigt wird, um Bedienbarkeit und Wartung zu ermöglichen sowie für erforderliche periphere Einrichtungen, wie Werkstückspeicher u. a.

Je weniger Arbeitskräfte zum Einrichten und Bedienen einer Fertigungseinrichtung benötigt werden, desto höher ist deren Produktivität.

Die Entwicklung einer neuen Werkzeugmaschinen-Generation ist dann besonders erfolgreich, wenn gegenüber der Vorgängergeneration die Produktivität P erheblich gesteigert werden kann. In Abb. 1.1 ist eine solche Entwicklung dargestellt. Es handelt sich um Schleifautomaten zur Bohrungsbearbeitung von gehärteten Wälzlager-Innenringen. Das Diagramm bezieht sich auf die Innenringe der Kugellagertypen 6206, also mit Bohrungsdurchmesser 30 mm.

Als Voraussetzung für eine hohe Produktivitätssteigerung mit einer neuen Erzeugnisentwicklung gilt der Grundsatz: Die Entwicklung von Fertigungsverfahren, Werkzeug, Werkzeugmaschine und Hilfsstoff ist eine Einheit.

1.2.2 Arbeitsgenauigkeit/Maschinenfähigkeit

Die Werkzeugmaschine muss dem Trend zur Erhöhung der Genauigkeitsanforderungen der metallverarbeitenden Industrie bei günstigen Kosten gerecht werden.

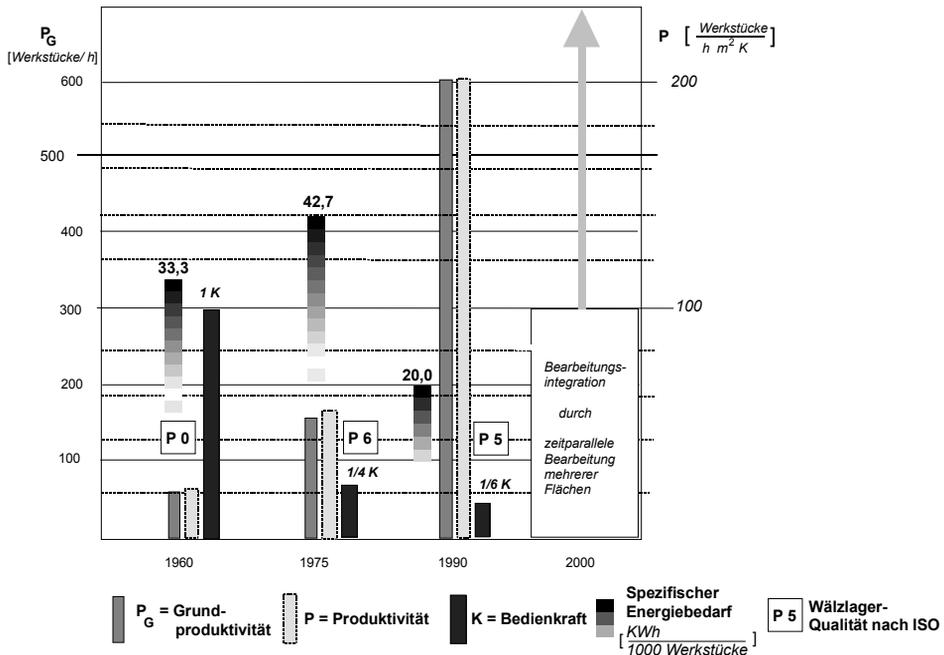


Abb. 1.1 Entwicklung verschiedener Gebrauchswertparameter bei drei Erzeugniskategorien von Wälzlager-Schleifautomaten. (Quelle: Berliner Werkzeugmaschinenfabrik GmbH)

Die wesentlichen, von der Werkzeugmaschine beeinflussbaren Genauigkeiten am Werkstück sind:

- *Durchmesser- und Längentoleranzen* beeinflussbar durch In- und Postprozessmessungen, hohe Achsverfahrensgenauigkeit, besonders bei NC-Maschinen
- *Rundheit* beeinflussbar durch Rundlaufgenauigkeit der Arbeits- oder Werkstückspindel
- *Geradheit* beeinflussbar durch Führungsgenauigkeit der Werkstück- oder Werkzeugschlitten
- *Welligkeit* beeinflussbar durch Reduzierung oder Vermeidung von Relativschwingungen zwischen Werkstück und Werkzeug
- *Oberflächenrauigkeit* beeinflussbar durch Reduzierung oder Vermeidung von Relativschwingungen zwischen Werkstück und Werkzeug

1.2.3 Flexibilität

Diese gewinnt bei vielen Anwendern auch unter den Bedingungen hoher Produktivität wie z. B. im Fahrzeugbau durch häufige Produktveränderung zunehmend an Bedeutung.

Hohe Flexibilität wird erreicht durch:

- kurze Rüst- und Umrüstzeiten, ermöglicht durch geeignete Konstruktion der beteiligten Baugruppen sowie teilweise automatisches Umrüsten in einer bedienerarmen dritten Schicht
- Werkzeugspeicher und flexible Werkzeugwechsler
- ablegbare und aus dem Speicher der Steuerung wieder abrufbare Technologien
- flexible Qualitätskontrollleinrichtungen

1.2.4 Verfügbarkeit (Funktionsicherheit)

Ziel: Eine Fertigungseinrichtung sollte ohne Ausfall in seiner „Lebenszeit“ ständig produzieren!

Die Dauerverfügbarkeit V_D wird aus folgender Beziehung ermittelt:

$$V_D = \frac{\bar{T}_B}{\bar{T}_B + \bar{T}_A} \cdot 100 \quad \frac{V_D}{\%} \left| \frac{\bar{T}_A}{h} \right| \frac{\bar{T}_B}{h} \quad (1.3)$$

Dabei sind:

$$\frac{\bar{T}_B}{h} = \frac{T_{B-akk}}{z} \quad \frac{\bar{T}_B}{h} \left| \frac{T_{B-akk}}{h} \right| \frac{z}{-} \quad \text{der mittlere Ausfallabstand,} \quad (1.4)$$

T_{B-akk} die akkumulierte Betriebsdauer in Stunden,

z die Anzahl von Ausfällen im Betrachtungszeitraum, (T_B entspricht dem Begriff MTBF [mean time between failures]),

$$\frac{\bar{T}_A}{h} = \frac{T_{A-akk}}{z} \quad \frac{\bar{T}_A}{h} \left| \frac{T_{A-akk}}{h} \right| \frac{z}{-} \quad \text{die mittlere Ausfalldauer,} \quad (1.5)$$

T_{A-akk} die akkumulierte Ausfalldauer in Stunden.

Der mittlere Ausfallabstand wird positiv beeinflusst durch:

- verschleißteilleose oder -arme Konstruktion (z. B. berührungslose Dichtungen, Zahnriemen anstelle von Keil- oder Flachriemen, berührungslose Näherungsinitiatoren anstelle mechanisch betätigter Endschalter, schleifringlose Motoren, elektronische Steuerungen, Stelltechnik und Leistungstransistoren anstelle Relais)
- technische Diagnostik
- Dauertests der Werkzeugmaschinen beim Hersteller

Die mittlere Ausfalldauer wird positiv beeinflusst durch:

- schnelle Erkennung und Behebung eines Ausfalls (z. B. Diagnoseeinrichtungen mit Klartextanzeige an der Steuerung, leichte Zugänglichkeit zur ausgefallenen Baugruppe, kompletter Baugruppenaustausch mit wenig Werkzeugen)

Zu beachten ist:

$$V_D = V_{D1} \cdot V_{D2} \cdot \dots \cdot V_{Dn} \quad \left. \frac{V_D}{h} \right| \left. \frac{V_{Dn}}{h} \right| \quad (1.6)$$

$V_{D1, \dots, n}$ Dauerverfügbarkeit jeweils einer Baugruppe

Das heißt: Bei einer Dauerverfügbarkeit von fünf Baugruppen von je 99 % liegt die Dauerverfügbarkeit der Werkzeugmaschine nur noch bei 95 %. Um eine hohe Verfügbarkeit von 97 bis 98 % zu erreichen, müssen eine Reihe von Baugruppen möglichst eine solche von 100 % aufweisen, so beispielsweise die Steuerungselektronik und elektronische Antriebe.

1.2.5 Spezifischer Energie-Werkzeug- und Hilfsstoffverbrauch

Dieser bezieht sich immer auf die Anzahl der in dieser Bezugszeit erzeugten Werkstücke!

So ergibt sich der spezifische Energieverbrauch P_{Sp} pro 1.000 erzeugter Werkstücke W zu:

$$P_{Sp} = \frac{P \cdot 1000}{W \cdot \frac{1}{h}} \quad \left. \frac{P_{Sp}}{\text{KW} / 1.000 \text{ Werkstücke}} \right| \left. \frac{P}{\text{KW}} \right| \quad (1.7)$$

Dabei ist P die Leistung in KW.

1.2.6 Arbeits- und Umweltschutz

Besonders zu beachten sind Absaugeinrichtungen für Kühlschmierstoff, Schallpegelreduzierung durch geschlossene Arbeitsräume, geräuscharme Antriebstechniken, strenge Einhaltung der Arbeitsschutzvorschriften.

1.2.7 Formgestaltung und Ergonomie

Ist nicht nur ein gutes Verkaufsargument, sondern bei Werkzeugmaschinen auch vorbeugend zum Schutz gegen Ermüdung und Herausforderung zu Sauberkeit und Ordnung am Arbeitsplatz.

Diesen *Gebrauchswerten* stehen die **Kosten und Aufwände** beim Werkzeugmaschinen-Hersteller gegenüber, die letztlich den **Preis** der Werkzeugmaschine und damit deren **Preis-Leistungs-Verhältnis** bestimmen.

1.3 Kenngrößen und Kennlinien von Werkzeugmaschinen

1.3.1 Arbeitsbewegungen zur Erzeugung der Werkstückkontur (spanende Fertigung, DIN 8589)

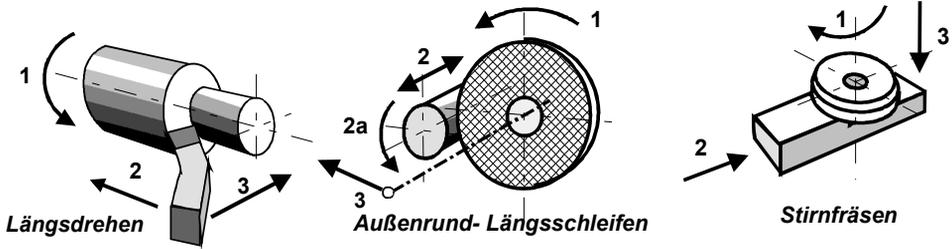


Abb. 1.2 Beispiele für Arbeitsbewegungen bei verschiedenen spanenden Fertigungsverfahren
1 Schnittbewegung, 2 Vorschubbewegung, 2a Rundvorschub, 3 Zu- oder Beistellbewegung

Durch die Werkzeugmaschine müssen die entsprechenden Arbeitsbewegungen mit den erforderlichen Kräften, Drehmomenten und Geschwindigkeiten realisiert werden.

1.3.2 Baureihen bei Werkzeugmaschinen

Entwicklungen von Werkzeugmaschinen-Baureihen sollten auf der Basis von Normzahlen nach DIN 323 (siehe Abschnitt Maschinenelemente) erfolgen.

Dabei werden für die einzelnen Maschinenarten Leitparameter ausgewählt. Deren Abstufung erfolgt nach einer Normreihe, deren Stufensprung jeweils die Baugrößenabstände bestimmt.

Tab. 1.1 Beispiele von Werkzeugmaschinen-Baureihen

Maschinenart	Bezeichnung	Leitparameter	Reihe
Leit- und Zugspindeldreh-Maschine	DLZ	Drehdurchmesser über Maschinenbett 400, 450, 500, 560, 630 mm	R 20
Koordinatenbohrmaschine	BK	Bohrbereich mm Durchmesser 16, 25, 40, 63	R 10
Einständerpresse	PE	Presskraft in kN 250, 400, 630, 1.000	R 5

Tabelle 1.1 zeigt eine relativ enge Abstufung des Leitparameters „Drehdurchmesser über Maschinenbett“ durch Anwendung der Normreihe R 20 mit dem Stufensprung $\varphi = 1,12$ bei einer Baureihe von Leit- und Zugspindeldrehmaschinen DLZ im Gegensatz zum Leitparameter „Presskraft in kN“ bei Einständerpressen PE mit dem Stufensprung $\varphi = 1,6$ und damit einer weiten Abstufung.

1.3.3 Geschwindigkeits- und Drehzahlbereiche

Schnittgeschwindigkeit v_C [m/min] wird bestimmt durch Werkstück- und Werkzeugwerkstoff, Schrupp- oder Fertigbearbeitung, Werkstück- und Werkzeugsteife und weitere Einflussfaktoren.

Die *Grenzdrehzahlen* der Werkstückspindel bestimmen sich aus:

$$\text{obere Grenzdrehzahl:} \quad \dots \text{ [1/min]} \quad (1.8)$$

$$\text{untere Grenzdrehzahl:} \quad n_{\min} = \frac{v_{C\min} \cdot 1000}{\pi \cdot d_{\max}} \text{ [1/min]} \quad (1.9)$$

$$\text{Drehzahlbereich:} \quad B_n = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1.10)$$

Dabei sind:

d_{\max} maximaler Bearbeitungsdurchmesser in mm

$v_{C\max}$ maximale Schnittgeschwindigkeit in m/min

d_{\min} minimaler Bearbeitungsdurchmesser in mm

$v_{C\min}$ minimale Schnittgeschwindigkeit in m/min

1.3.4 Auslegung von Drehmoment und Leistung als Funktion der Arbeitsspindeldrehzahl bei WZM

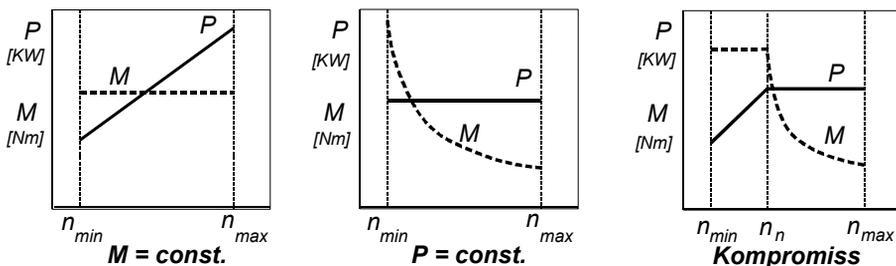


Abb. 1.3 Drei Auslegungsmöglichkeiten des Leistungs- und Drehmomentverhaltens von Arbeitsspindelantrieben

Die Auslegung mit *konstantem Drehmoment* (Abb. 1.3 links) wird bei *Schrupp- oder Schwerzerspanungsmaschinen* angewandt, da die Auslastung an der Belastungsgrenze im gesamten Drehzahlbereich möglich ist. Vorsicht vor Überlastung! Sollbruchstelle oder Leistungsmesser erforderlich. Mit *konstanter Leistung* im gesamten Drehzahlbereich (Abb. Mitte) werden *Feinbearbeitungsmaschinen* ausgelegt, da die Drehmomentspitze bei n_{\min} relativ gering ist. Bei den meisten Werkzeugmaschinen, besonders bei *Universalmaschinen*, ist der rechts abgebildete *Kompromiss* erforderlich.

2.1 Arbeitsspindeln (Hauptspindeln) und ihre Lagerungen

Haupt- oder Arbeitsspindeln dienen zur Realisierung der Drehbewegung als Komponente der Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug in Arbeitsrichtung, siehe auch Abb. 1.2.

Haupt- oder Arbeitsspindeln können in Abhängigkeit vom jeweiligen Fertigungsverfahren entweder *Werkstückspindeln* (z. B. bei Drehmaschinen, Rundschleifmaschinen, Drehfräsmaschinen u. a.) oder *Werkzeugspindeln* (z. B. bei Fräs- und Bohrbearbeitungszentren, Rund- und Flachsleifmaschinen u. a.) sein.

2.1.1 Anforderung an das System Arbeitsspindel – Lagerung

1. *Aufnahme der Spannmittel* für Werkstücke oder Werkzeuge in der Arbeitsspindel
2. *Stabiles Führen der Arbeitsspindel* auf einer in ihrer Lage vorgeschriebenen Drehachse unter Einwirkung von *Spannungs-, Antriebs- und Massenkräften*. Dabei darf die Lage der Arbeitsspindelachse zur Drehachse nur um kleinste zulässige Werte abweichen
3. *Sicherung der Leistungsübertragung* entsprechend des vorgegebenen *Drehzahlbereiches* und der erforderlichen *Drehmomente*

2.1.1.1 Aufnahmen für Werkstückspanner

Die Arbeits- oder Werkstückspindel ist mit einem Spindelkopf, Abb. 2.1, ausgebildet, der aus einem Kurzkegel zur Zentrierung und einem Flansch mit Planfläche hoher Ebenheit und Laufgenauigkeit besteht. Die Tolerierung der Flächen muss so gewählt werden, dass mit der Aufspannung des Futters die Planfläche und der Zentrierkegel zum Tragen kommen. Damit werden hohe Spanngenauigkeit und Steife erreicht.

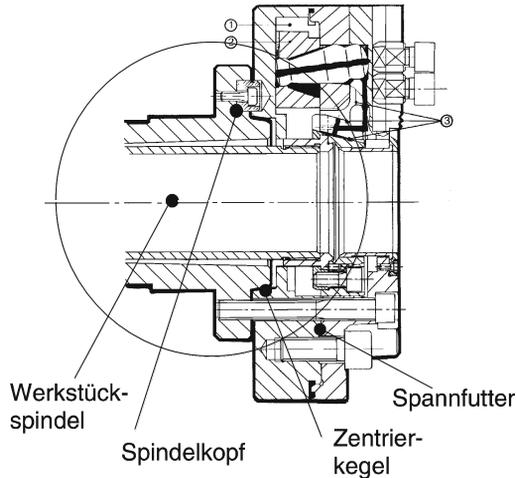


Abb. 2.1 Werkstückspindelkopf mit Kurzkegel und Plananlage nach DIN 55026 ... 55029 mit aufgespanntem Kraftspannfutter. (Quelle: Forkardt, Erkrath)

2.1.1.2 Aufnahmen für Werkzeugspanner

- *Steilkegel 7:24*
Steilkegelwerkzeuge werden in allen Bearbeitungszentren verwandt, wo ein automatischer Werkzeugwechsel installiert ist. Auch für manuellen Werkzeugwechsel mit Kraftspannung werden sie an Fräsmaschinen, Waagrecht-Bohr- und Fräswerken u. a. eingesetzt. Bei automatischem Werkzeugwechsel wird durch Anzugsbolzen und Zange der Schaft zentriert. Das Drehmoment wird über Mitnehmersteine übertragen, Abb. 2.2 und 2.3.
- *Metrischer (Kegelwinkel $1^{\circ}25'56''$) und Morse-Innenkegel ($1^{\circ}26'43'' \dots 1^{\circ}30'26''$) – selbsthemmend*
Nach DIN 228 insbesondere für Bohrmaschinen oder als Innenaufnahme an Drehmaschinen-Hauptspindeln.
- *Zylindrische Bohrung mit koaxialem Präzisionsgewinde* für die Schleifdornaufnahme an Innenschleifspindeln (ungenormt).
- *Steilkegel 1:5* für Schleifspindelköpfe von Außenrundscheifmaschinen.

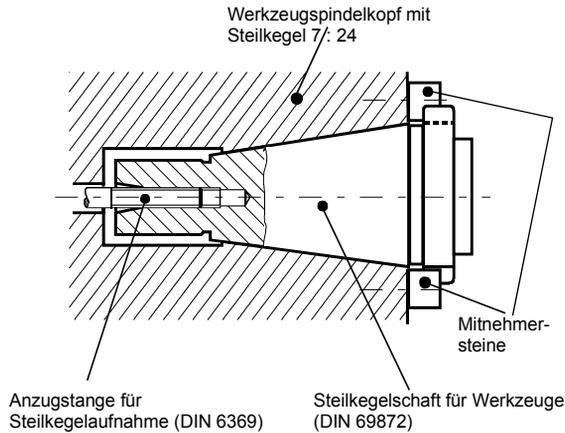


Abb. 2.2 Werkzeugspindelkopf mit Steilkegelschaft 7:24 für Werkzeuge nach DIN 69872/DIN 2080

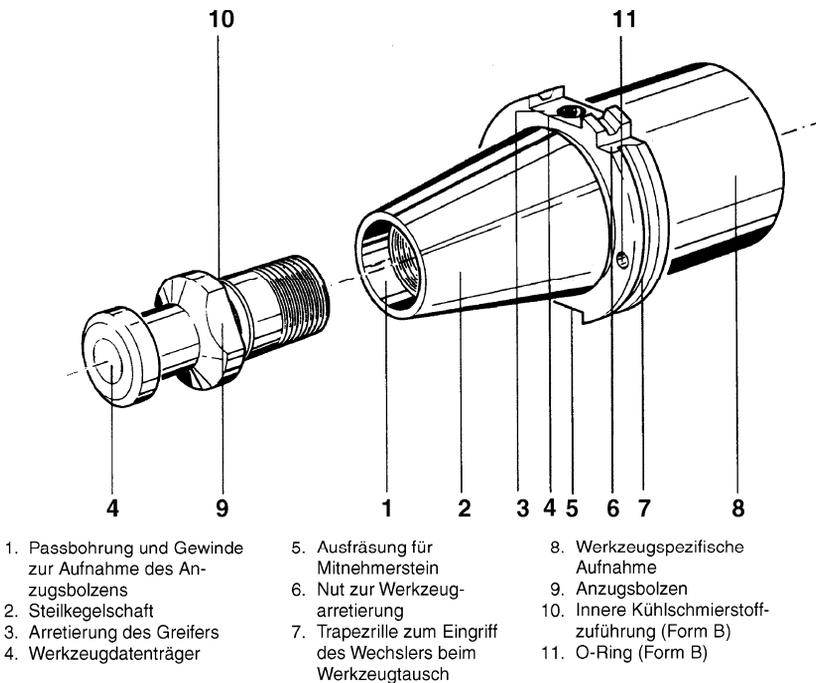


Abb. 2.3 Steilkegelschaft für Werkzeuge mit Steilkegel 7:24 für automatischen Werkzeugwechsel (DIN 69871). Die Trapezzille 7 ermöglicht die Betätigung durch einen Werkzeugwechsler. Ein Werkzeugdatenträger ermöglicht die Kennung des jeweiligen Werkzeuges für den Datenspeicher der CNC-Steuerung der WZM. (Quelle: Deckel, München)

2.1.1.3 Belastung der Arbeitsspindel und ihrer Lagerung

Diese ergibt sich aus den Bearbeitungskräften, den Antriebskräften, den Massenkräften, dem Gewicht der Werkstückspindel, des Spannmittels und des Werkstückes oder dem Gewicht der Werkzeugspindel, des Werkzeugträgers und des Werkzeuges.

In Abb. 2.4a und b sind die bei der Bearbeitung auftretenden Kräfte und Momente an einer Drehmaschinen-Werkstückspindel dargestellt.

Für eine *effektive Schrumpferspannung* ist erforderlich: Hohe *statische und dynamische Steife des Systems Arbeitsspindel – Lagerung* im gesamten Drehzahlbereich, um bei voller Auslastung der Antriebsleistung das Auftreten selbsterregter Schwingungen zu vermeiden.

Für eine ausreichend genaue *Schlicht- und Fertigbearbeitung* sind erforderlich geringste Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug in radialer und axialer Richtung durch:

- Hohe *statische Steife des Systems Arbeitsspindel-Lagerung* im gesamten Drehzahlbereich, um durch geringste Verformung (gemessen in N/ μm am Spindelkopf) eine hohe Maß- und Formgenauigkeit des Werkstückes zu erreichen.
- Hohe *dynamische Steife des Systems Arbeitsspindel-Lagerung einschließlich des Arbeitsspindelantriebs* im gesamten Drehzahlbereich, um durch geringe Relativschwingungen zwischen Werkstück und Werkzeug eine gute Welligkeit und Oberflächenrauigkeit bei der Fertigbearbeitung zu sichern.
- Hohe *Koaxialität* von Arbeitsspindelachse und Werkstückeinspannachse und *geringste Laufabweichungen* über die Gebrauchsdauer der WZM (10.000 ... 45.000 h) durch geeignete Konstruktion und hochgenaue Fertigung der Aufnahmeflächen.
- Geringe *Lagerreibung* und hohe *thermische Stabilität*.

Zukünftige Entwicklung Sie geht zu *höheren* Arbeitsspindel-Drehzahlen bei gleichzeitiger Erhöhung der Spanungsleistungen und der Arbeitsgenauigkeit durch Einsatz neuer Schneidstoffe, wie Schneidkeramik, kubisches Bornitrid (CBN), Hochgeschwindigkeitsfräsen und -schleifen.

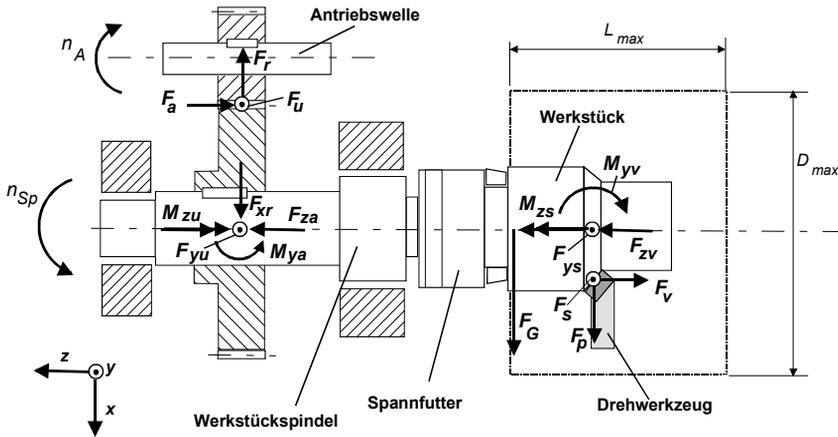


Abb. 2.4a Kräfte und Momente an der Werkstückspindel bei einer Drehmaschine

Belastungsart	Ursache	Belastungsart	Ursache
Radialkräfte F_{ys}, F_{yw} F_{xp}, F_{xp} $F_{G1} \dots F_{Gi}$	Schnittkraft F_s Passivkraft F_p Umfangskraft F_u Radialkraft F_r Eigengewicht F_G	Torsions- Momente M_{zs}, M_{zu}	Schnittkraft am Werk- stückradius Umfangskraft am Teilkreis- Radius Massenträgheitsmoment
Axialkräfte $F_{z\omega}, F_{zv}$	Vorschubkraft F_v Axialkraft F_ω	Biegemomente $M_{y\omega}, M_{yv}$	Vorschubkraft am Werk- stückradius Axialkraft am Teilkreisradius

Abb. 2.4b Beschreibung der Kräfte und Momente der Werkstückspindel in Abb. 2.4a

2.1.1.4 Art der Aufnahme des Systems Arbeitsspindel – Lagerung in der WZM-Gestellbaugruppe (Spindelkasten, Ständer)

In Abb. 2.5 sind verschiedene Möglichkeiten dargestellt:

1. Direkte Lagerung im Spindelkasten oder Ständer
Vorteil: kostengünstige Konstruktion
Nachteil: Herstellung sehr genauer Lageraufnahmeflächen nur schwer möglich
2. Lagerung in einer Spindelhülse
Vorteil: hohe Bearbeitungsgenauigkeit der Lageraufnahmeflächen durch Schleifen oder Innenfeindreihen in einer Aufspannung möglich
Nachteil: höherer Arbeits- und Kostenaufwand
3. Lagerung in axial verschiebbarer Spindelhülse
4. Spindel axial in den Lagern verschiebbar (bei Anwendung hydrostatischer Lager)

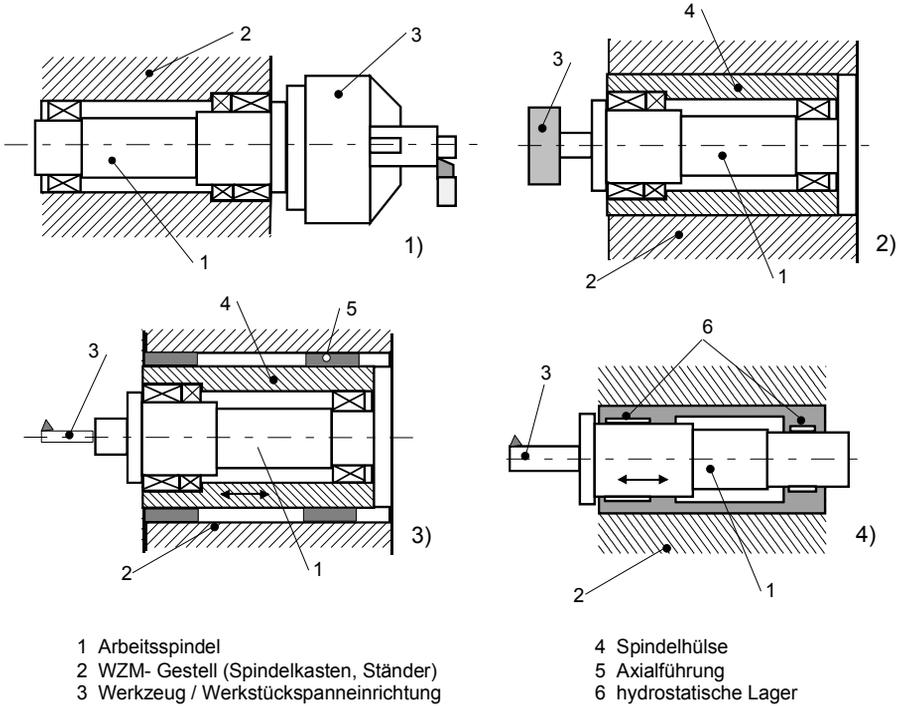


Abb. 2.5 Verschiedene Arten der Aufnahme des Systems Arbeitsspindel-Lagerung in der Gestellbaugruppe

2.1.1.5 Gestaltung und Dimensionierung von Arbeitsspindel und Lagerung

Bei der Auslegung des Systems Arbeitsspindel-Lagerung ist stets neben der Durchbiegung der Spindel auch die elastische Verformung der Lager mit in die Berechnung einzubeziehen, Abb. 2.6. Es ist:

$$\frac{y}{F} = \underbrace{\frac{a^3}{3EI_a} + \frac{a^2l}{3EI_l}}_{(y/F) \text{ der Spindel}} + \underbrace{\left(\frac{a+1}{l}\right)^2 \frac{1}{c_v} + \left(\frac{a}{l}\right)^2 \frac{1}{c_h}}_{(y/F) \text{ der Lagerung}} \quad (2.1)$$

Die Formel zeigt, dass die *Auskraglänge* a klein und die *Steife des vorderen Lagers* groß sein muss, um eine geringe Durchbiegung, bezogen auf die Spindelnase, oder eine hohe Steife zu erreichen.

Beim Lagerabstand l_{opt} tritt ein Durchbiegungsminimum oder ein Steifemaximum auf. In Abhängigkeit von den Spindel- und Lagerungsparametern gilt:

$$l_{opt} \approx 2 \dots (5) a \quad \left| \frac{l_{opt}}{\text{mm}} \right| \frac{a}{\text{mm}} \quad (2.2)$$

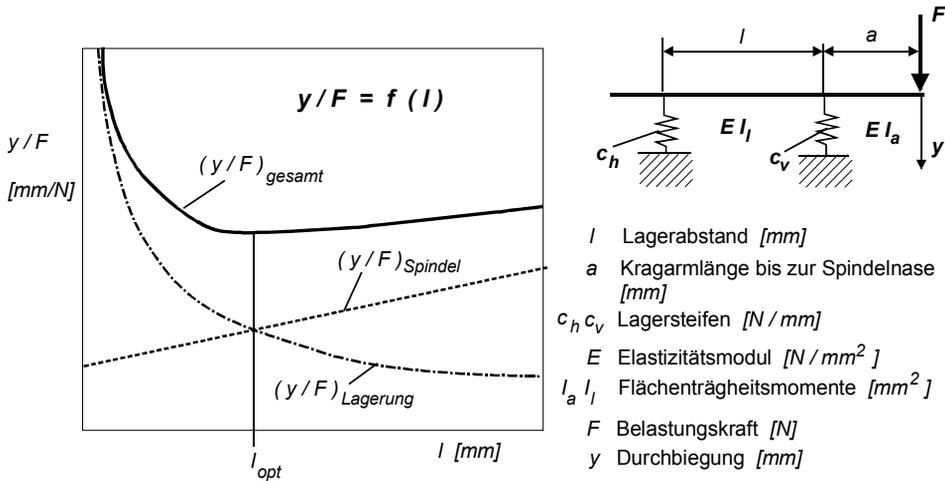


Abb. 2.6 Die bezogene Durchbiegung des Systems Arbeitsspindel-Lagerung als Funktion des Lagerabstandes

Als Werkstoffe für Arbeitsspindeln werden eingesetzt: C45E und C60E (DIN EN 10 083) sowie 16 Mn Cr 4 und 20 Mn Cr 5 (DIN EN 10 084).

2.1.2 Lagerbauarten für Arbeitsspindeln

2.1.2.1 Einflächengleitlager

Diese werden im WZM-Bau für Arbeitsspindeln heute kaum noch verwendet. Sie arbeiten im Mischreibungsbereich und genügen trotz guter Dämpfungseigenschaften nicht mehr den Anforderungen moderner Werkzeugmaschinen.

2.1.2.2 Mehrflächengleitlager

Arbeiten als hydrodynamische Lager mit guten Laufeigenschaften und hoher Belastbarkeit. Größter Nachteil dieser Lagerbauart ist die Auslegung nach einem Drehzahlwert. Da aber bei WZM fast immer die Forderung nach einem großem Drehzahlbereich besteht, sind sie in fast allen Anwendungsfällen ungeeignet. Dort, wo nur eine Arbeitsdrehzahl vorliegt, wie beispielsweise bei der Schleifspindellagerung von spitzenlosen Schleifmaschinen, finden sie noch Anwendung.

2.1.2.3 Hydrostatische Lager

Diese Lagerbauart wird in zunehmendem Maße verwendet bei Präzisionswerkzeugmaschinen, wie Feindreh- und -bohrmaschinen und wenn langsame Drehbewegungen gefordert werden, z. B. bei Werkstücktischen von Verzahnungsmaschinen sowie bei Großwerkzeugmaschinen.