

Aufbau und Eigenschaften von Werkzeugmaschinen

Prof. Dr.-Ing. D. Bergers / Prof. Dr.-Ing. F. Lobeck

Motivation

Der deutsche Werkzeugmaschinenbau gehört zu den fünf größten Einzelbranchen des Maschinen- und Anlagenbaus. Exportorientierung bestimmt das Geschäft. Es dominieren kleine und mittlere Unternehmen, die häufig auf ihren Spezialgebieten weltweit führend sind.

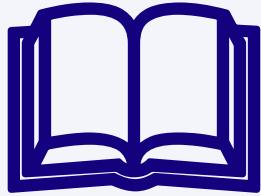
Die Werkzeugmaschinenindustrie nimmt eine Schlüsselstellung für die industrielle Fertigung ein. Alle Produkte vom Weltraumteleskop über Flugzeuge und Automobile bis hin zum Handy, der Spielzeugeisenbahn und dem künstlichen Hüftgelenk werden mittelbar oder unmittelbar auf Werkzeugmaschinen gefertigt. (VDMA)

Werkzeugmaschinen als Produktionsanlagen eingebunden in einem industriellen Produktionsprozess und Werkzeugmaschinen als „reine“ Produkte stellen einen großen wirtschaftlichen Faktor dar.

Ziel der Vorlesung:

Charakterisierung von Werkzeugmaschinen hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung. Anforderungen, Gestelle, etc.

Literaturhinweise



Bruins/Dräger

Werkzeuge und
Werkzeugmaschinen
2. Auflage, Carl Hanser Verlag

Charcut/Tschätsch

Werkzeugmaschinen
5. Auflage, Hanser Verlag

A. Hirsch

Werkzeugmaschinen
1. Auflage, Vieweg Verlag

B. Perović

Werkzeugmaschinen
1. Auflage, Vieweg Verlag

Prof. Reinhart

Spanende Werkzeugmaschinen
(Script zur Vorlesung 1999)

H. K. Tönshoff

Werkzeugmaschinen
1. Auflage, Springer Verlag

Prof. Uhlmann

Werkzeugmaschinen I / II
(Script zur Vorlesung WS 99/00)

M. Weck

Werkzeugmaschinen
Fertigungssysteme Band 2-3.2
4. Auflage, VDI Verlag

M. Weck – K. Teipel

Dynamisches Verhalten spanender
Werkzeugmaschinen
1. Auflage, Springer Verlag

H. Witte

Werkzeugmaschinen
3. Auflage, Vogel Verlag

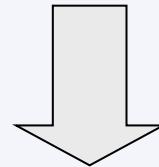
Einleitung

Das industrielle Produktionssystem

Industrielles Produktionssystem

Ziel:

Umwandlung von Rohmaterial oder Halbzeugen in Fertigteile oder Produkte, deren Funktionsstruktur durch die Bedürfnisse der Anwender und die Möglichkeiten der Erzeuger bestimmt wird, unter Einsatz vorhandener Produktionsressourcen.



Energietechnik

- Energieerzeugung
- Energieumformung
- Energieverteilung

Materialtechnik

Verfahrenstechnik

- Stofferzeugung
- Wandlung von physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften

Fertigungstechnik

- Formgebung von Bauteilen
- Montage zu gebrauchsfähigen Erzeugnissen

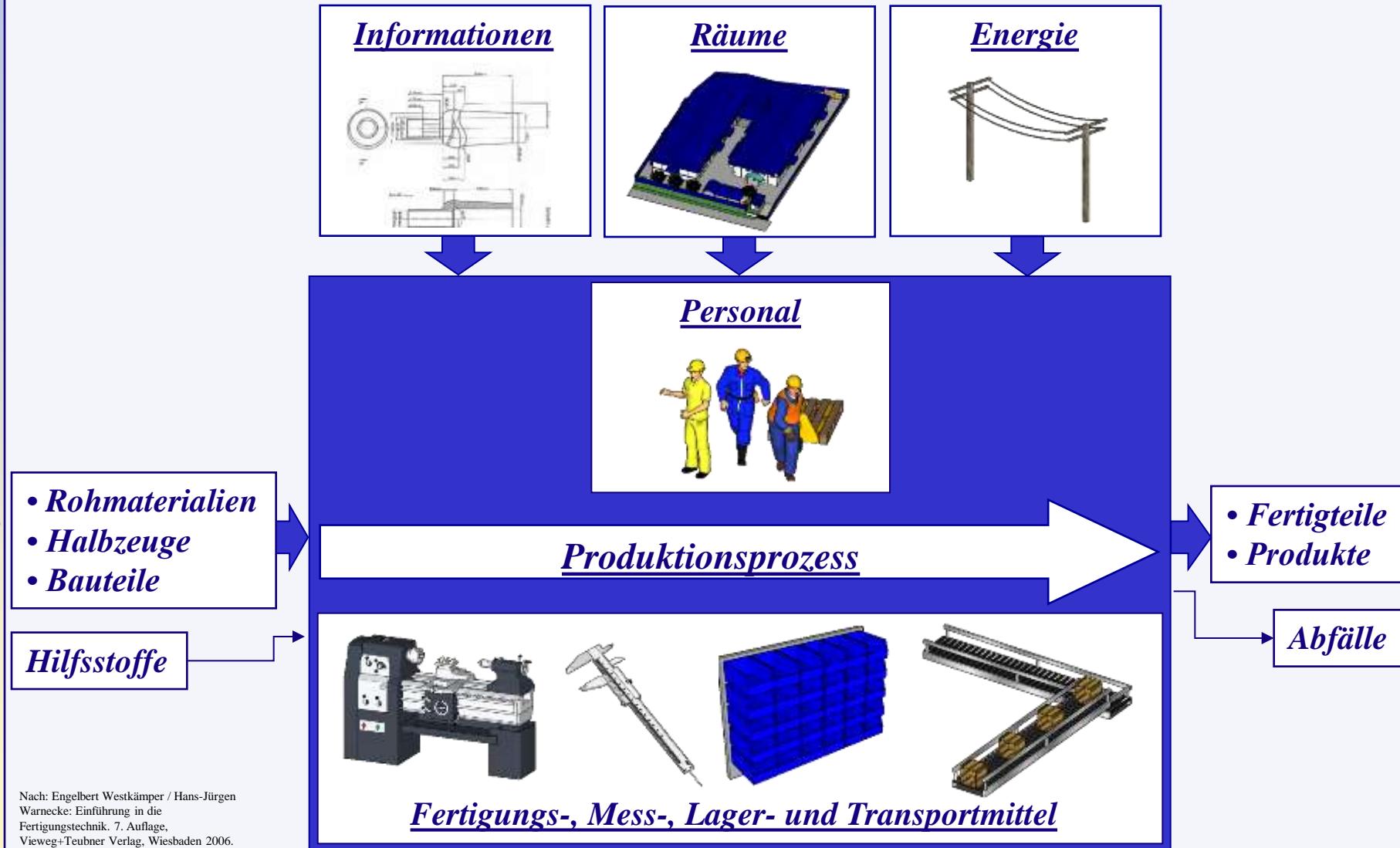
Fördertechnik

- Transport und Handhabung von Gütern unter zeitlicher und örtlicher Bestimmung

Informationstechnik

- Informationserstellung
- Informationsverarbeitung
- Informationsverteilung

Elemente eines Produktionssystems



Systematik der Fertigungstechnik und Einteilung der Fertigungsverfahren

Definition der Fertigungstechnik

Aufgabe der Fertigungstechnik ist das Wandeln eines Werkstück-Rohzustandes in einen Fertigzustand nach vorgegebenen technologie- und geometriebezogenen Informationen mit Hilfe von Wirkmedien (z.B. Werkzeug) unter Einsatz geeigneter Fertigungsmittel und -verfahren.

Fertigen

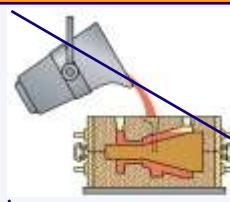
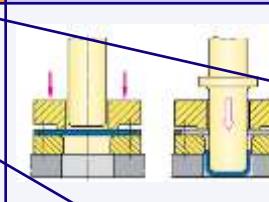
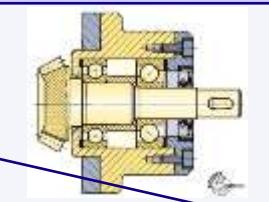
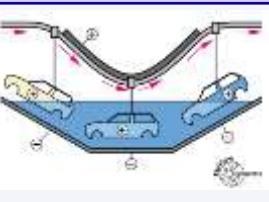
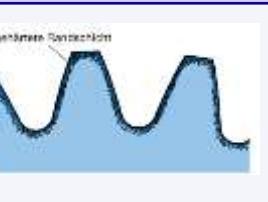
Fertigen ist das Erzeugen von Werkstücken geometrisch bestimmter Gestalt (*Grundbegriffe*: Maschine, Werkstück, Werkzeug). Die Fertigung läuft an der Wirkstelle zwischen Werkzeug und Werkstück ab. Energie und Formdefinition werden von der Maschine über das Werkzeug auf das Werkstück übertragen.

Einteilung der Fertigungsverfahren

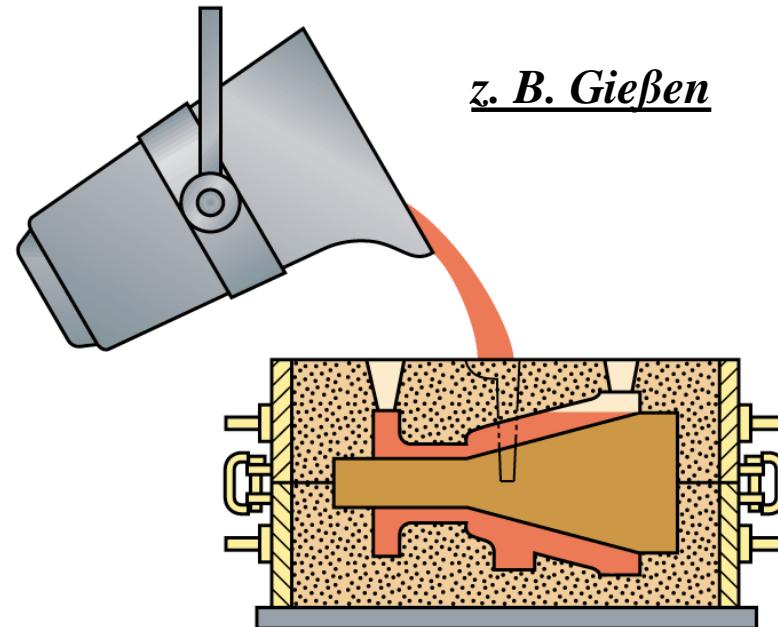
nach DIN 8580

Zusammenhalt Schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren
Hauptgruppe 1 Urformen Formschaffen	Hg 2: Umformen	Formändern Hg 3: Trennen Hg 4: Fügen	Hg 5: Beschichten
<p>Hg 6: Stoffeigenschaft ändern Umlagern Aussondern Einbringen</p> <p>von Stoffteilen</p>			

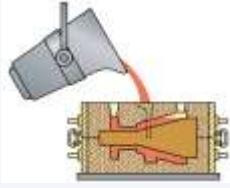
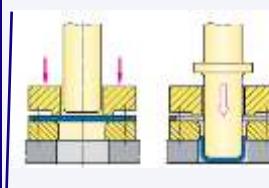
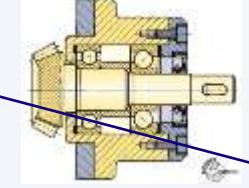
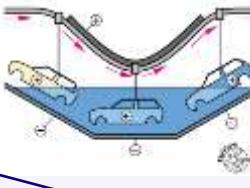
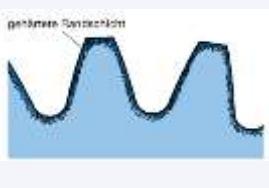
Gliederung der Fertigungsverfahren

1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					

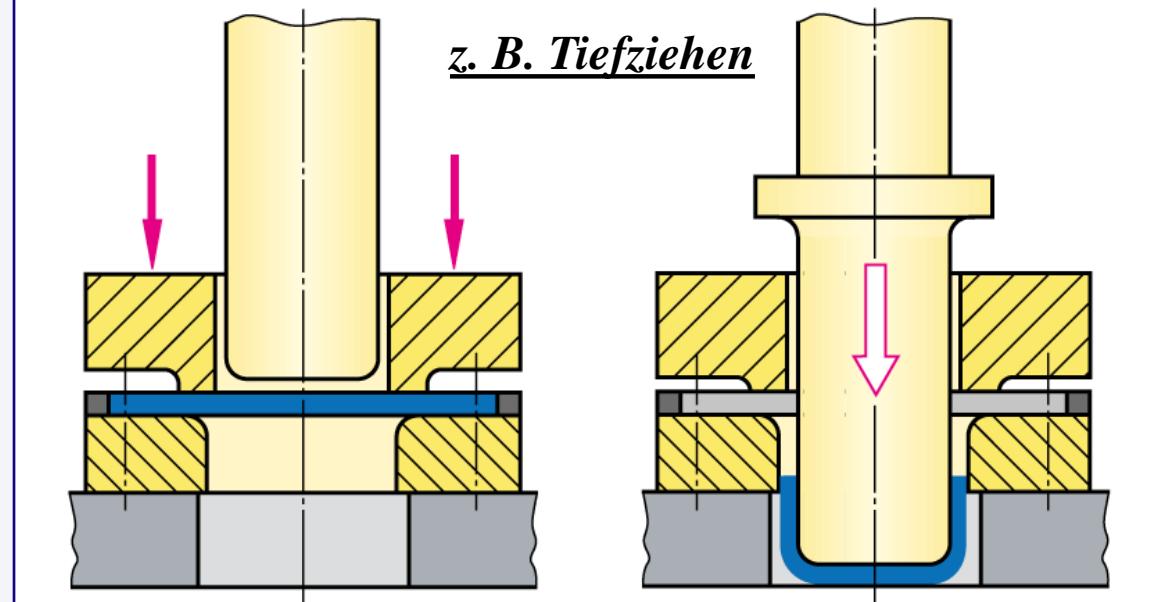
z. B. Gießen



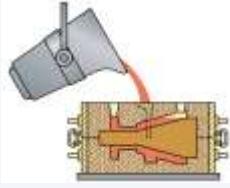
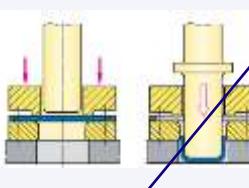
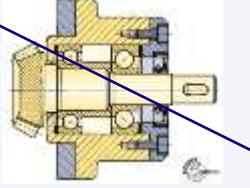
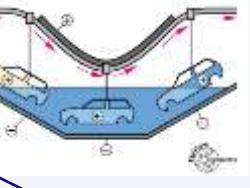
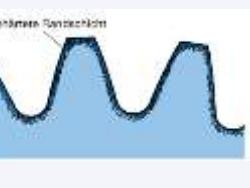
Gliederung der Fertigungsverfahren

1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					

z. B. Tiefziehen

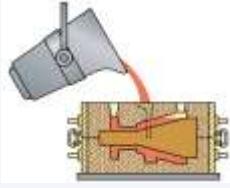
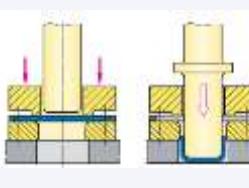
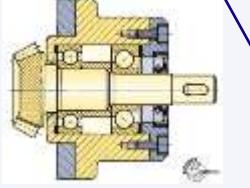
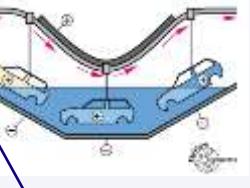
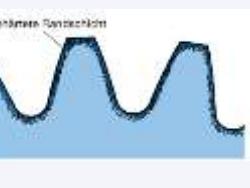


Gliederung der Fertigungsverfahren

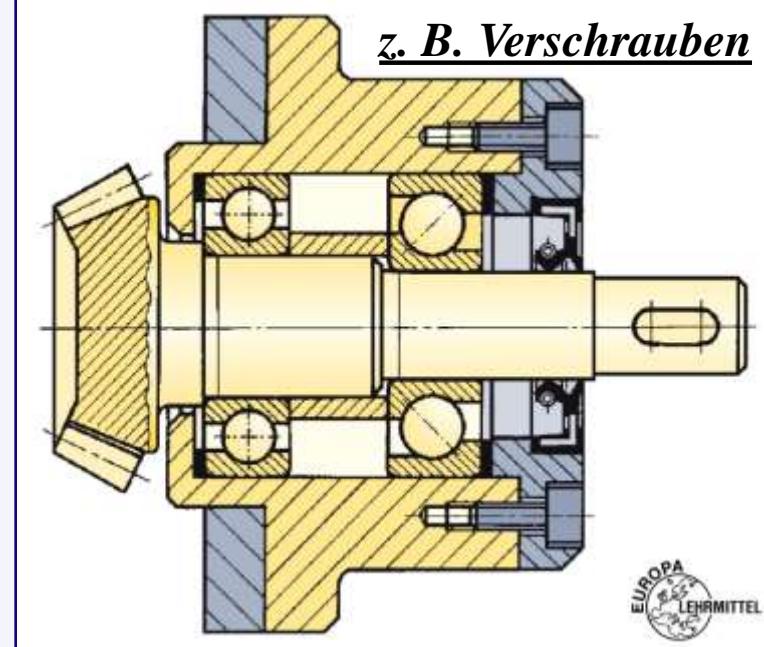
1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					



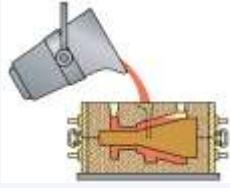
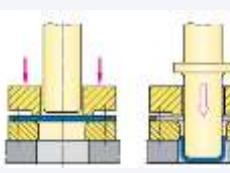
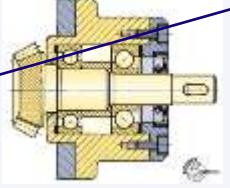
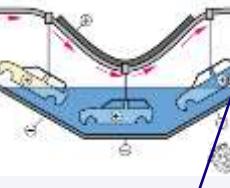
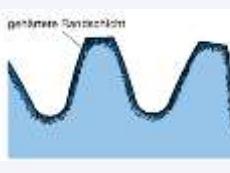
Gliederung der Fertigungsverfahren

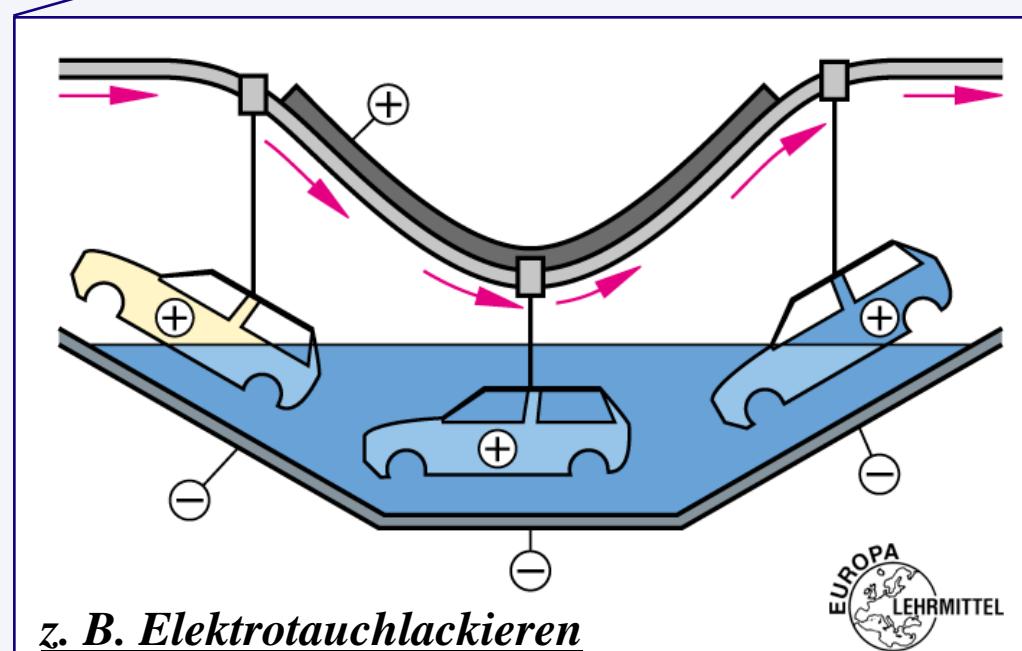
1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					

z. B. Verschrauben

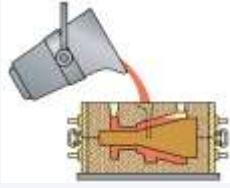
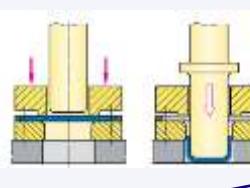
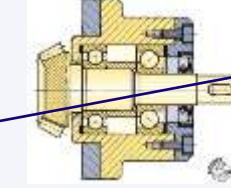
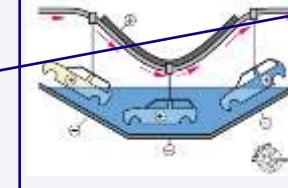


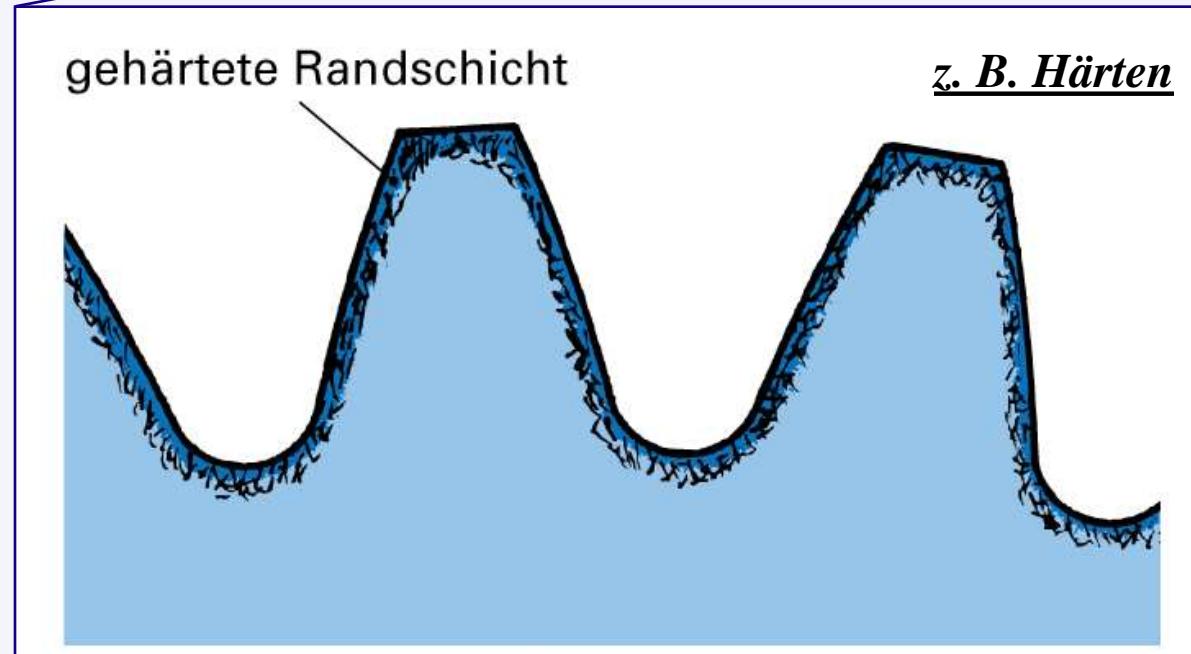
Gliederung der Fertigungsverfahren

1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					



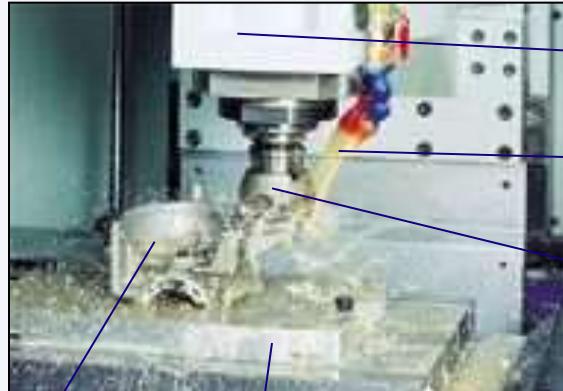
Gliederung der Fertigungsverfahren

1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					



Einschub: Fräsen und Bohren

Der Fräsvorgang



Quelle: WZM-Markt

Werkstück

Maschinentisch
(Kreuztisch für x-
und y-Bewegung)

Frästeil



Hinterschneidungen sind nicht
möglich! (Quelle: Mastercam)

Fräsen und Bohren



Quelle: Baxmeier

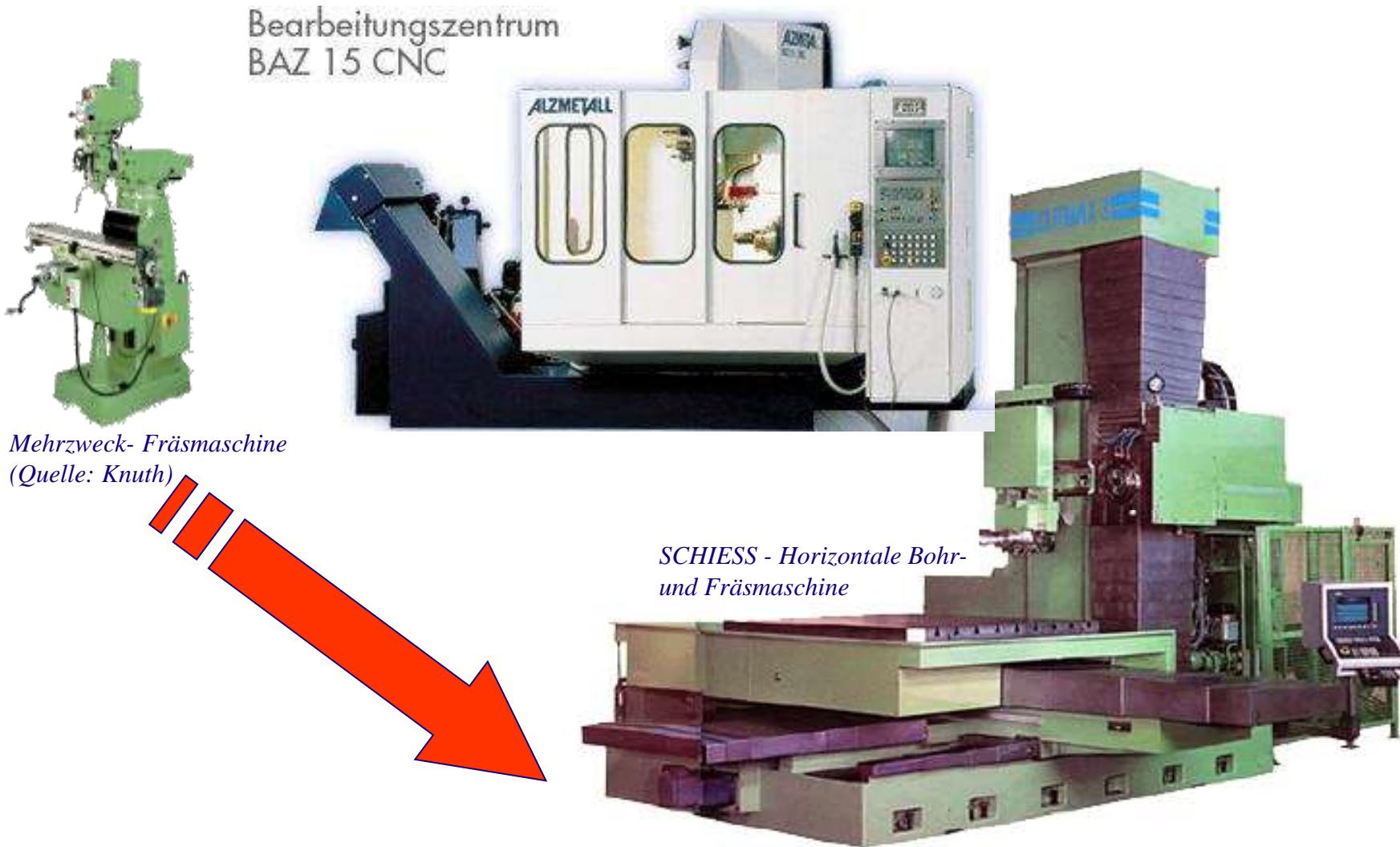
Vertikalfräsen



Schrägbohren
(45 Grad)

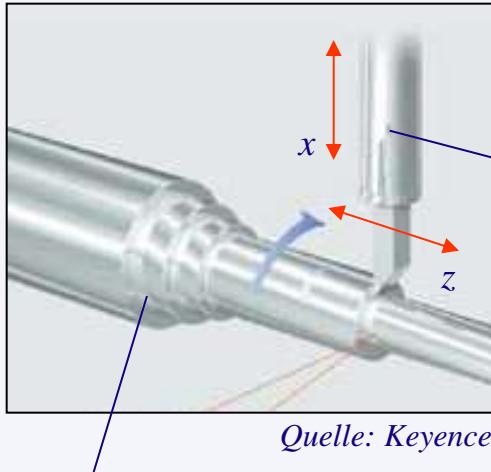
Quelle: Baxmeier

Fräsen und Bohren: Maschinenbeispiele



Einschub: Drehen

Der Drehprozeß



Werkstück

Werkzeug
(Drehmeißel)

Quelle: Keyence



Quelle: Berufenet / Arbeitsamt

Werkzeugaufnahme
mit Werkzeug

Werkstück

Werkstückaufnahme

Drehteil



Drehteile sind stets
rotationssymmetrisch!

Drehen: Maschinenbeispiele



Feinmechaniker-Drehmaschine
(Quelle: Unimat)



Schwerdrehmaschine (Quelle: Surplex)

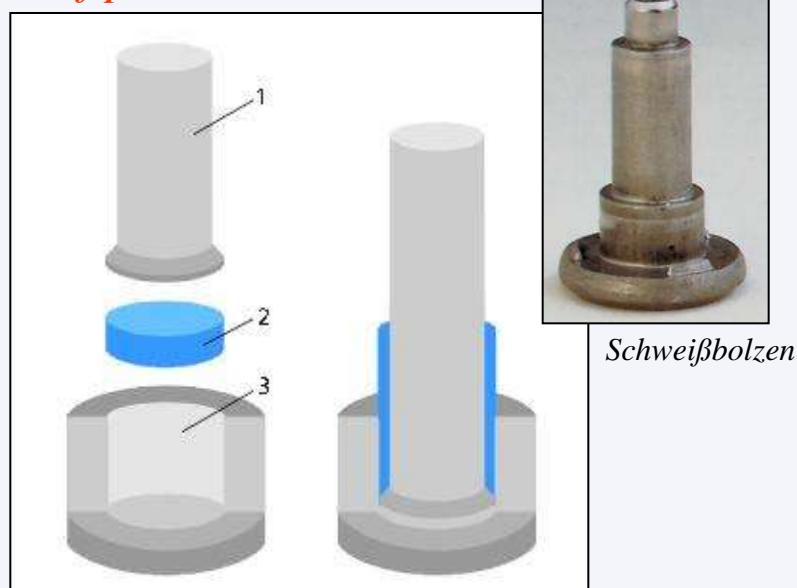


CNC-Drehmaschine für die Klein- und
Großserie (Quelle: WZM-Markt)

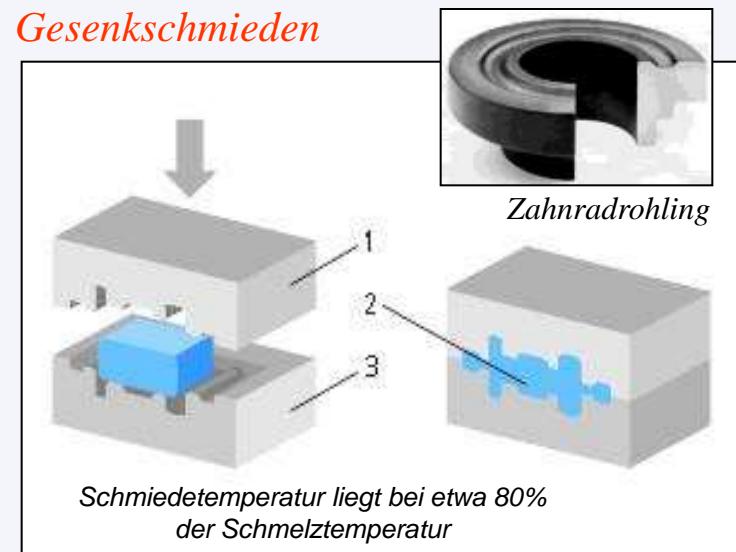


Einschub: Umformen (ausgewählte Verfahren)

Fließpressen



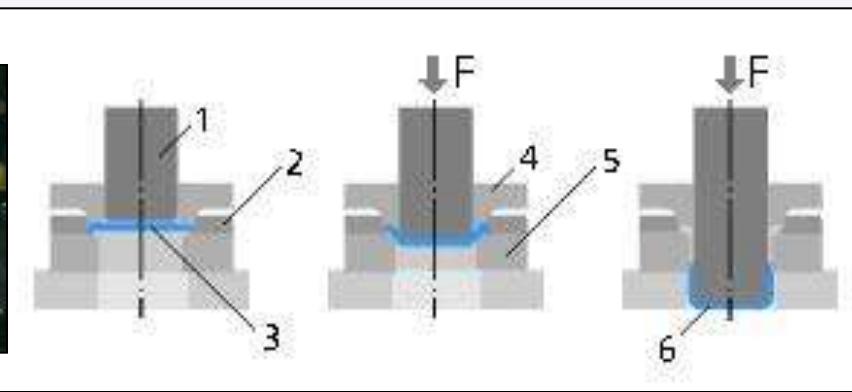
Gesenkschmieden



Gewindegülsen



Tiefziehen



Umformen: Maschinenbeispiele (mechanische Pressen)



60 Tonnen



400 Tonnen



1600 Tonnen

Grundkriterien der Fertigungstechnik

Grundkriterien der Fertigungstechnik

1. Hauptgeometrie

3 Gestaltungsprinzipien:

- geometrisch ungebundenes Erzeugen
- abbildendes Formen (Form in Werkzeug gespeichert)
- gesteuertes Formen (Form aus Steuerung der Maschine)

2. Fehlergeometrie

- Fehler des Maßes
- Fehler der Formen
- Fehler der Lage
- Fehler der Oberfläche

3. Mengenleistung

4. Anpassung der Arbeit an den Menschen (Ergonomie, Humanisierung)

Definition einer Werkzeugmaschine

Maschinen unterscheiden sich zunächst grundsätzlich hinsichtlich ihrer Energieerzeugung. Sie werden aus diesem Grund gegliedert in

- Kraftmaschinen, und

- Arbeitsmaschinen.

- **Kraftmaschinen sind Maschinen, die eine Energieform, wie thermische oder elektrische Energie, in mechanische Energie bzw. Arbeit umwandeln. (Elektromotoren, Windkraftanlagen, ...)**
- **Arbeitsmaschinen leisten unter Nutzung von Kräften zweckbestimmte Arbeitsverrichtungen. Sie sind für spezielle Aufgaben entwickelt.**

Definition einer Werkzeugmaschine

Fertigungsmaschinen sind nach DIN 96651 Arbeitsmaschinen, die geometrisch bestimmte Werkstücke nach vorgegebenem Fertigungsablauf durch Zusammenwirken der erforderlichen Fertigungsmittel von einem Ausgangszustand (Rohzustand, ...) in einen festgelegten Zwischen-, Folge- oder Fertigzustand überführen.

Fertigungsmaschinen können zur Bearbeitung von Metall, Holz, Glas, Kunststoffen, Keramik, usw. eingesetzt werden.

Die Bearbeitung dieser Werkstoffe erfordert teilweise gleichartige oder teilweise verschiedenartige Fertigungsmaschinen, die den besonderen Eigenschaften dieser Werkstoffe entsprechen.

Definition einer Werkzeugmaschine

Gliederung der Fertigungsmaschinen

Maschinen zum Urformen	Maschinen zum Umformen	Maschinen zum Trennen	Maschinen zum Fügen	Maschinen zum Beschichten	Maschinen zum Stoffeigenschaft ändern
Stranggußmaschinen	Pressen	<u>Zerteilende Maschinen</u> - Scheren - Schneidpressen ...	Schweißmaschinen	Galvanisiermaschinen	Härteöfen
Druckgußmaschinen	Hämmer		Lötmaschinen	Lackiermaschinen	PVD-Anlagen
Spritzgußmaschinen	Wälzmaschinen	<u>Spanende Maschinen</u> - Drehmaschinen - Fräsmaschinen - Läppmaschinen ...	Nietmaschinen	Plattiermaschinen	CVD-Anlagen
Schleudergußmaschinen	Ziehmaschinen	<u>Abtragende Maschinen</u> - Erodiermaschinen	Klebemaschinen	PVD-Anlagen	Ionenbeschleunigeranlagen
...	...		Schraubmaschinen	CVD-Anlagen	

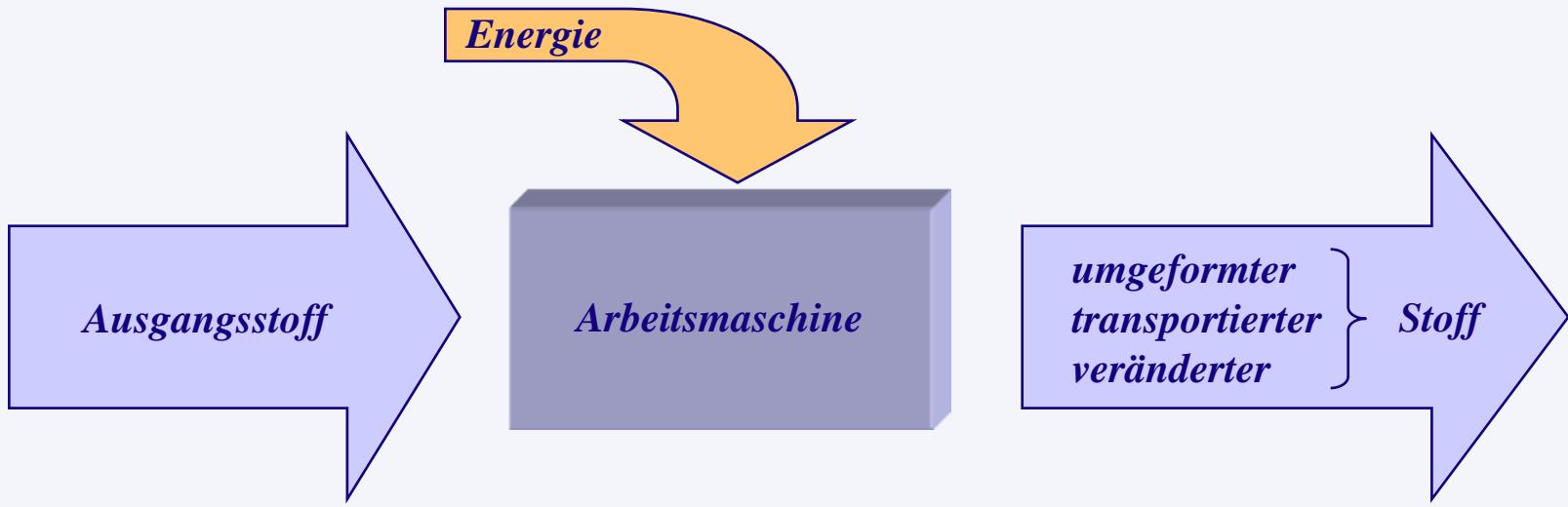
Definition einer Werkzeugmaschine

Fertigungsmaschinen zum Umformen, Trennen und Fügen werden nach DIN 69651 als Werkzeugmaschine bezeichnet.

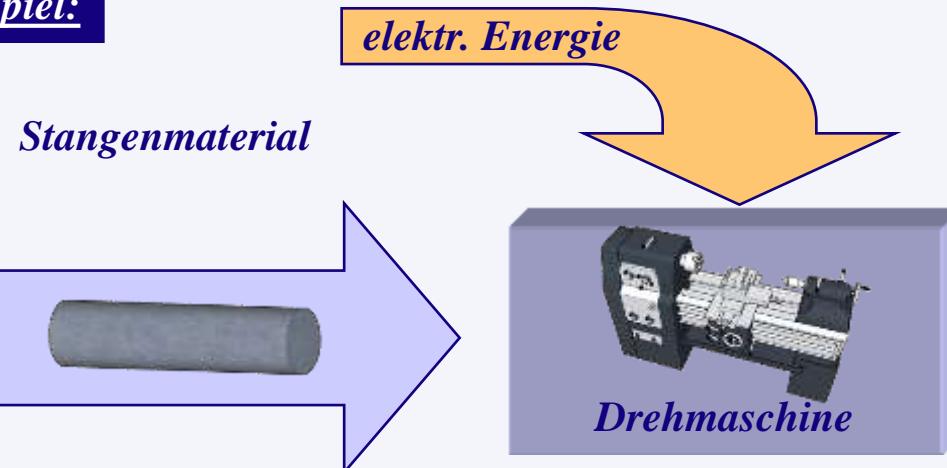


Werkzeugmaschinen werden in der Literatur definiert als „mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen“.

Die Arbeitsmaschine / Werkzeugmaschine als technisches System



Beispiel:



Quelle: nach Europa Fachbuchverlag

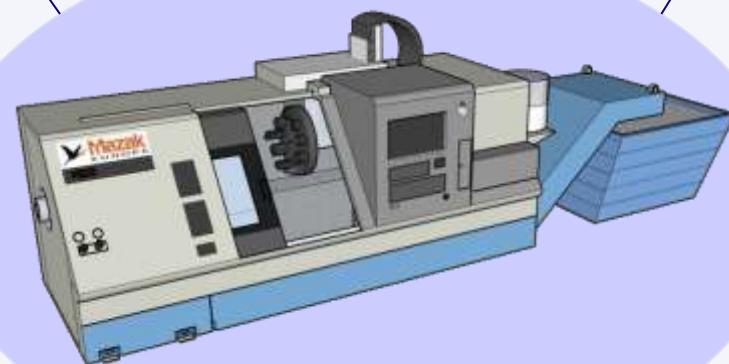
Bedeutung der Werkzeugmaschinen (WZM)

Werkzeugmaschinen

*kein technisches
Produkt ist ohne WZM
herstellbar*

*Impulsgeber für
Rationalisierung und
Automatisierung der
Produktion*

*tragen zur Sicherung
des Industriestandorts
Deutschland bei*



*haben
Schlüsselqualifikationen
in der industriellen
Produktionstechnik*

*sind Schrittmacher für
Strukturwandel und
technischen Fortschritt*

*Innovationen im WZM-
Bau haben weitreichende
multiplikative Wirkung*

Quelle: www.mazak.de

*globale Wettbewerbsfähigkeit der
Industrie hängt von
Leistungsfähigkeit und Qualität
der WZM ab*

Kennzahlen des deutschen Maschinen- und Anlagenbau (Daten für 2012)

*Nach Anzahl der Unternehmen und nach
Beschäftigten ist der Maschinenbau die
größte Branche Deutschlands*

Die größten Industriezweige...

Wirtschaftsgruppe Industry group	Zahl der Unternehmen Number of Enterprises 2011	Beschäftigte in Tsd. Jahresdurchschnitt Employees in 1,000 yearly average 2011	2012	%-Änderung zum Vorjahr % change to previous year	Umsatz Mrd. EUR Turnover bn EUR 2011	2012	%-Änderung zum Vorjahr % change to previous year
Maschinenbau <i>Mechanical engineering</i>	6.227	931	971	4,3	201	207	3,1
Elektroindustrie¹ <i>E&E industry¹</i>	4.264	821	831	1,2	174	167	-4,0
Kraftwagen und Kraftwagenteile <i>Motor vehicles, trailers and semi-trailers</i>	1.030	694	707	1,9	270	274	1,5
Chemische Industrie <i>Chemical industry</i>	1.172	285	287	0,7	113	113	-0,4
Ernährungsgewerbe <i>Food products and beverages</i>	5.295	426	431	1,2	131	136	4,0
Verarbeitendes Gewerbe <i>Manufacturing</i>	36.611	4.957	5.079	2,5	1.360	1.366	0,4

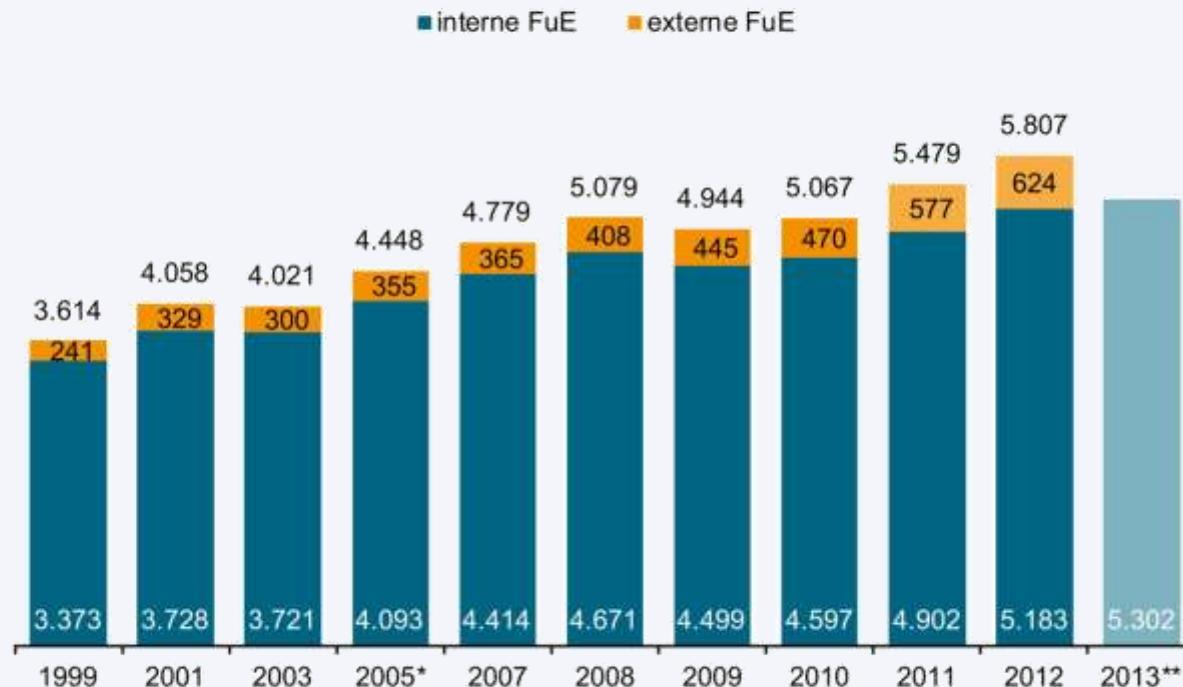
Quelle/Source: Statistisches Bundesamt, ZVEI, VDMA
1) ohne Datentechnik/ without information technology

Quelle: VDMA

FuE-Aufwendungen des Maschinenbaus

Aufwendungen der Unternehmen des Maschinenbaus für Forschung und Entwicklung

in Millionen Euro



*) bis 2005 Maschinenbau inkl. Waffen und Haushaltsgeräte

**) Plandaten

Quelle: Stifterverband Wissenschaftsstatistik

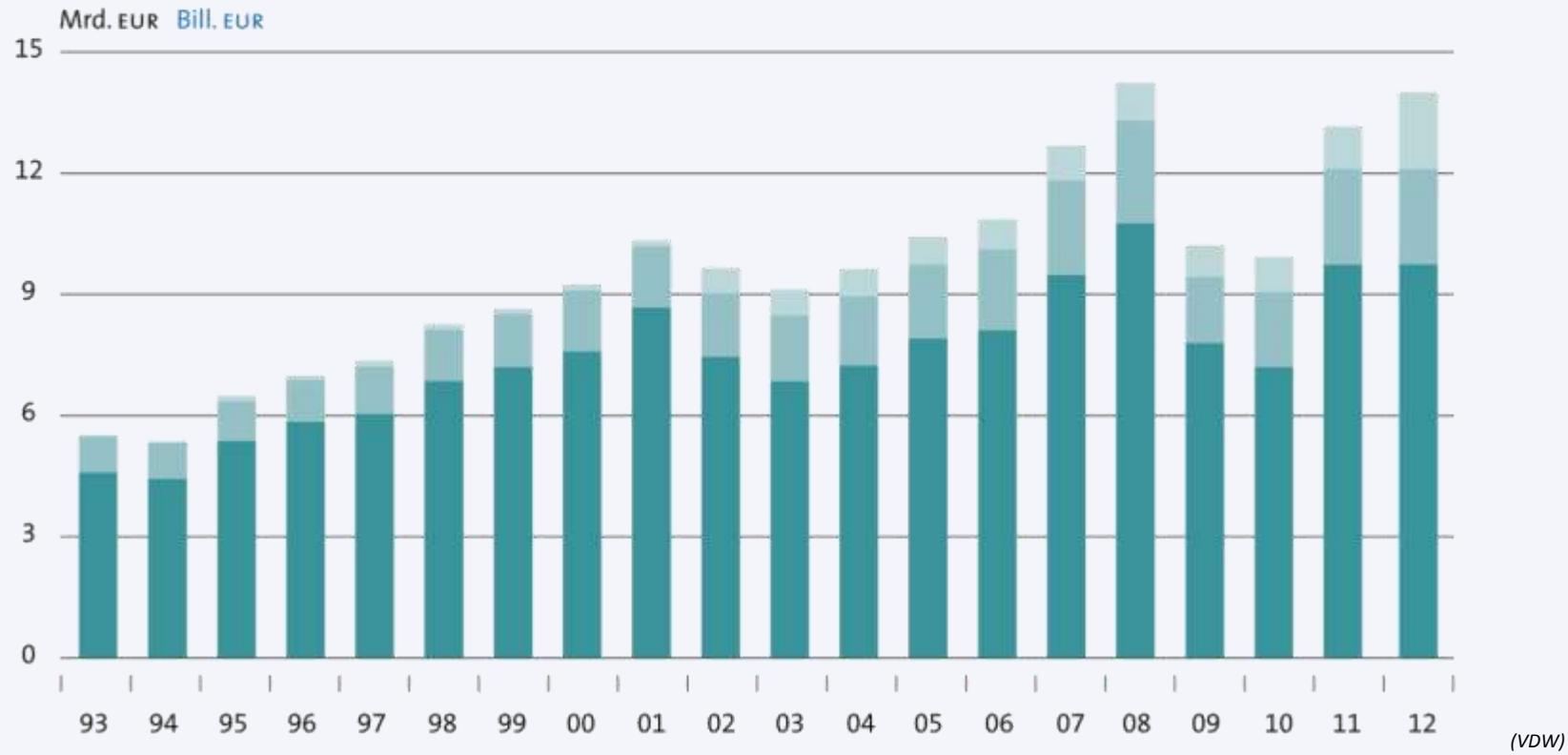
(VDMA)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Werkzeugmaschinen-Produktion Deutschland

Machine tool production Germany

- Maschinen Machines
- Teile, Zubehör Parts, accessories
- Installation, Reparatur/Instandhaltung Installation, repair/maintenance



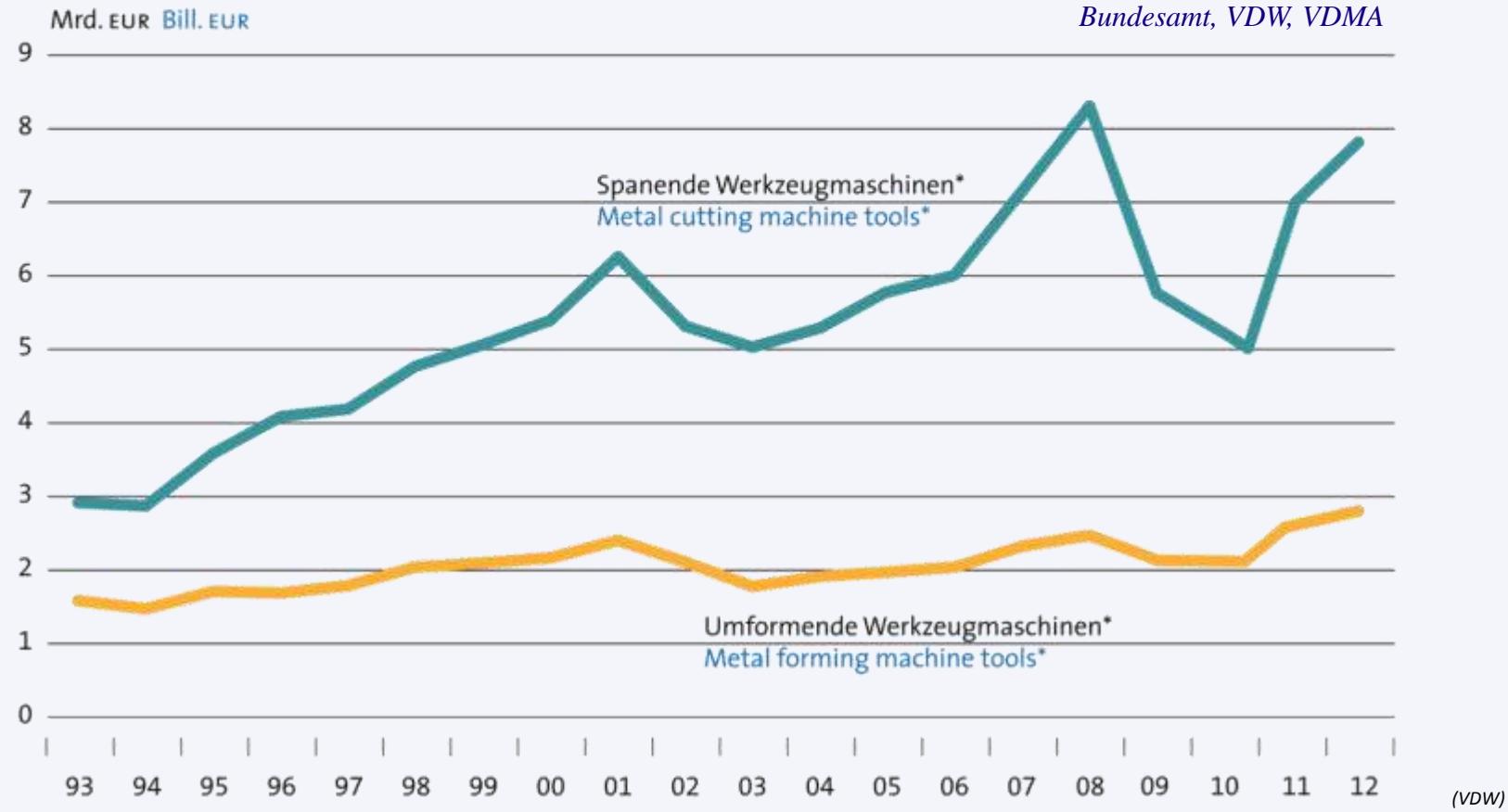
Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Produktion spanender und umformender Werkzeugmaschinen in Deutschland Production of metal cutting and forming machine tools in Germany

2012 = VDW-Schätzung

* ohne Teile, Zubehör

Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDW, VDMA

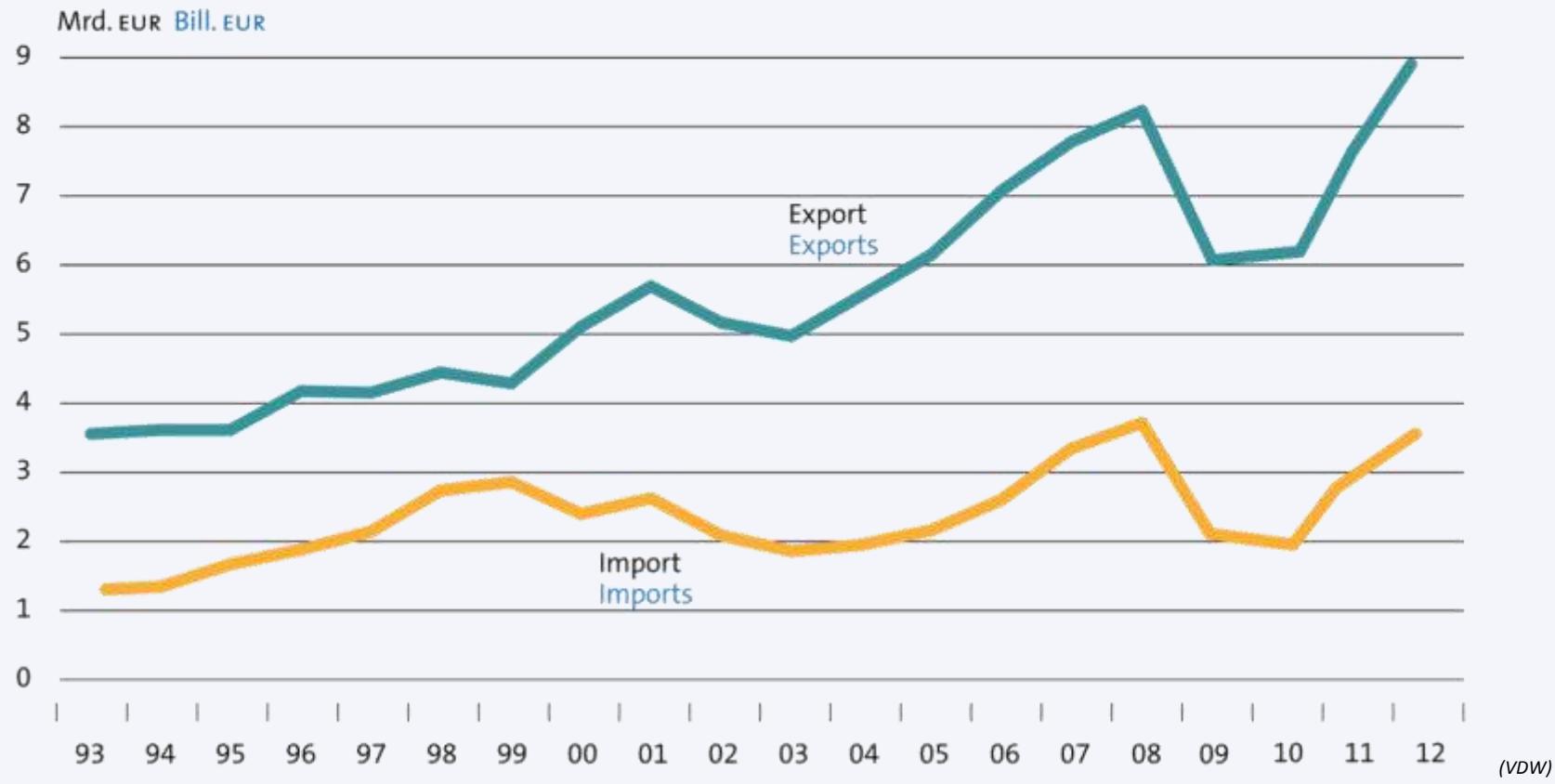


Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Deutscher Werkzeugmaschinen-Export und -Import German machine tool exports and imports

Hinweis: Einschließlich
Teile, Zubehör

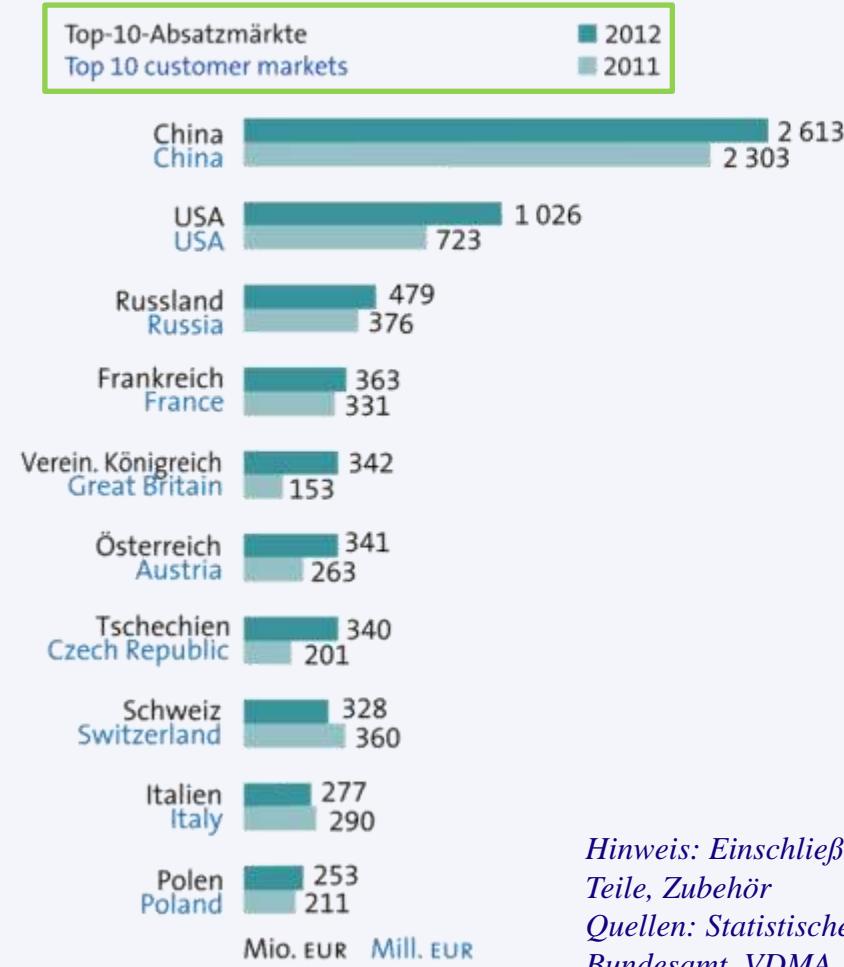
Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDW, VDMA



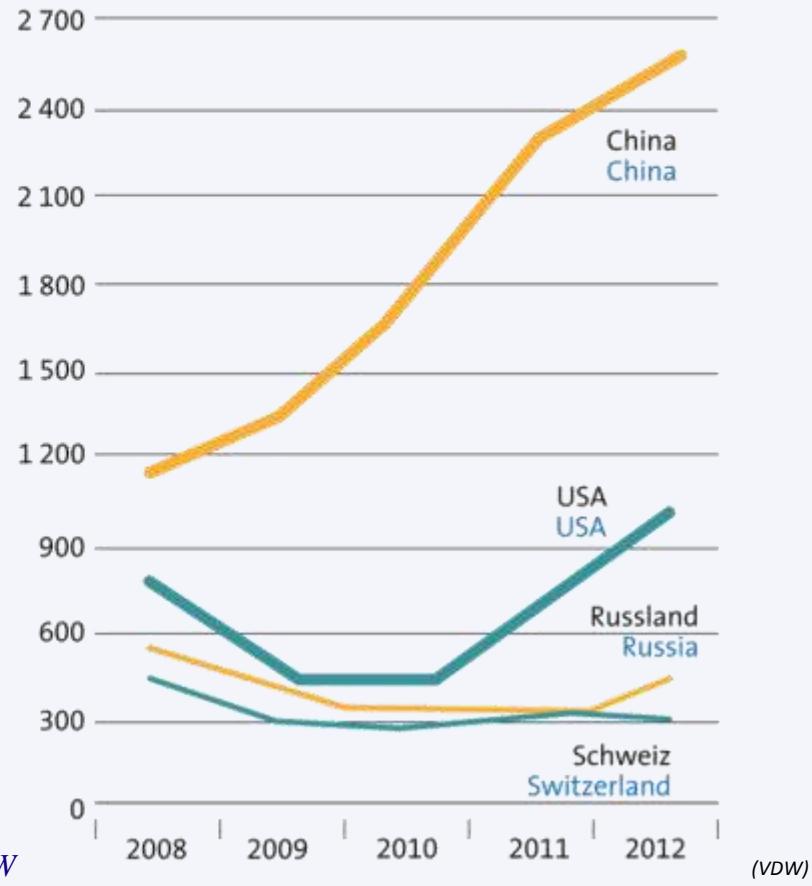
Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Deutscher Werkzeugmaschinen-Export: wichtigste Absatzmärkte

German machine tool exports: major customer markets



Entwicklung der Top-4-Märkte (Mio. EUR)
Development of the top 4 markets (mill. EUR)



Hinweis: Einschließlich
Teile, Zubehör
Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDMA, VDW

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Deutscher Werkzeugmaschinen-Außenhandel nach Regionen German machine tool trade by regions

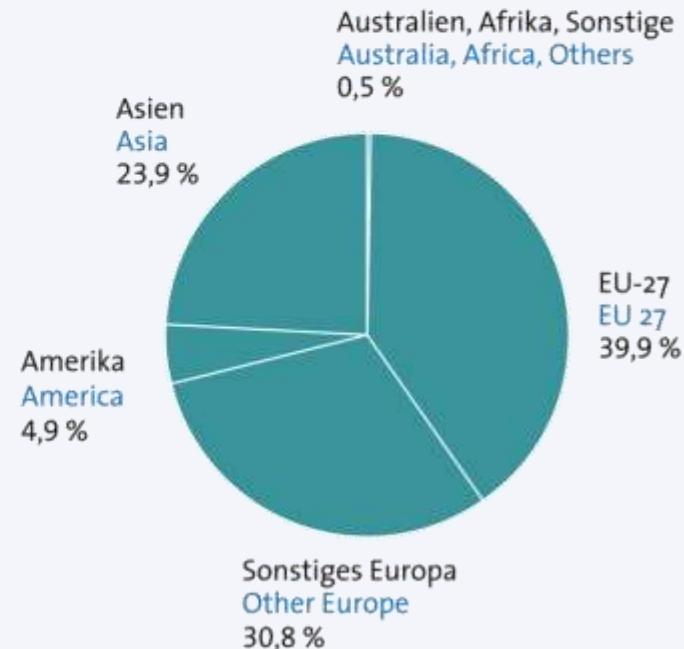
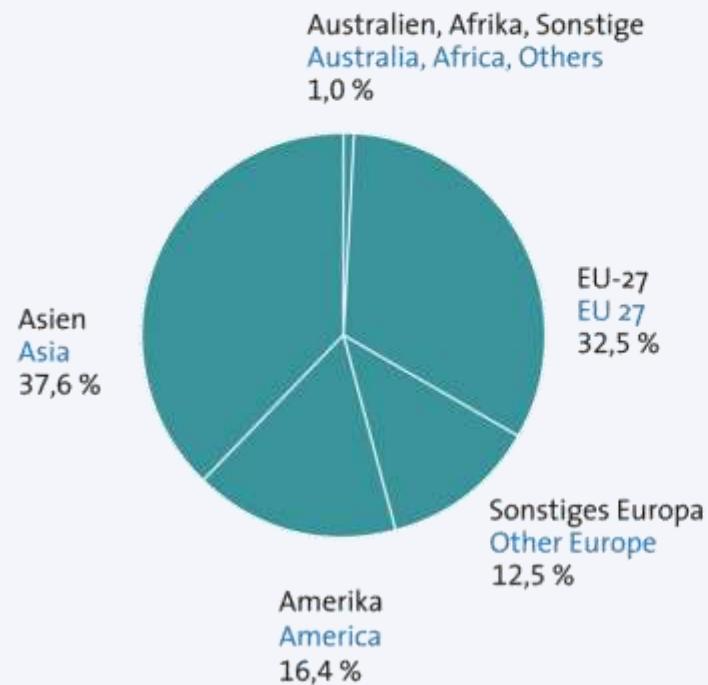
Hinweis: Einschließlich

Teile, Zubehör

Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDMA, VDW

Export 2012 = 9 555 Mio. EUR
Exports 2012 = 9 555 mill. EUR

Import 2012 = 3 225 Mio. EUR
Imports 2012 = 3 225 mill. EUR

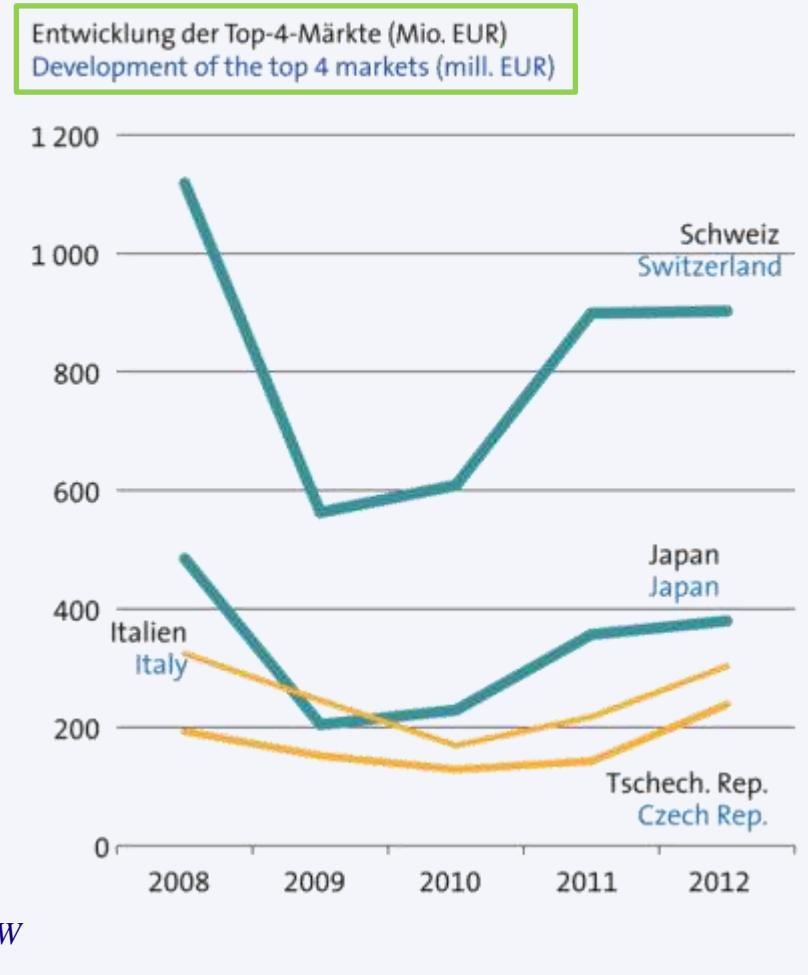
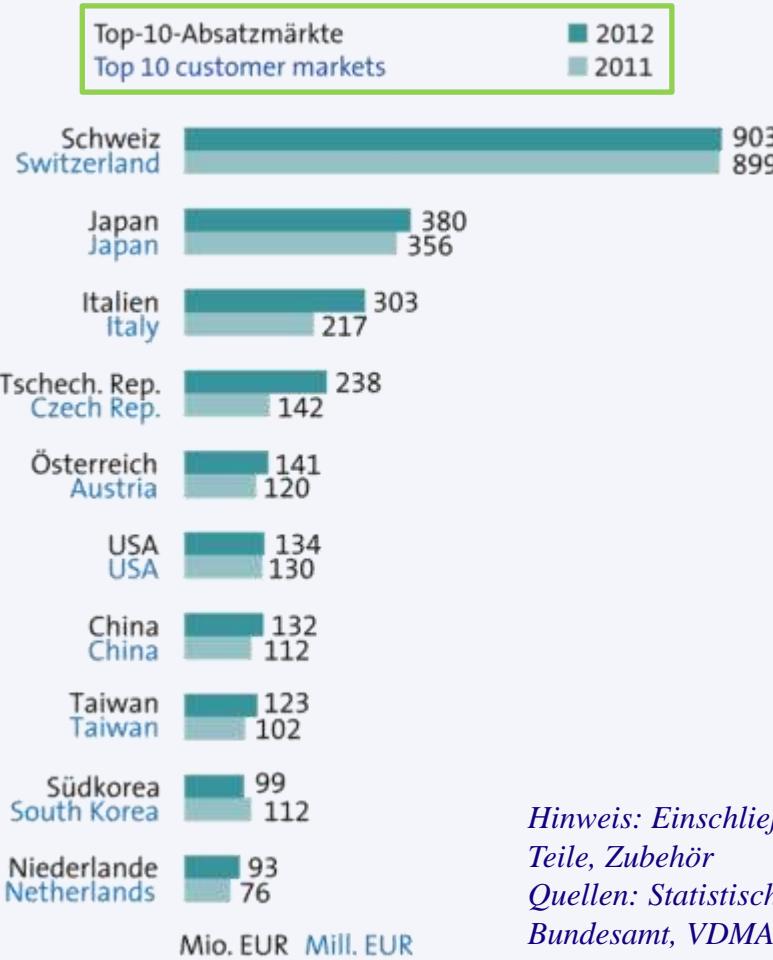


(VDW)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Deutscher Werkzeugmaschinen-Import: wichtigste Lieferländer

German machine tool imports: major supplier countries

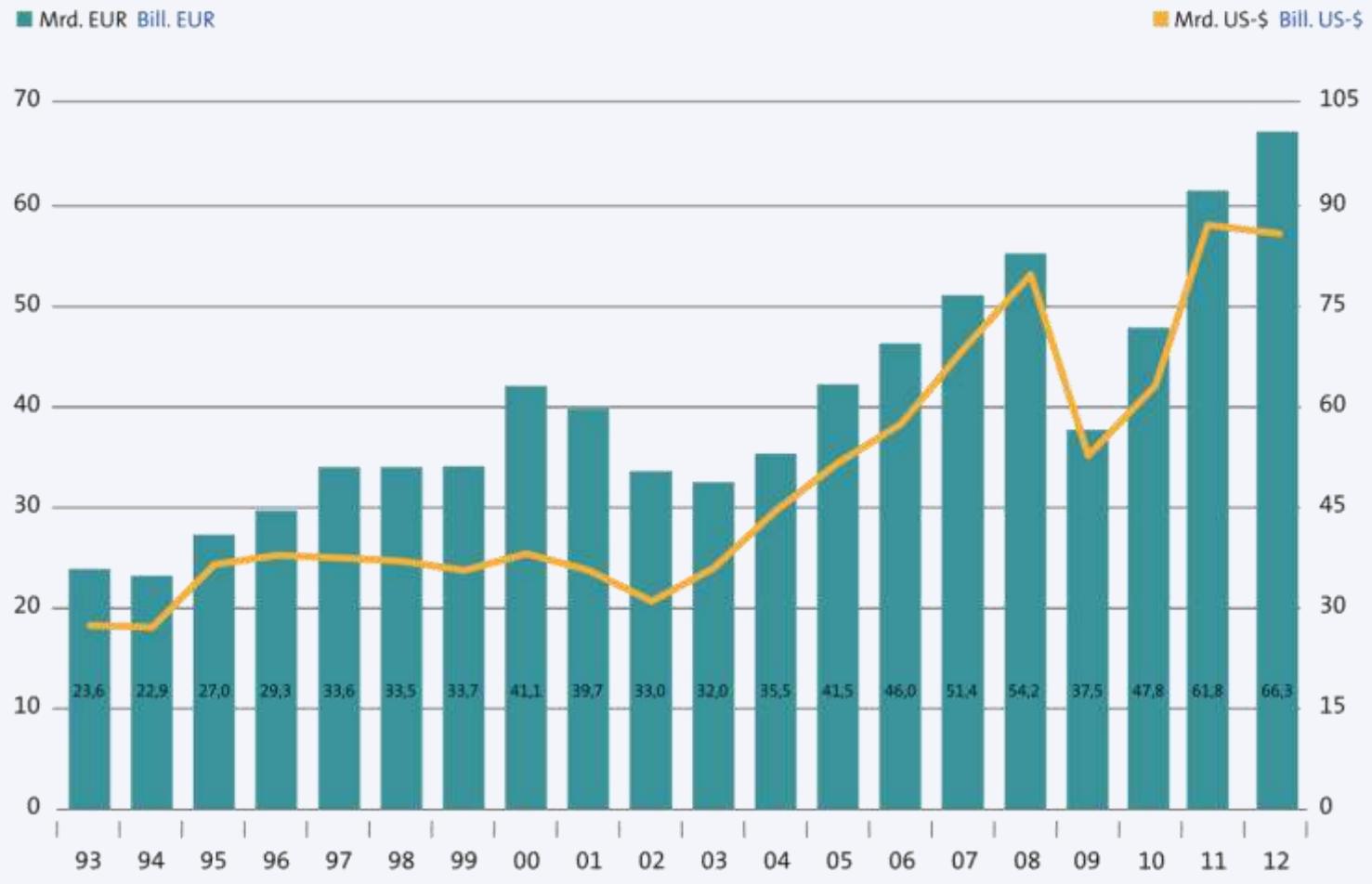


Hinweis: Einschließlich
Teile, Zubehör
Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDMA, VDW

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Welt-Produktion Werkzeugmaschinen World machine tool production

*Hinweis: ohne Teile, Zubehör;
2012 = Schätzung
Quelle: VDW*

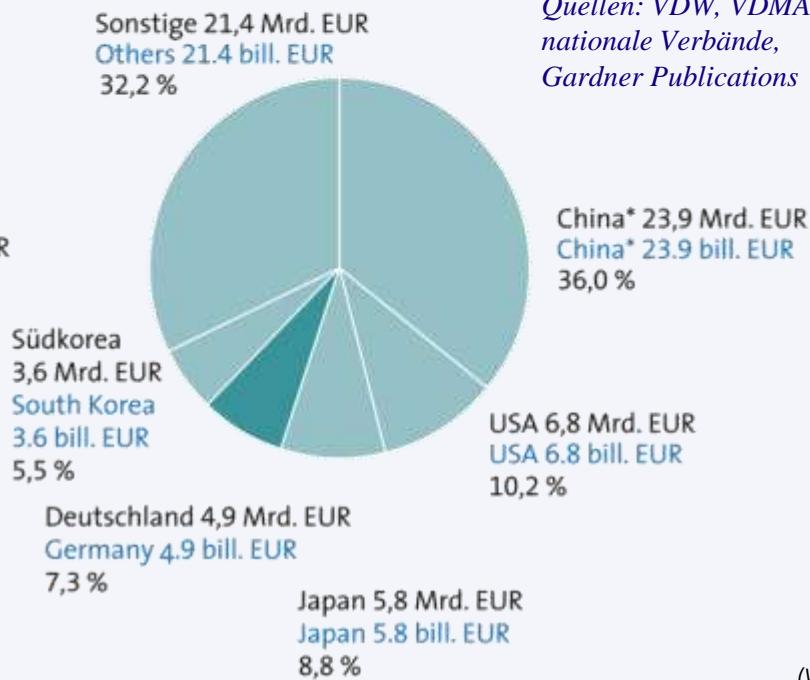
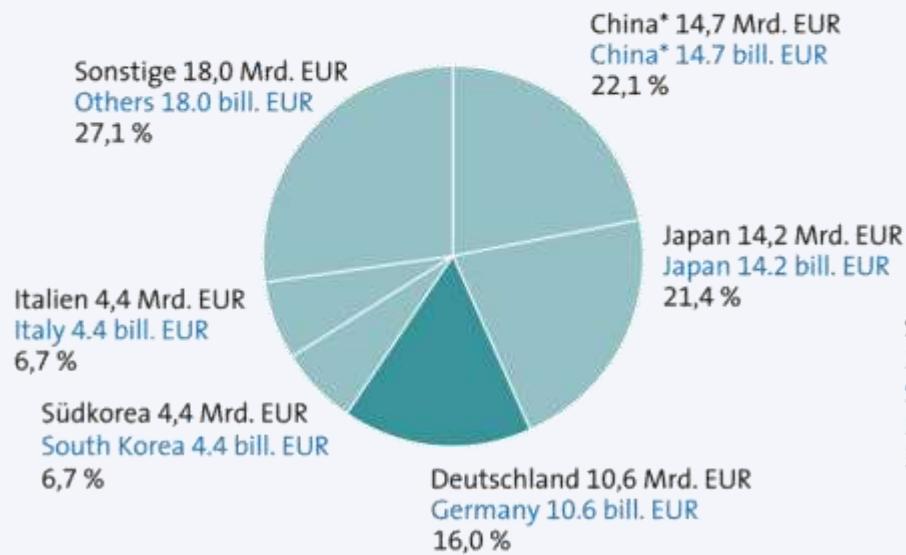


Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Welt-Produktion und -Verbrauch von Werkzeugmaschinen World machine tool production and consumption

Top-5-Produzenten (Mrd. EUR)
Top 5 producers (bill. EUR)

Top-5-Verbraucher (Mrd. EUR)
Top 5 consumers (bill. EUR)



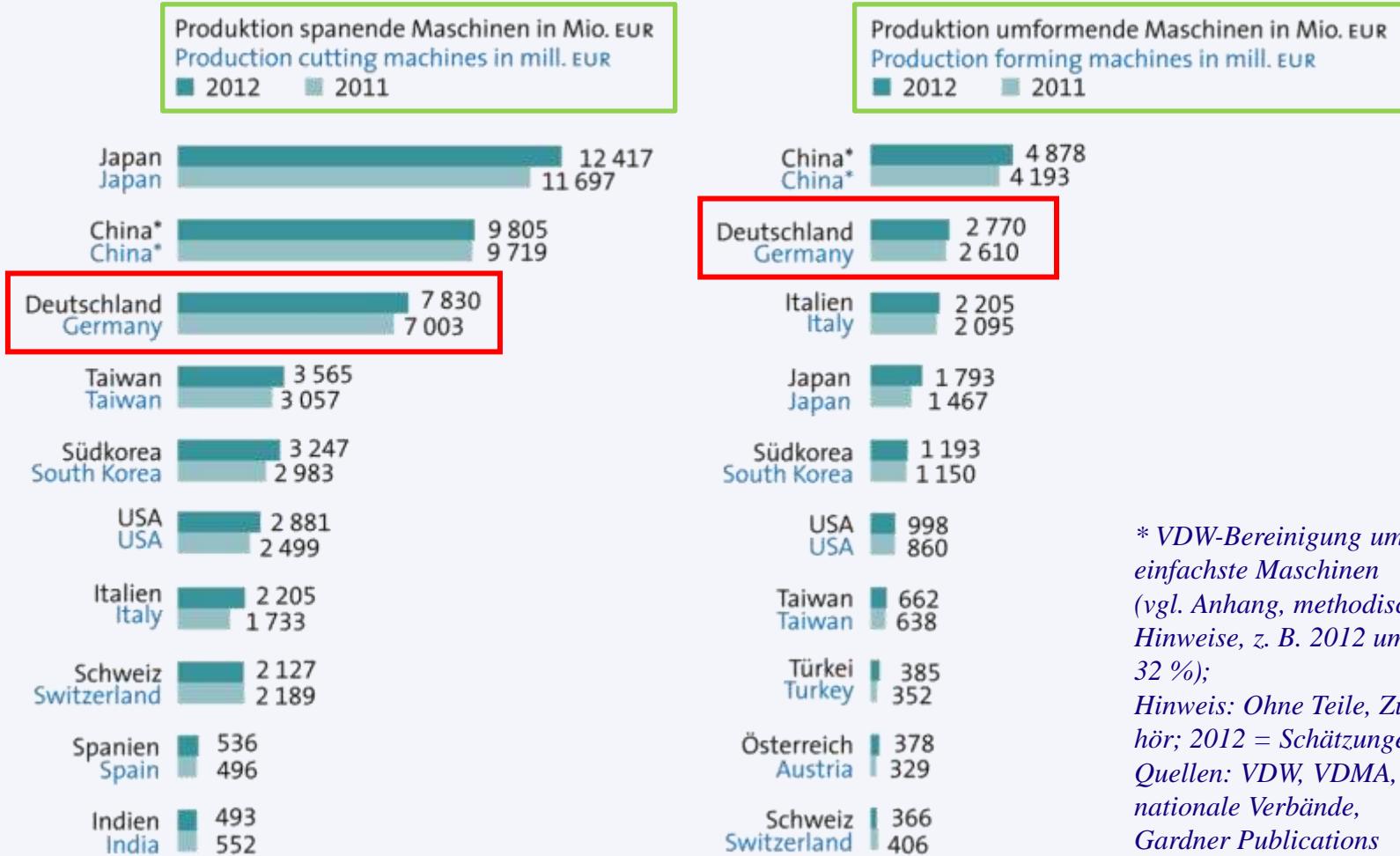
Welt-Produktion = Welt-Verbrauch 2012: 66,3 Mrd. EUR
World production = world consumption 2012: 66.3 bill. EUR

* VDW-Bereinigung um einfache Maschinen (vgl. Anhang, methodische Hinweise, z. B. 2012 Produktion und Export um 32 % => Verbrauch um 20 %); Hinweis: Ohne Teile, Zubehör; 2012 = Schätzungen; VDW-Annahme: Weltproduktion = Weltverbrauch
Quellen: VDW, VDMA, nationale Verbände, Gardner Publications

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Werkzeugmaschinen-Produktion spanend/umformend: Top-10-Länder weltweit

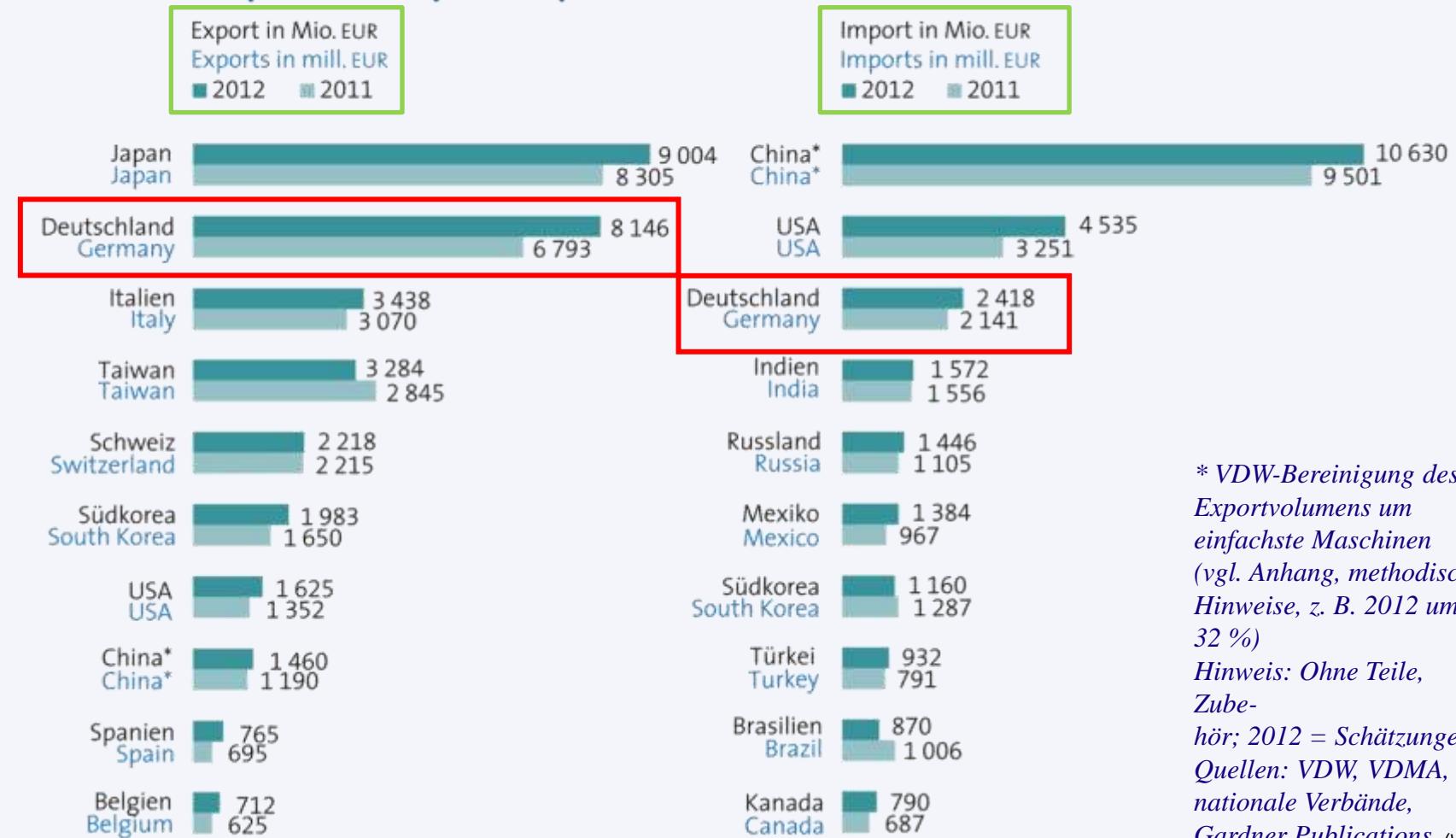
Machine tool production cutting/forming: top 10 countries worldwide



Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Werkzeugmaschinen-Export und -Import: Top-10-Länder weltweit

Machine tool exports and imports: top 10 countries worldwide



Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Deutsche Werkzeugmaschinenindustrie nach Betriebsgrößenklassen (%-Anteile)*

German machine tool industry by company size (%-Shares)*

Zahl der Beschäftigten Number of employees	Betriebe Companies			Beschäftigte Employment			Produktion Production		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
1–50	15,9	14,2	12,6	1,2	1,0	0,8	1,4	1,5	1,2
51–100	18,6	14,2	14,6	4,6	3,3	3,1	3,4	2,5	2,6
101–250	23,9	26,4	28,2	13,8	13,6	13,5	13,7	12,5	11,6
251–500	23,9	25,5	24,3	26,6	25,9	25,2	26,2	26,7	25,8
501–1000	13,3	14,2	14,6	30,4	29,3	29,5	36,2	29,7	28,6
>1000	4,4	5,7	5,8	23,4	26,9	27,8	19,1	27,1	30,2
Gesamt Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

■ vorläufig/preliminary

* auf Basis der Meldungen von Mitgliedsfirmen des VDW und des Fachverbandes Werkzeugmaschinen im VDMA

* based on reports from member companies of VDW and VDMA section Machine Tools

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Regionale Verteilung der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie (%-Anteile)*

Geographical distribution of the German machine tool industry (%-Shares)*

Bundesland German laender	Betriebe Companies			Beschäftigte Employment			Produktion Production		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Baden-Württemberg Baden-Württemberg	42,5	42,5	42,7	48,8	48,1	47,8	50,8	54,1	53,5
Nordrhein-Westfalen North Rhine-Westphalia	17,7	17,9	17,5	16,9	16,4	17,1	20,3	18,2	17,0
Bayern Bavaria	13,3	14,2	14,6	19,8	21,2	21,5	16,7	16,6	18,2
Thüringen Thuringia	7,1	7,5	7,8	5,3	5,4	5,5	4,8	4,4	5,0
Sachsen Saxony	5,3	5,7	5,8	3,8	3,8	4,0	2,8	2,9	3,1
Hessen Hesse	5,3	5,7	4,9	1,9	1,9	1,4	1,4	1,3	0,9
Sonstige Others	8,8	6,6	6,8	3,4	3,1	2,6	3,1	2,5	2,3
Gesamt Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

■ vorläufig/preliminary

* auf Basis der Meldungen von Mitgliedsfirmen des VDW und des Fachverbandes Werkzeugmaschinen im VDMA

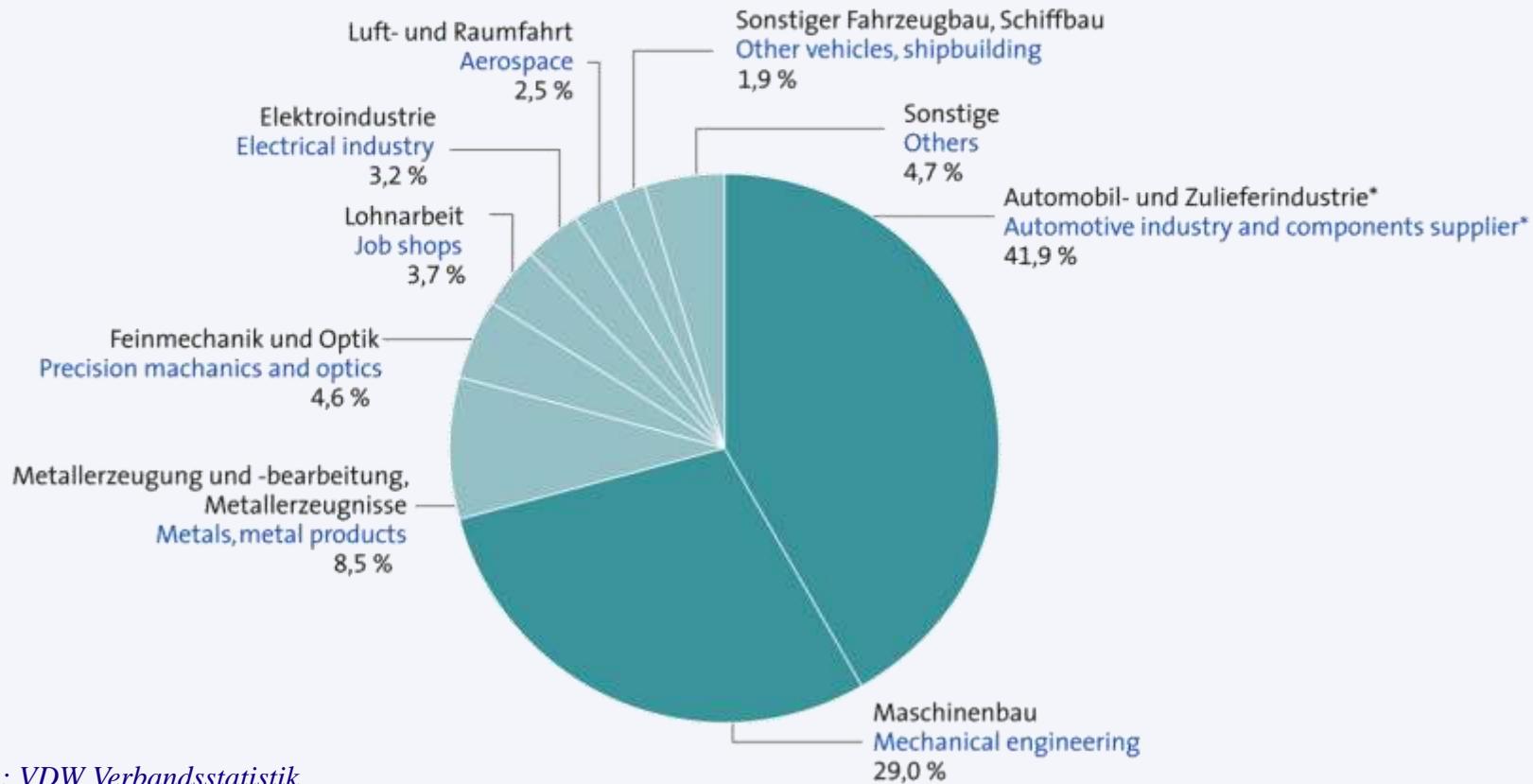
* based on reports from member companies of VDW and VDMA section Machine Tools

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Abnehmerbranchen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie

Customer branches of the German machine tool industry

Prozentuale Verteilung des Produktionswertes 2012 Percental distribution of the production value 2012

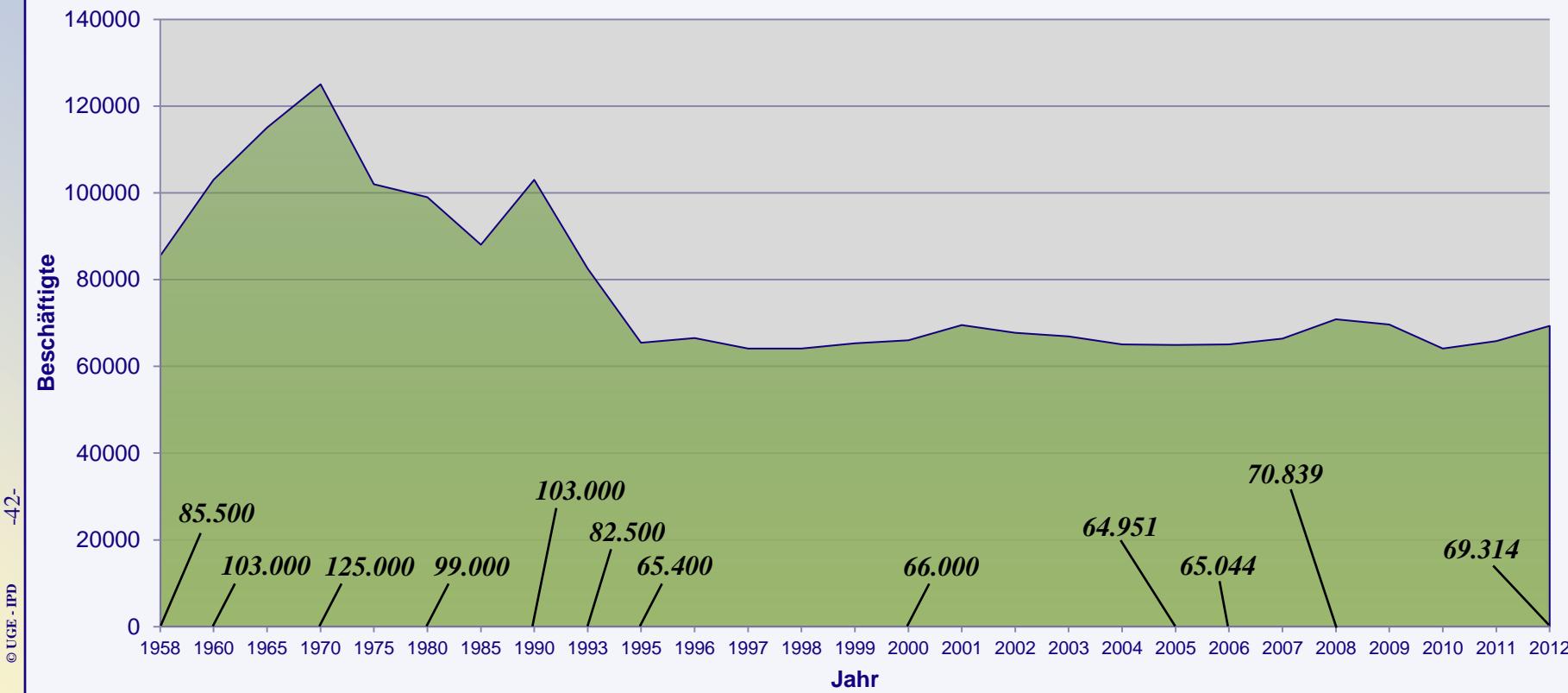


Quelle: VDW Verbandsstatistik

(VDW)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Beschäftigungsentwicklung in der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie



Aus: Historische Zeitreihen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie

2012: Daten teilweise geschätzt

- Beschäftigte sind Jahresdurchschnitte

- Daten ab 1996 inkl. Neue Bundesländer (Beschäftigte ab 1996)

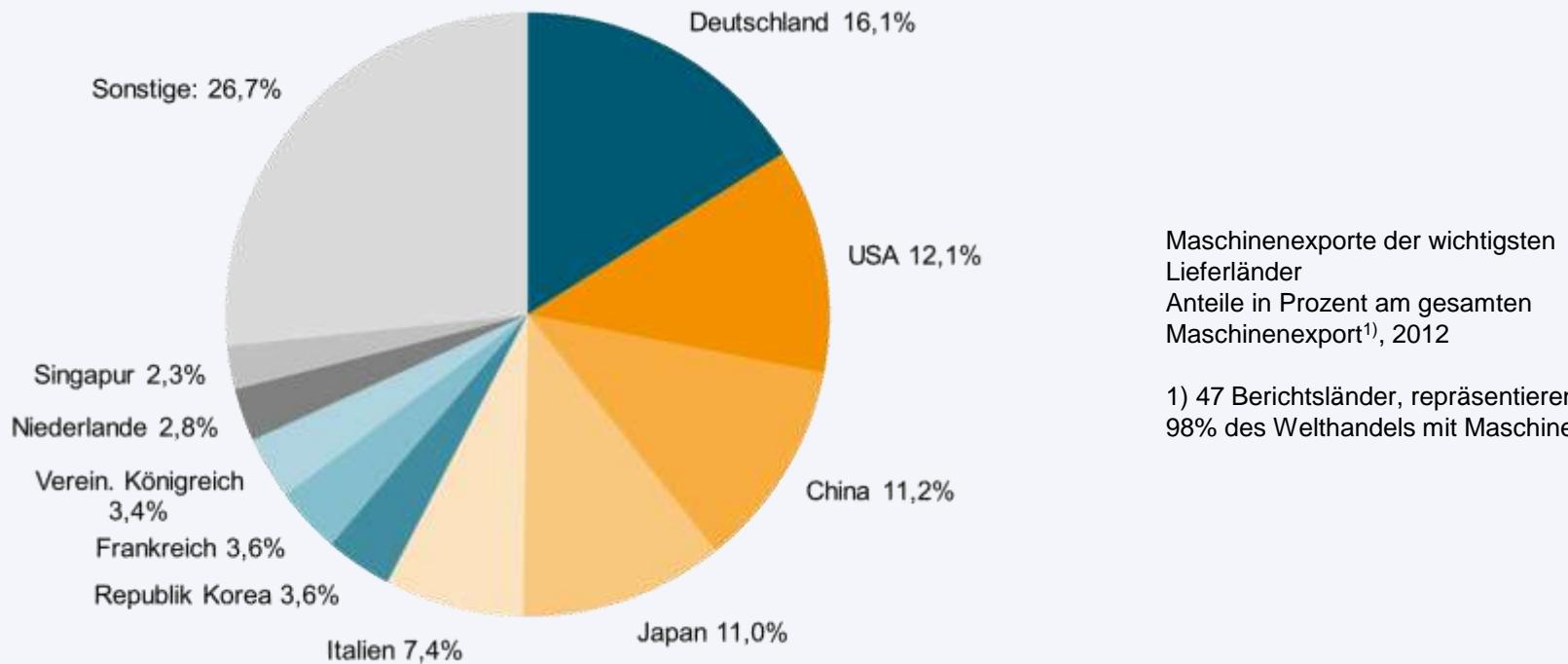
Quellen: Statistisches Bundesamt, Ifo-Institut München, VDMA, VDW

(VDW)

Exportzahlen der wichtigsten Länder im Vergleich

Etwa 75% des Maschinenumsatzes geht ins Ausland.

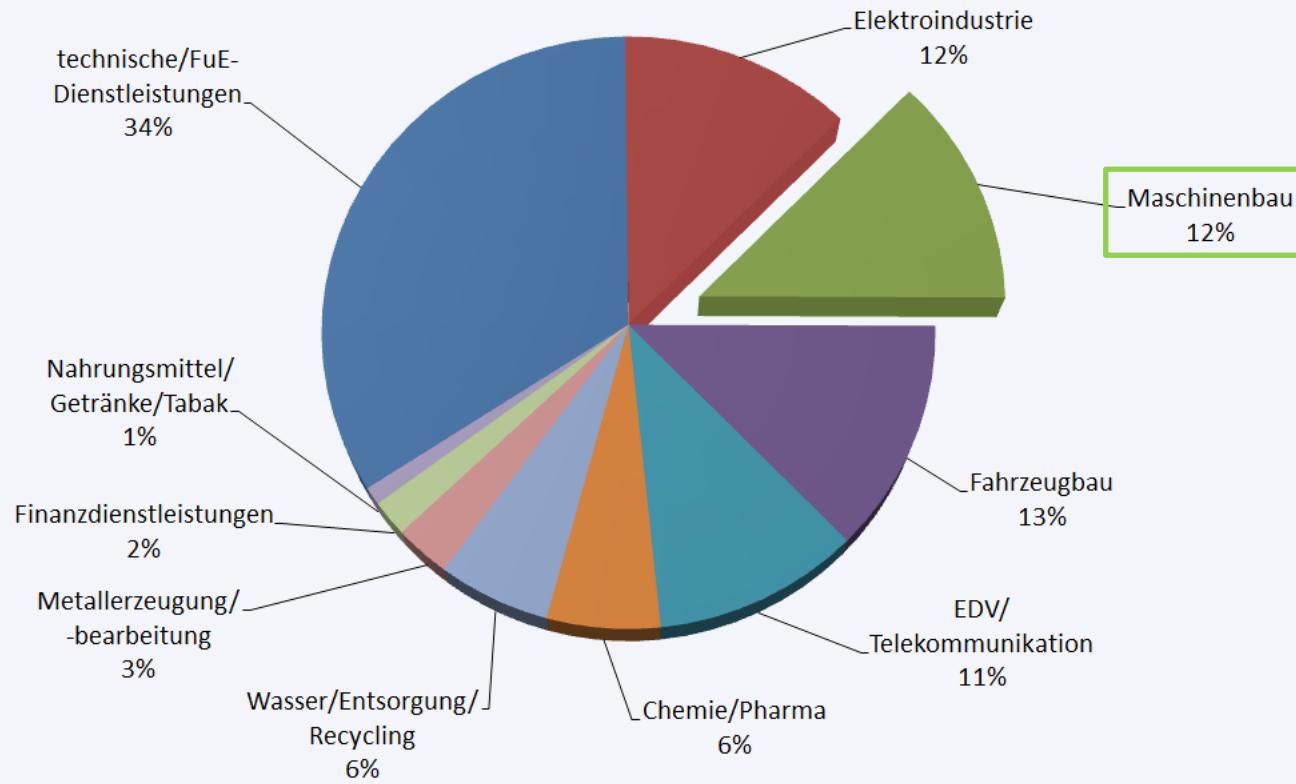
Der deutsche Maschinenbau führt im Welthandel mit rd. 16 % Anteil vor seinen schärfsten Wettbewerbern USA, China und Japan.



Quelle: VDMA

Anteil der Ingenieure an den Beschäftigten

Mit etwa 150.000 Ingenieuren, das ist jeder achte Mitarbeiter, ist der Maschinenbau einer der größten Arbeitgeber für Ingenieure. Auch im gewerblichen Bereich beschäftigt er fast ausschließlich Facharbeiter.

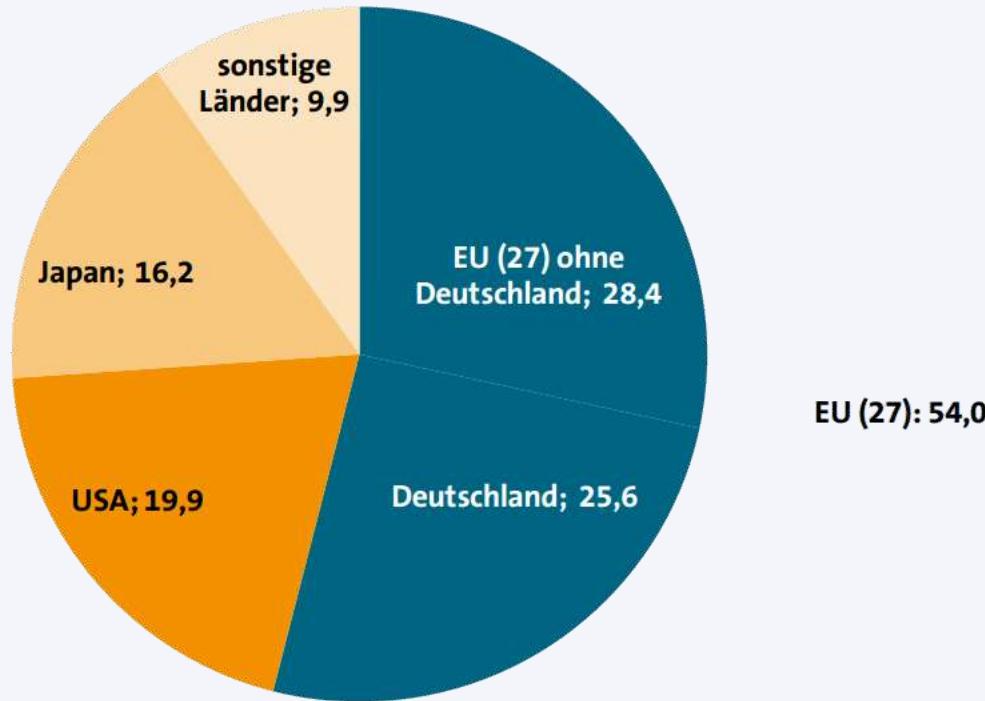


Quelle: 2012: Ingenieure auf einen Blick, VDI

Patentanmeldungen im Maschinenbau

Maschinenbau-Patentanmeldungen am European Patent Office

1999 - 2008, Anteile in Prozent



Quelle: VDMA

Größenklassengliederung* im Maschinenbau

*Kleine und mittlere Unternehmen dominieren:
Über 55 % der Unternehmen beschäftigen weniger
als 250, nur etwa 5,8 % mehr als 1000 Mitarbeiter.*

Deutsche Werkzeugmaschinenindustrie nach Betriebsgrößenklassen (%-Anteile)*

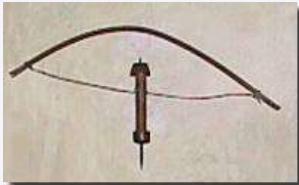
German machine tool industry by company size (%-Shares)*

Zahl der Beschäftigten Number of employees	Betriebe Companies			Beschäftigte Employment			Produktion Production		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
1–50	15,9	14,2	12,6	1,2	1,0	0,8	1,4	1,5	1,2
51–100	18,6	14,2	14,6	4,6	3,3	3,1	3,4	2,5	2,6
101–250	23,9	26,4	28,2	13,8	13,6	13,5	13,7	12,5	11,6
251–500	23,9	25,5	24,3	26,6	25,9	25,2	26,2	26,7	25,8
501–1000	13,3	14,2	14,6	30,4	29,3	29,5	36,2	29,7	28,6
>1000	4,4	5,7	5,8	23,4	26,9	27,8	19,1	27,1	30,2
Gesamt Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

Steinzeit

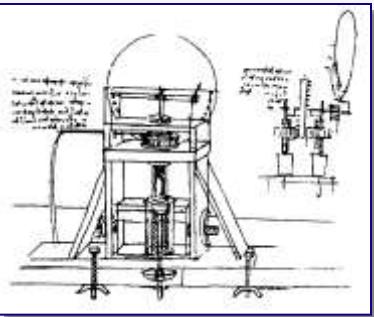
Meißel und Schabewerkzeuge
Bohrer (Antrieb über Fiedelbogen)



*Rollenbohrer mit
Fiedelbogenantrieb*

1452 - 1519 (Leonardo da Vinci)

Erste Entwürfe von mechanischen Bearbeitungsmaschinen aus Holz. Die Holzkonstruktionen hatten jedoch aufgrund des starken Verzugs eine schlechte Arbeitsgenauigkeit.



Zylinderschleifmaschine

8. Jahrhundert v. Chr.

Erste Drehmaschine in der primitivsten Form (Antrieb über Fiedelbogen später über Fußwippe)

1711 James Watt

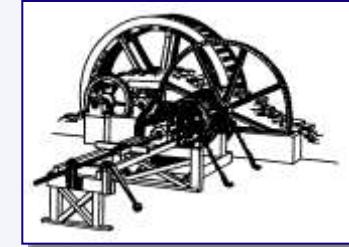
Weiterentwicklung der Dampfmaschine. Die Werkzeugmaschinen konnten nunmehr motorisch über Transmissionsswellen angetrieben werden.



Werkzeugmaschinenhalle

1774 John Wilkinson

Erste richtige Metallbearbeitungsmaschine bzw. Werkzeugmaschine. Diese Maschine bot eine relativ gute Arbeitsgenauigkeit, so daß Dampfmaschinenzylinder für James Watt auf ihr gebohrt werden konnten.



Zylinderschleifmaschine

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

1794 Henry Maudslay

Erste Bettdrehmaschine



Quelle: Science Museum/Science & Society Picture Library

Ende des 19. Jahrhunderts

Die Entwicklung der Standardwerkzeugmaschinen, wie Dreh, Hobel-, Stoß-, Bohr- und Fräsmaschine war im wesentlichen abgeschlossen.

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

Ende des 19. Jahrhunderts

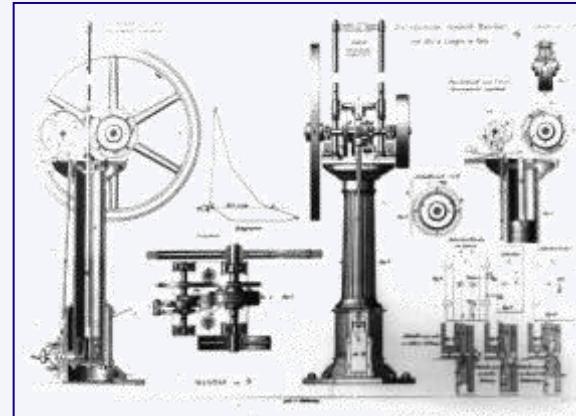
Die Entwicklung der Standardwerkzeugmaschinen, wie Dreh-, Hobel-, Stoß-, Bohr- und Fräsmaschine war im wesentlichen abgeschlossen.

Nicolaus August Otto

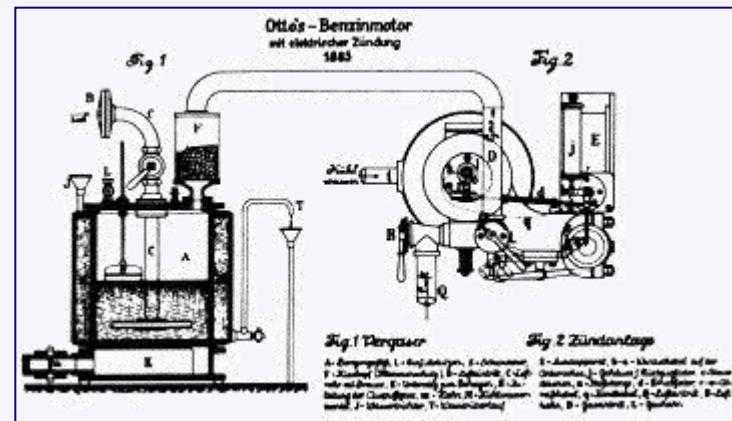
1864: Erfindung des atmosphärischen Gasmotors

1876: Erfindung des 4-Takt-Motors

Durch diese Erfindungen wurde die Dampfmaschine wegen ihres schlechten Wirkungsgrades abgelöst. Die Maschinen in den Produktionsstätten wurden jedoch weiterhin durch Transmissionswellen angetrieben



Atmosphärische Gaskraftmaschine



Oberflächenvergaser und Zündanlage
für Benzинmotoren 1885

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

1900 *Frederic Winslow Taylor*

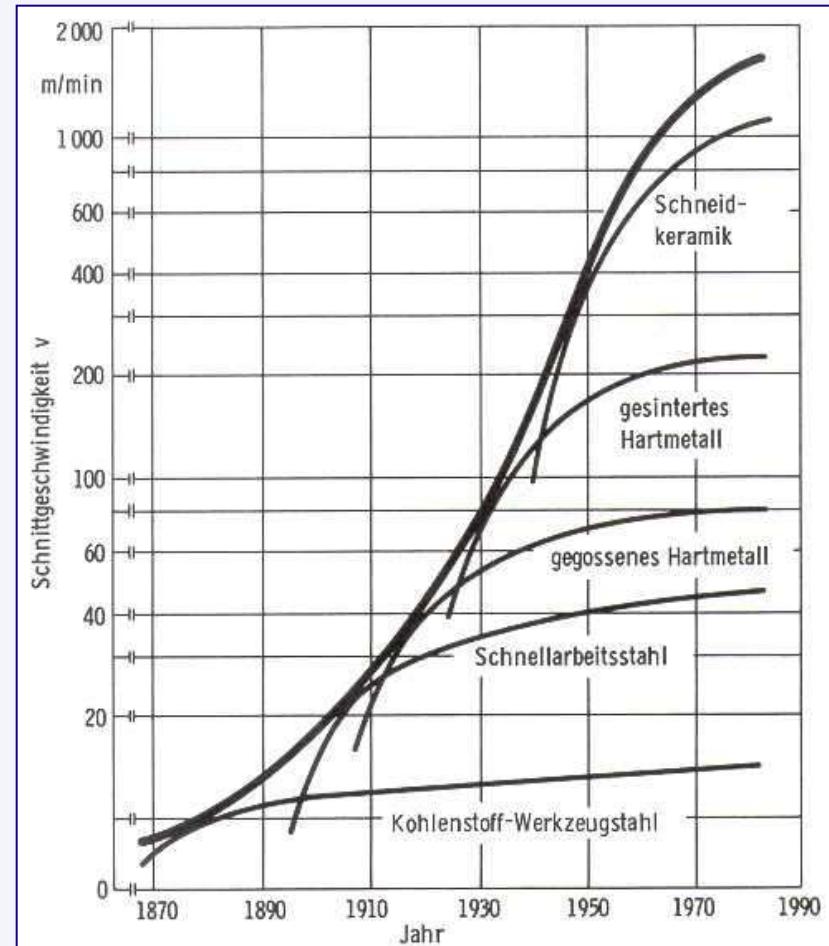
Entwicklung des Schnellarbeitstahls

Im Vergleich zum Kohlenstoff-Werkzeugstahl konnte die Schnittgeschwindigkeit um das 3 - 5fache gesteigert werden.



Neue Anforderungen an Werkzeugmaschinen

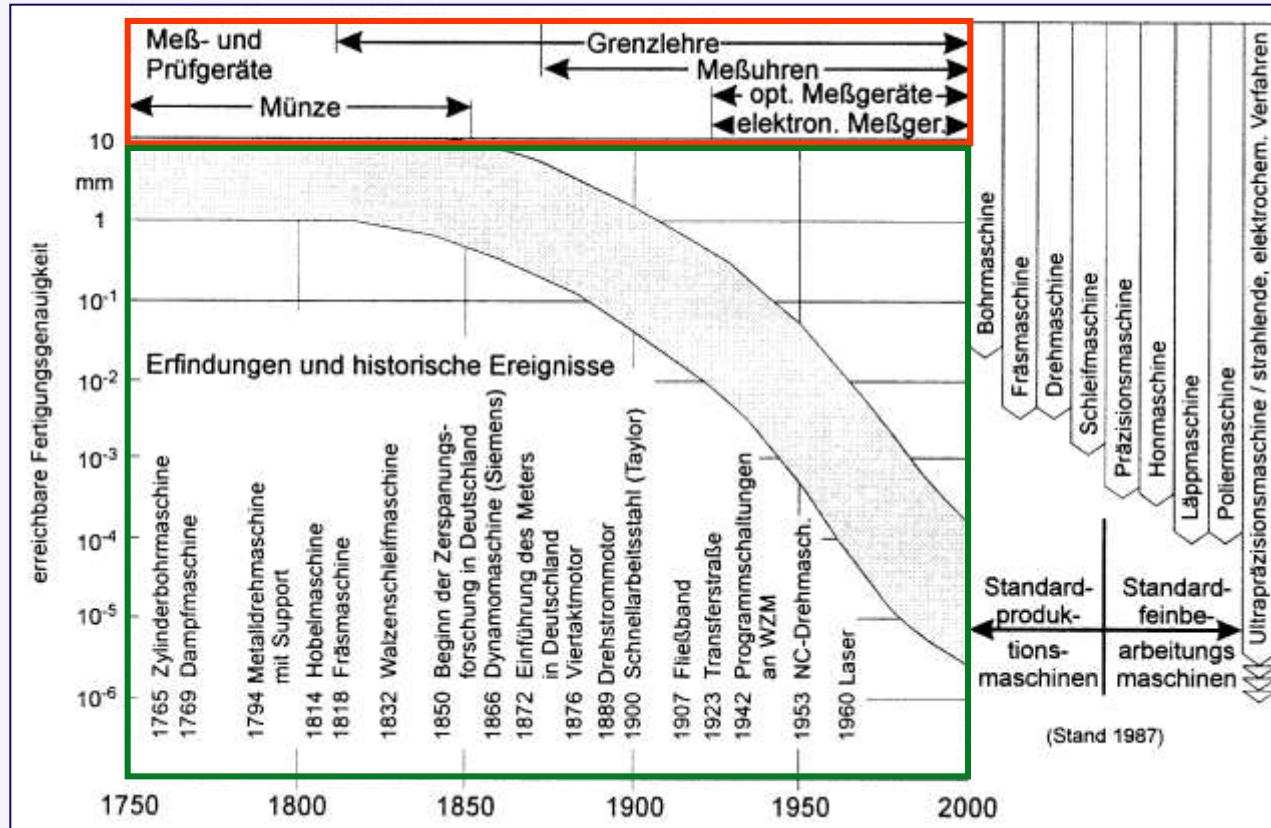
- höhere Antriebskräfte
- höhere Arbeitsspindeldrehzahl
- steifere, höher belastbare Führungen, Arbeitsspindeln und Gestellbauteile
- verbesserte Getriebe
- verbesserte Schwingungseigenschaften



Trendentwicklung der Schnittgeschwindigkeit beim Drehen
(Quelle: Weck, Werkzeugmaschinen)

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

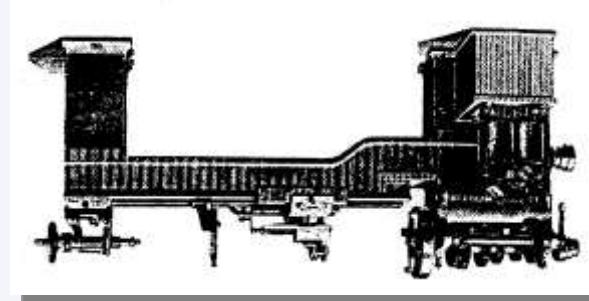
Parallel zur Verbesserung der **Fertigungsgenauigkeit** von Werkzeugmaschinen mussten auch entsprechende **Messmittel** zum Nachweis der Fertigungsqualität entwickelt werden.



Entwicklungsgeschichtlicher Überblick über die erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten von Werkzeugmaschinen (Quelle: Weck, Werkzeugmaschinen)

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

Die Drehmaschine aus dem **Jahre 1925** ist mit einem eigenem Elektromotor ausgestattet. Die Transmissionswellen wurden überflüssig.



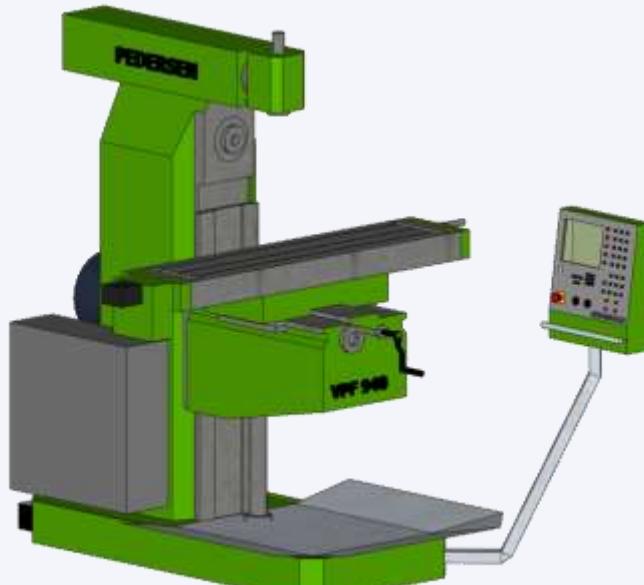
Drehmaschine mit eigenem Antrieb

Die Kopierdrehmaschine von **1954** ist mit einer hydraulischen Nachformeinrichtung ausgestattet. Diese Einrichtung ermöglicht es beliebige Werkstückkonturen automatisch, durch abtasten einer Schablone, herzustellen.



Kopierdrehmaschine, 1954

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen



Universal-Konsolständerfräsmaschine

Das Bearbeitungszentrum aus dem **Jahre 1990** weist als äußeres Merkmal eine völlige Kapselung auf. Durch den Einsatz von Werkzeugspeicher und automatischen Werkzeugwechsel können auf dieser Maschine aufwendige Werkstücke komplett bearbeitet werden. Die NC-Steuerung ist auf Mikroprozessorbasis aufgebaut und anwenderfreundlich gestaltet (z.B. graphische Bedienoberfläche, Fehlerdiagnose für den NC-Code, allg. Diagnose- und Überwachungsfunktionen).

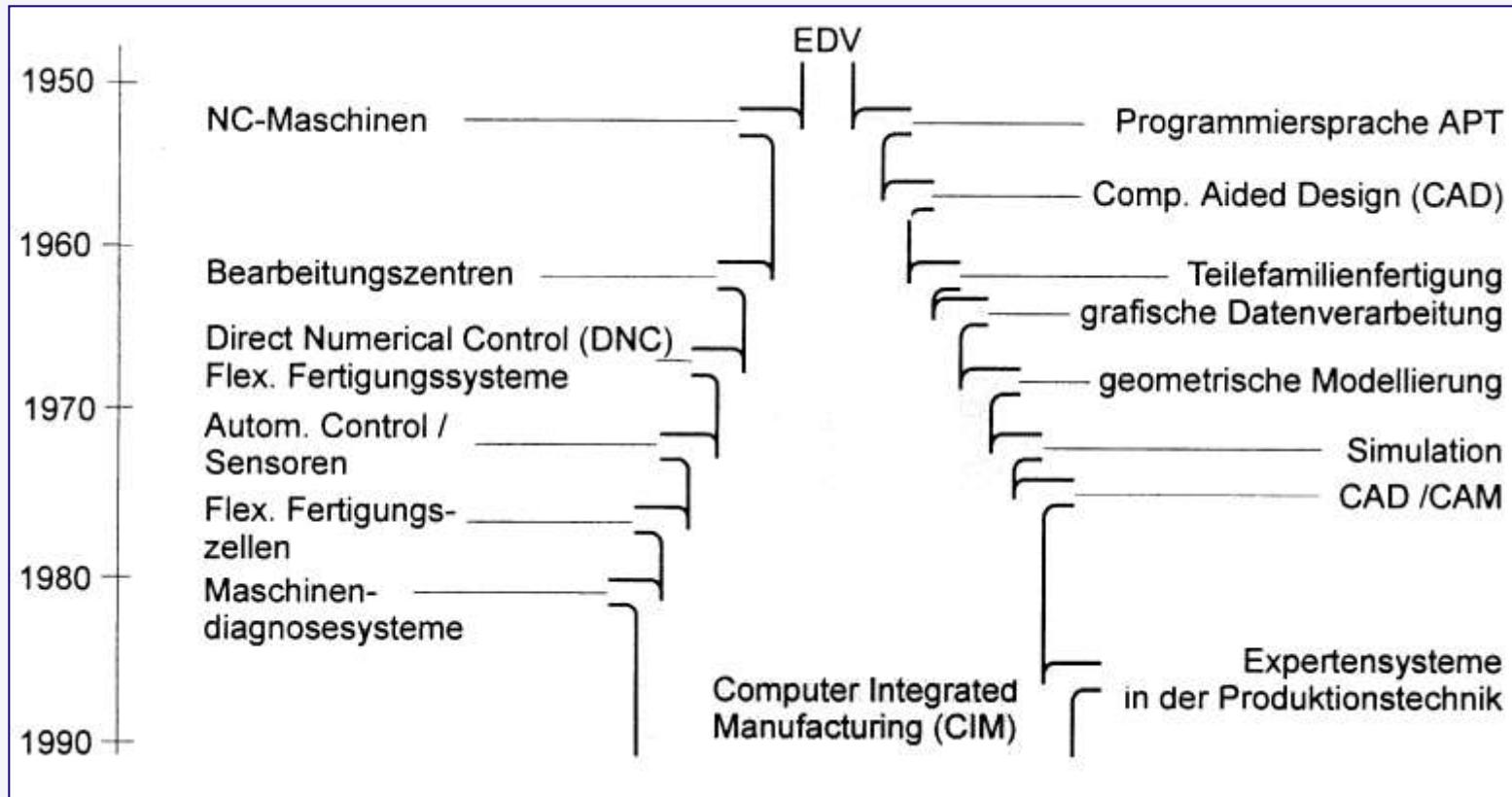
In den **siebziger Jahren** wurden die Werkzeugmaschinen zunehmend numerisch gesteuert. Die Maschinen erhielten über Lochstreifen oder Magnetkassetten ihre Steuerungsbefehle. Der Befehlsdatensatz (NC-Programm) konnte an einem separaten Arbeitsplatz offline oder an dem Bedienfeld der Werkzeugmaschine während der Bearbeitung eines anderen Werkstückes erstellt werden.



Bearbeitungszentrum Lasercav, 1990

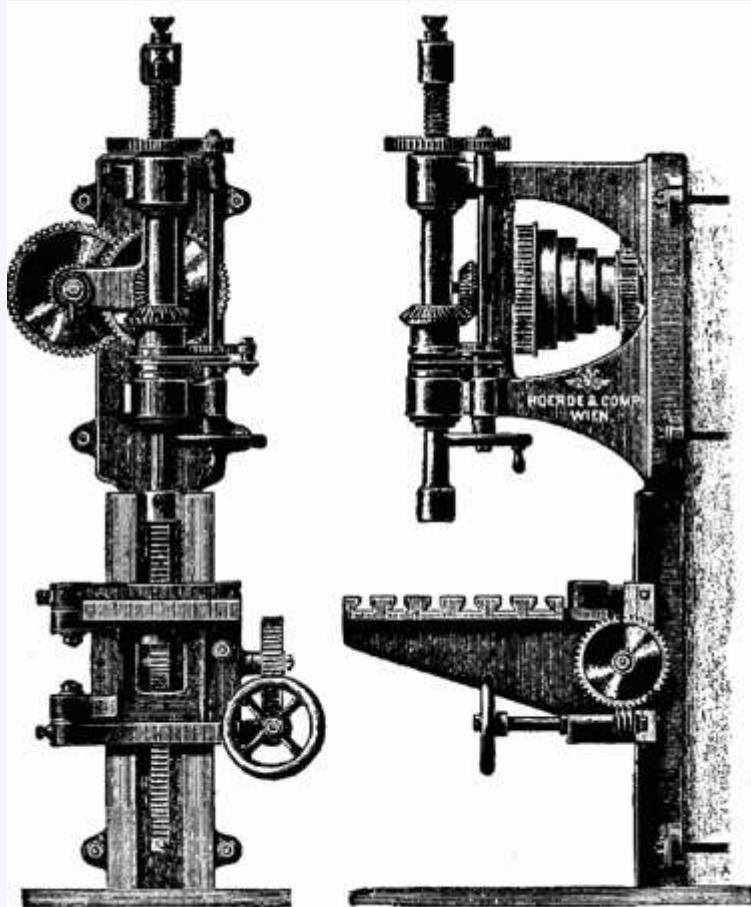
Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

Rechnerintegration in Maschinen und Fabrik



Quelle: Prof. Uhlmann, iwf

Werkzeugmaschinen – Früher und Heute

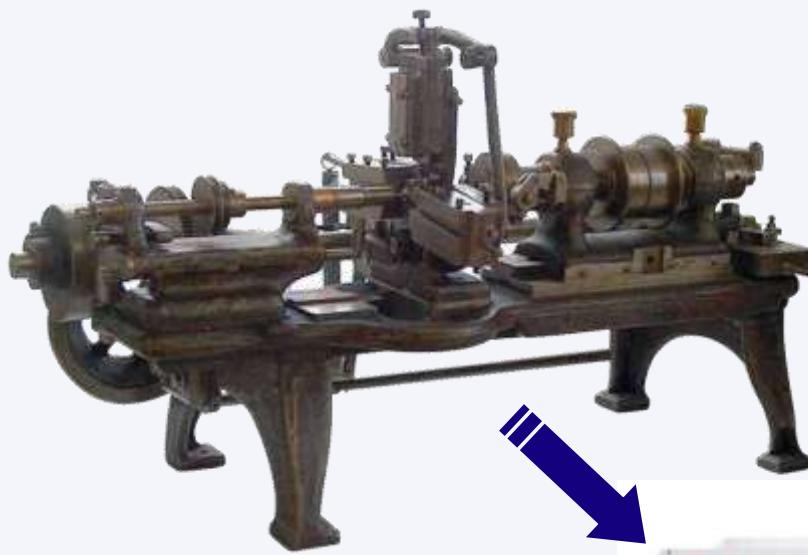


Historische Ständerbohrmaschine
Quelle: Wikipedia



Ständerbohrmaschine

Werkzeugmaschinen – Früher und Heute



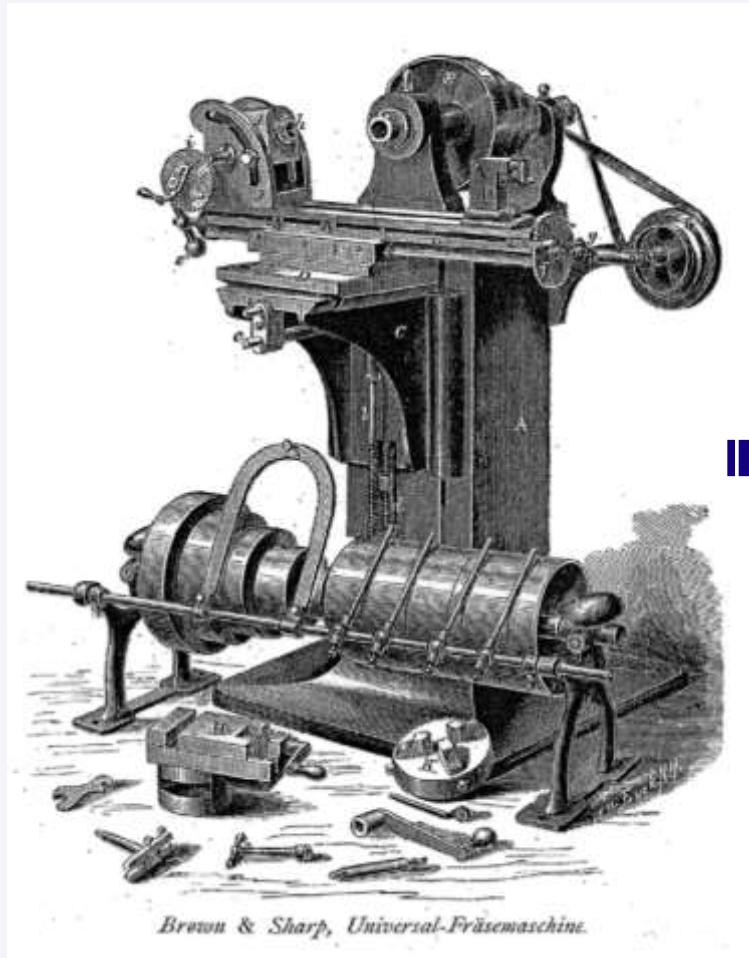
Drehmaschine Junker 1900

Quelle: decomagazine (www.decomag.ch)

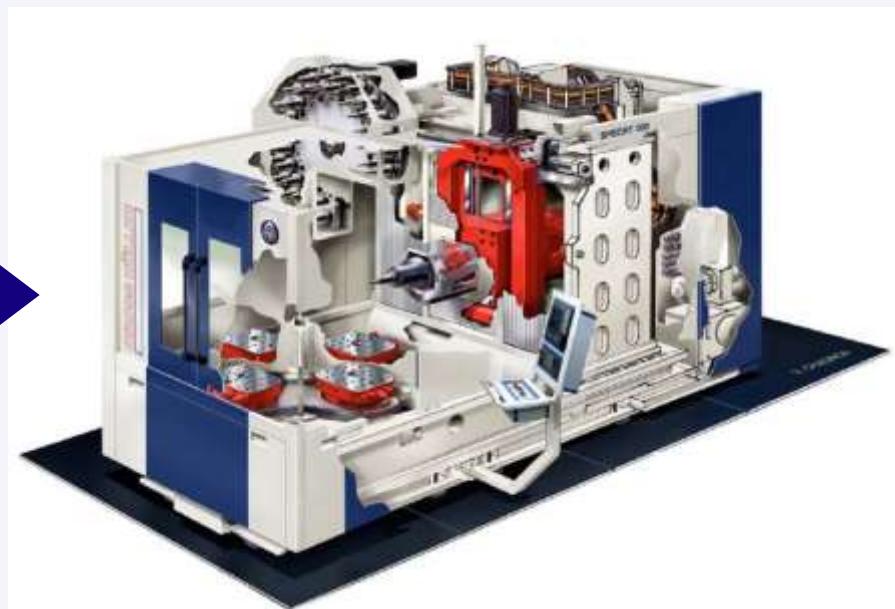
Horizontaldrehmaschine MAG Boehringer
Quelle: www.mag-ias.com



Werkzeugmaschinen – Früher und Heute



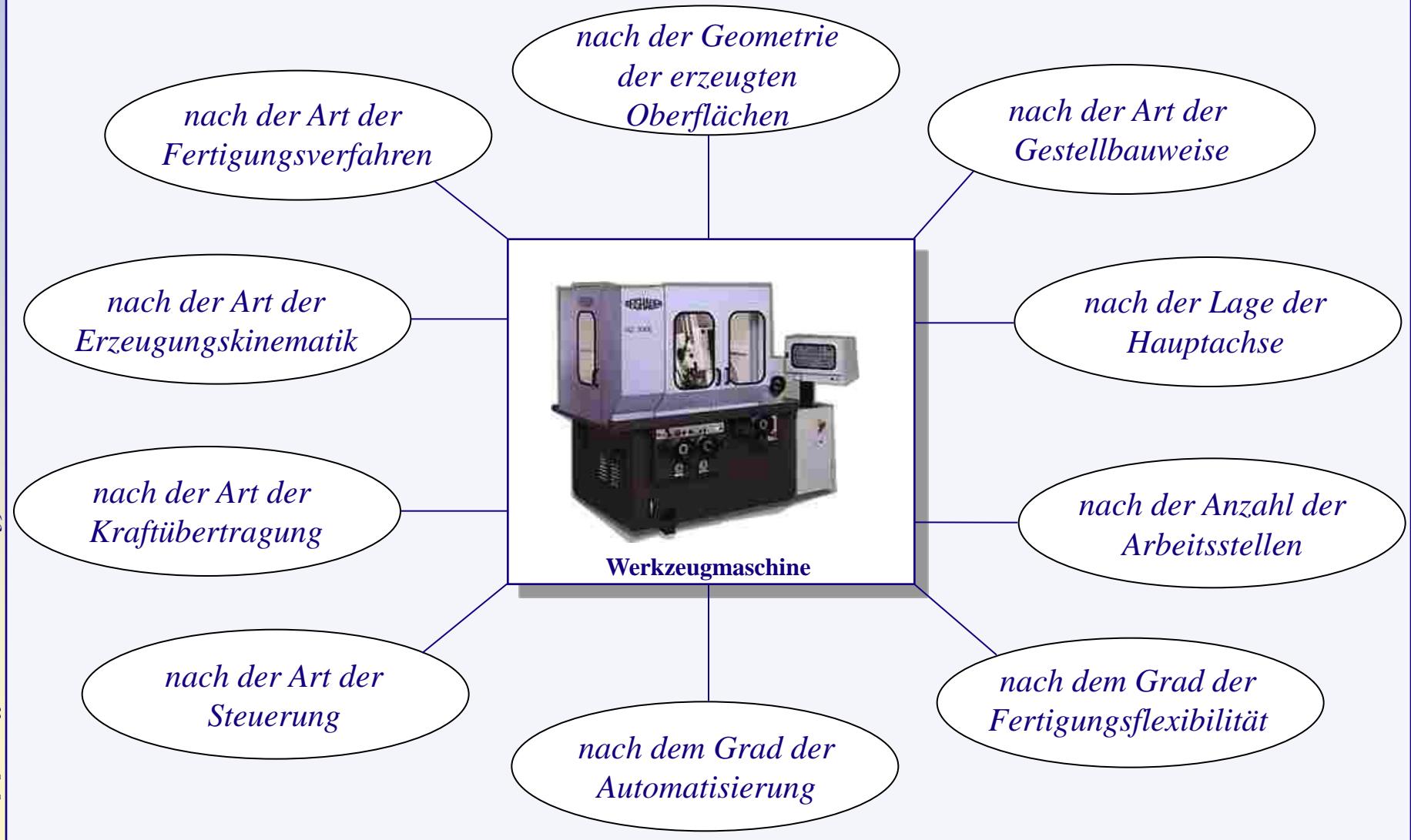
Universalfräsmaschine um 1870



Fräsbearbeitungszentrum (MAG Hüller-Hille)

Fragen

Einteilungskriterien von Werkzeugmaschinen



Einteilung nach *der Geometrie der erzeugten Oberflächen*

Planwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung ebener Oberflächen
Planfrä-, Planschleif-, Plandrehmaschinen

Rundwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung rotationssymmetrischer Oberflächen
Rundfrä-, Rundschleif-, Runddrehmaschinen

Schraubenwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung schraubenförmiger Oberflächen
Gewindeschneid-, Gewindefrä-, -schleifmaschine

Zahnflankenwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung von Zahnflanken an Bauteilen
Zahnflankenfrä-, Zahnflankenstoß-, Zahnflankenschleifmaschinen

Universalwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung beliebig geformter Oberflächen
Universaldreh-, Universalfräsmaschine

Einteilung nach *der Art der Erzeugungskinematik*

Erzeugungskinematik ist die geometrieerzeugende Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Sie besteht aus einer Haupt- und Vorschubbewegung

Kinematik der Hauptbewegung

WZM* mit geradliniger Hauptbewegung

Hobel-, Stoßmaschinen, Bügel-, Bandsägen

WZM mit kreisförmiger Hauptbewegung

Dreh-, Bohr-, Frä-, Kreissägenmaschinen

WZM mit beliebiger Hauptbewegung

Honmaschinen, Läppmaschinen

WZM mit einachsiger Vorschubbewegung

Bohrmaschinen

WZM mit zweiachsiger Vorschubbewegung

Drehmaschinen

WZM mit dreiachsiger Vorschubbewegung

Fräsmaschinen

*WZM = Werkzeugmaschinen

Einteilung *nach der Art der*

Gestellbauweise

Bett-Bauweise
Ständer-Bauweise
Portal-Bauweise
Front-Bauweise
Tisch-Bauweise
Säulen-Bauweise
Konsol-Bauweise
Brücken-Bauweise

Arbeitsstellen

Einspindel-WZM
Mehrspindel-WZM

Einschlitten-WZM
Mehrschlitten-WZM

Einstufen-WZM
Mehrstufen-WZM

Lage der Hauptachse

Waagerecht-Werkzeugmaschinen
Senkrecht-Werkzeugmaschinen

Steuerung

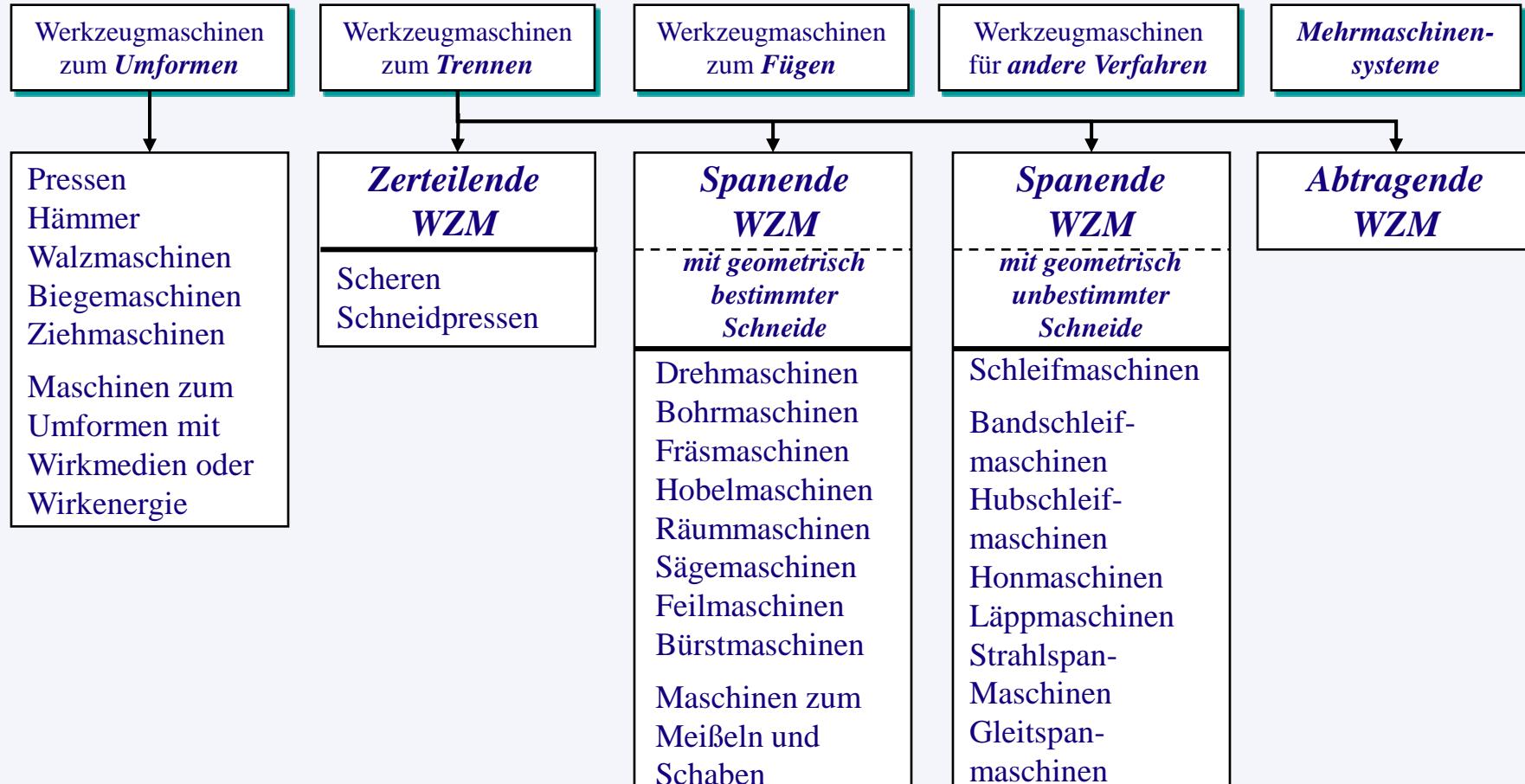
Funktionaler Aufbau der Steuerung:
•mechanisch
•hydraulisch
•pneumatisch
•elektrisch

Art der Programmsteuerung
•Kurvensteuerung
•numerische Steuerung

Kraftübertragung

Trennung nach Haupt- und Vorschubantrieb,
Energie kann dem Wirkpaar zugeführt werden:
•mechanisch
•hydraulisch
•pneumatisch
•elektrisch

Einteilung nach DIN 69651

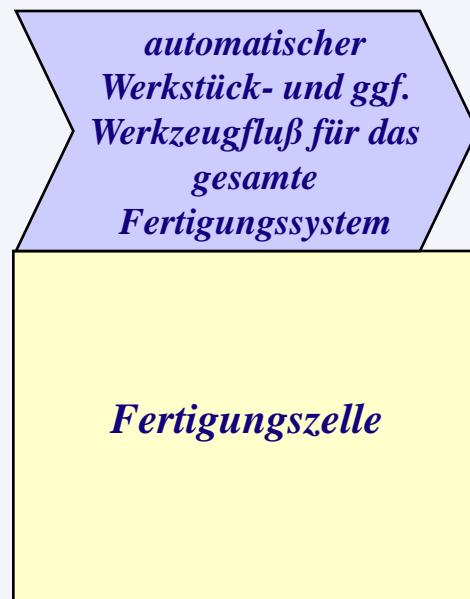
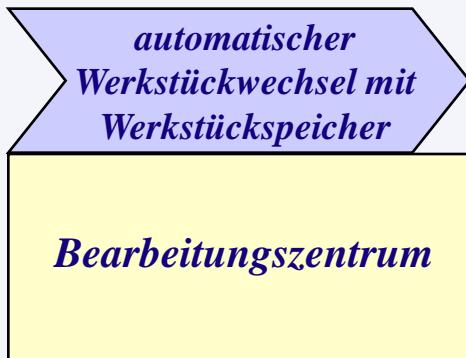


Einteilung nach *dem Automatisierungsgrad*

Einzelmaschinen



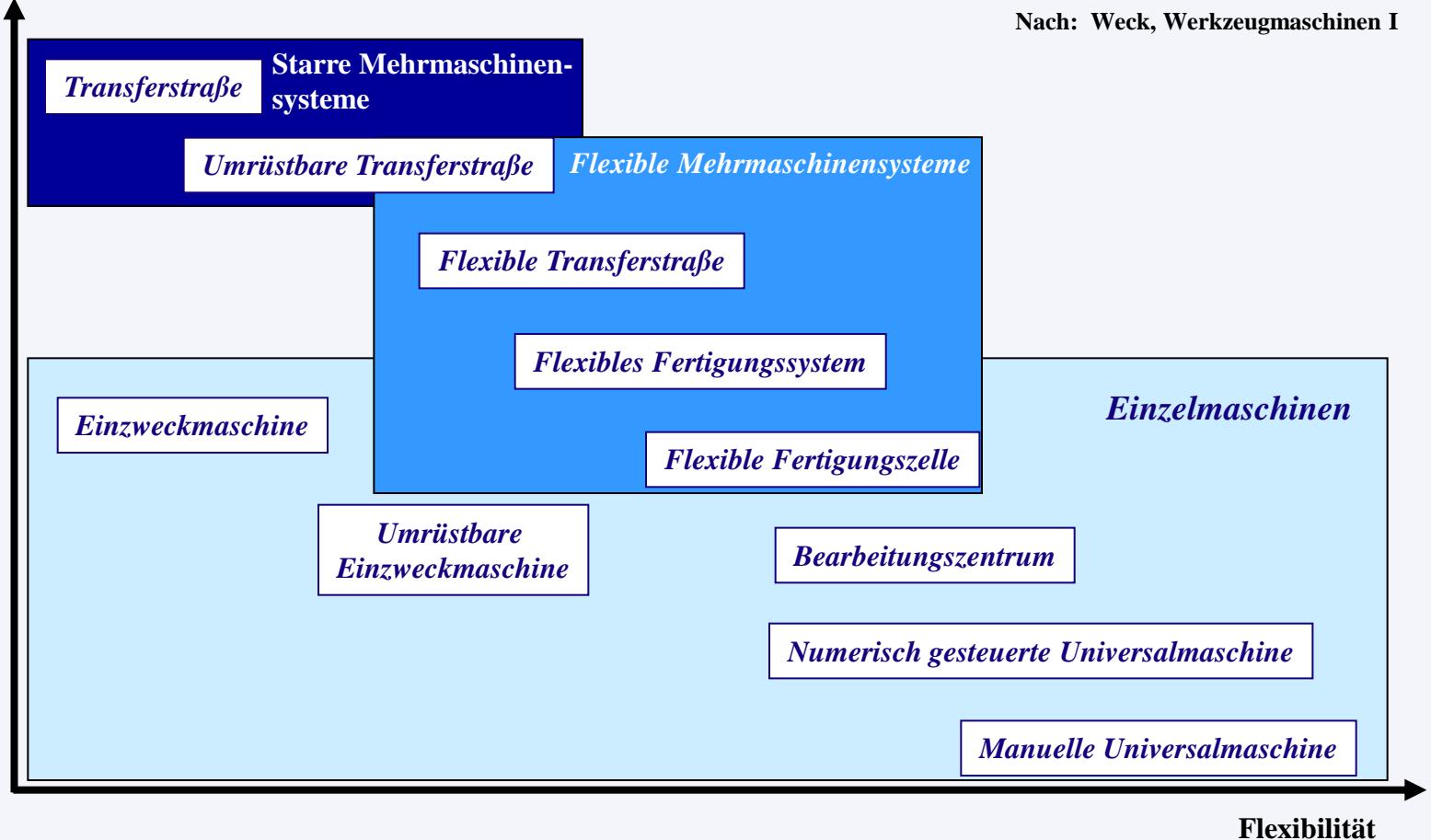
Mehrmaschinen- systeme



Einteilung nach *dem Grad der Flexibilität*

Produktivität

Nach: Weck, Werkzeugmaschinen I



Prinzipieller Aufbau einer Werkzeugmaschine

Hauptantrieb



Hauptspindel



Führungen



Vorschubantrieb



Gestell



Werkzeug

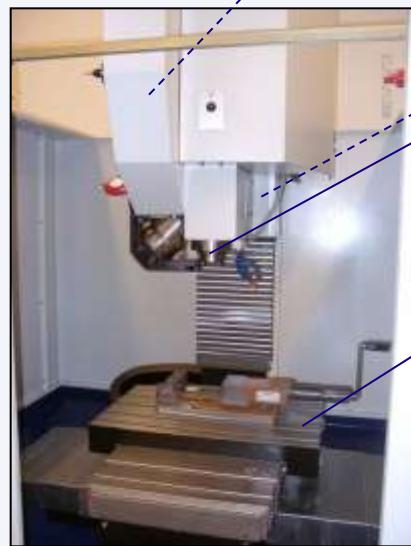


Aufbau einer Werkzeugmaschine am Beispiel eines Bearbeitungszentrums

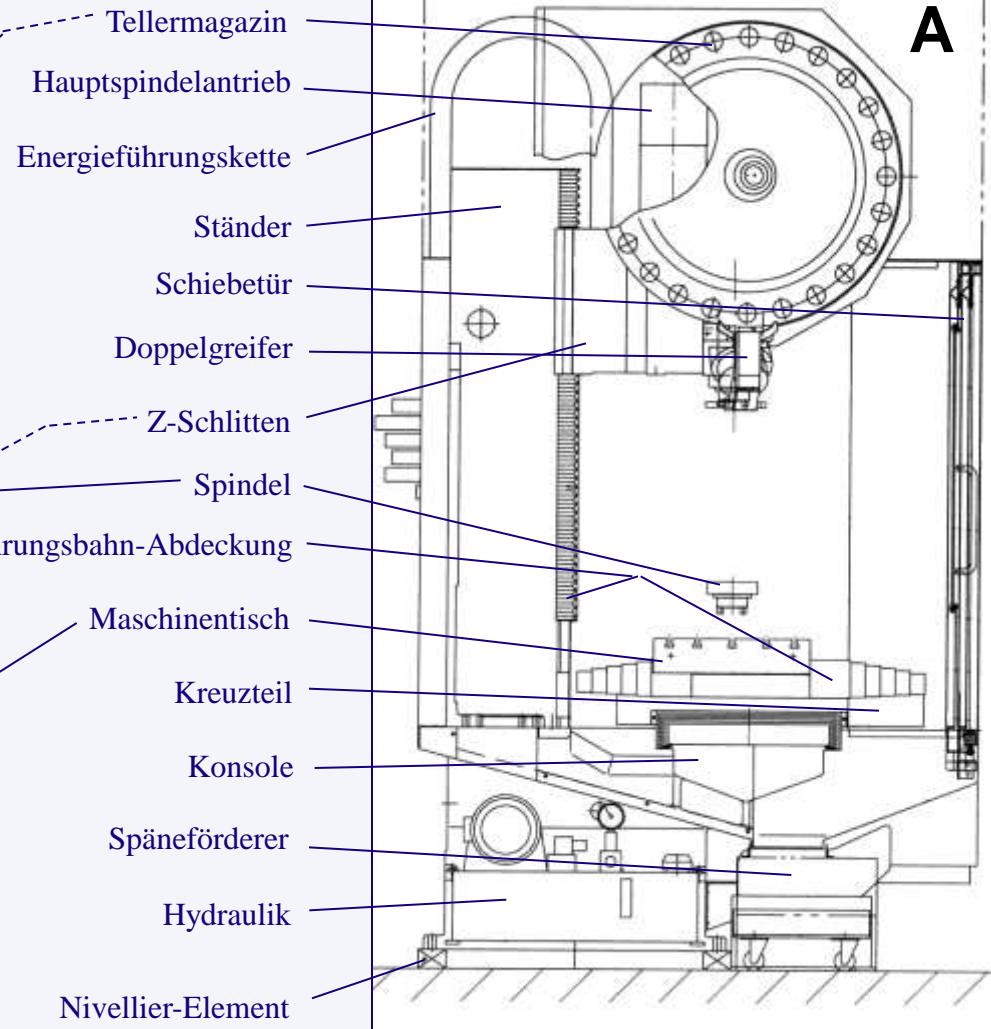
A



Alzmetall



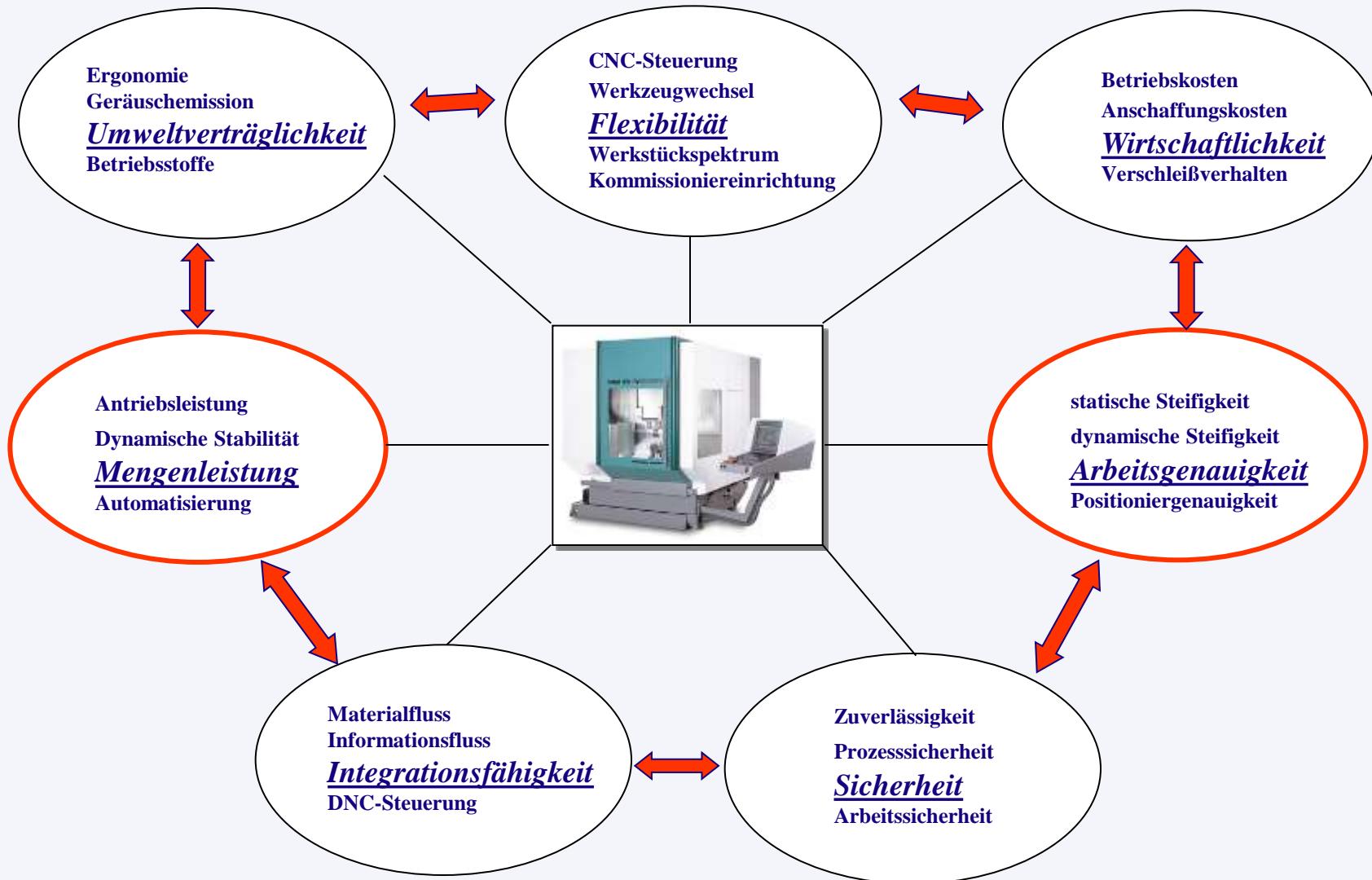
Bauraum



A

Anforderungen an Werkzeugmaschinen

Allgemeine Anforderungsschwerpunkte für Werkzeugmaschinen



Arbeitsgenauigkeit und Fertigungsgenauigkeit

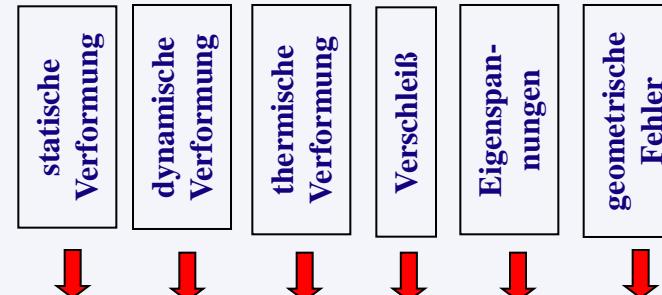
Fertigungsgenauigkeit: Toleranzen, die vom Konstrukteur für ein Bauteil hinsichtlich Abmessungen, Formen und Oberflächen verlangt werden.



Die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine sollte um den Faktor 10 genauer sein, als die verlangte Fertigungsgenauigkeit des Werkstückes.

Arbeitsgenauigkeit: maschinenspezifisch = die von einer Werkzeugmaschine bei der Bearbeitung maximal erreichbare Genauigkeit.

Störeinflüsse auf die Arbeitsgenauigkeit einer WZM



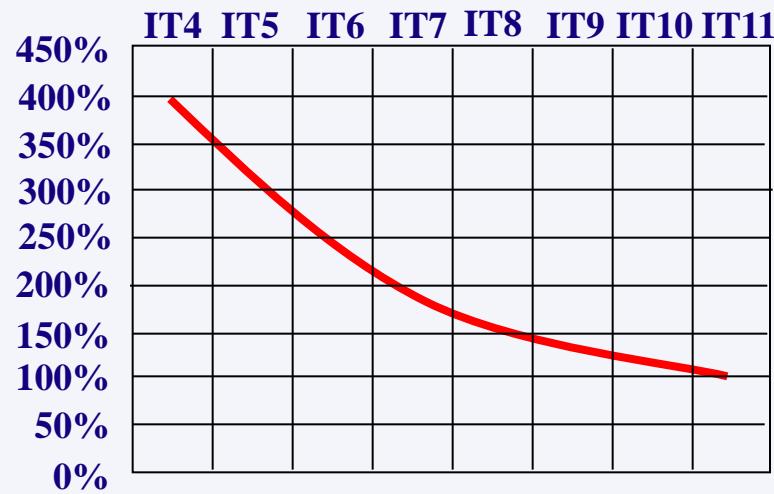
Material
Energie
Information



Material
Energie
Information

Arbeitsgenauigkeit: Einfluß der Toleranzbereiche auf die Fertigungskosten

Fertigungskosten



Grundsätzlich sollte die Fertigungsgenauigkeit eines Werkstückes so grob wie möglich - so genau wie nötig gewählt werden!

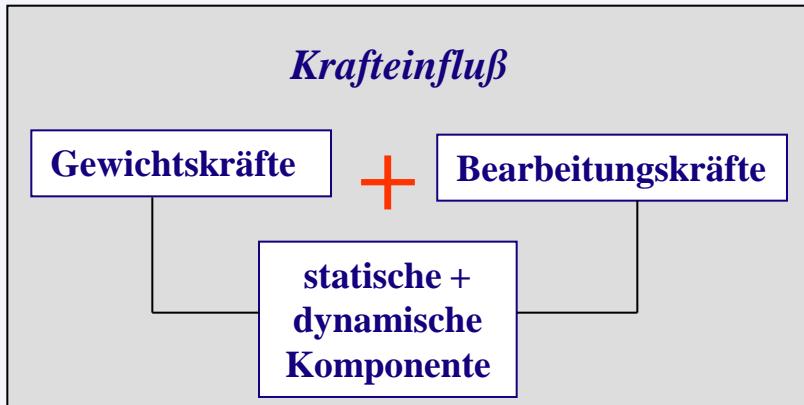
Toleranzklasse	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11
Toleranz in mm bei Sollmaß 250 bis 315 mm	0,016	0,023	0,032	0,052	0,081	0,13	0,21	0,32
erreichbare Genauigkeit								
Hauptgruppe Fertigungsverfahren								
Umformen	Gesenkformen							
Umformen	Walzen							
Umformen	Kaltfließpressen							
Umformen	Tiefziehen							
Trennen	Scherschneiden (Blech)							
Trennen	Feinschneiden (Blech)							
Trennen	Drehen							
Trennen	Bohren							
Trennen	Reiben							
Trennen	Fräsen							
Trennen	Rundschleifen							

Legende

bestenfalls erreichbare Genauigkeit

erreichbare Genauigkeit

Arbeitsgenauigkeit: Verformung der WZM durch Krafteinfluß



Statische Belastung:

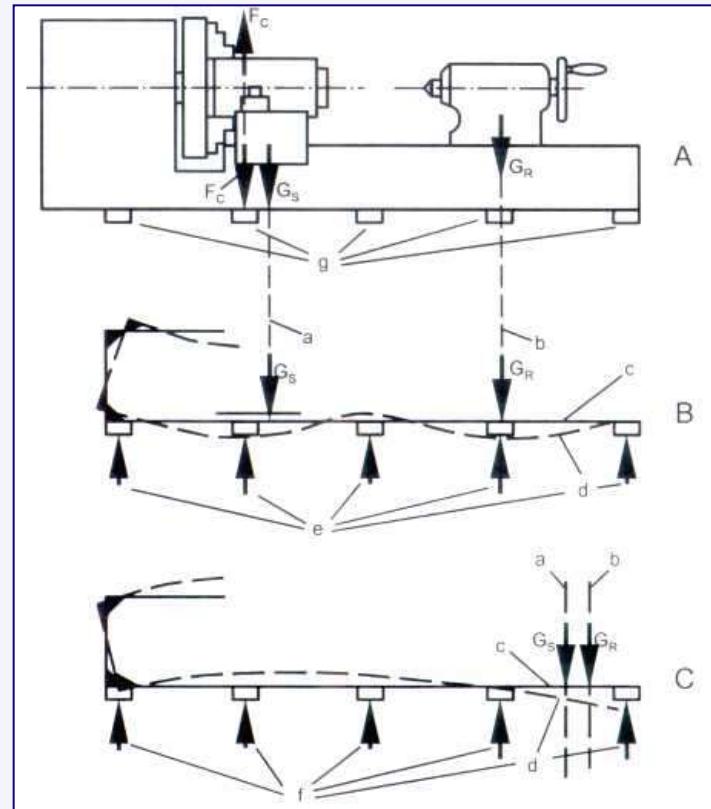
Folge:

- Geometriefehler

Dynamische Belastung (z.B. bei stoßartigem Meßbeleingriff)

Folgen:

- Verschlechterung der Maßgenauigkeit
- Verschlechterung der Oberflächengenauigkeit
- Verringerung der Standzeit des Werkzeugs
- Verringerung der Einsatzdauer der Maschine

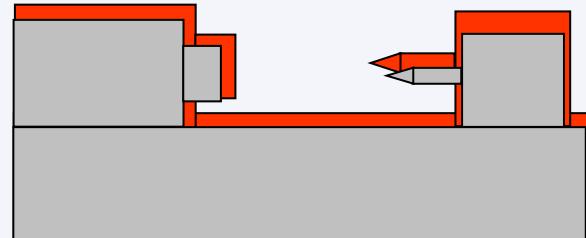


Verformung einer Schwerdrehmaschine durch Eigengewichte (Quelle: Saljé)

Arbeitsgenauigkeit: Verformung der WZM durch Wärmeeinfluss

Eine ungleichmäßige Wärmeverteilung innerhalb einer WZM führt zu einer ungleichmäßigen thermischen Ausdehnung der einzelnen Bauteile.

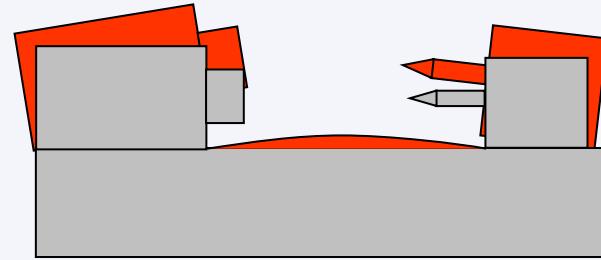
Durch konstruktive Maßnahmen muss die Verformung gefährdeter Bauteile so gering wie möglich gehalten werden.



Gleichmäßige Erwärmung aller Bauteile

Hauptwärmequellen

- *Zerspanprozess*
- *innere Wärmequellen*: Reibungswärme (Lager, Getriebe usw.)
- *äußere Wärmequellen*: Späne, Kühlsmiermittel, Sonneneinstrahlung usw.



Ungleichmäßige Erwärmung mit maximalen Temperaturen an der Spindellagerung und am Maschinenbett

Quelle: nach Bruins

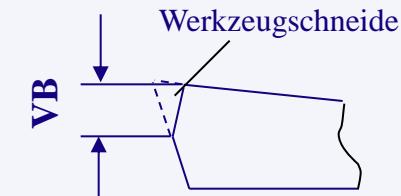
Arbeitsgenauigkeit: Verschleiß

Kurzzeitverschleiß: Durch den Verschleiß des Werkzeuges kommt es zu einem Versatz der Werkzeugschneide und somit zu einer Arbeitsgenauigkeit. Weiterhin wird die Maschine durch erhöhte Schnittkräfte und -temperaturen verstärkt belastet.

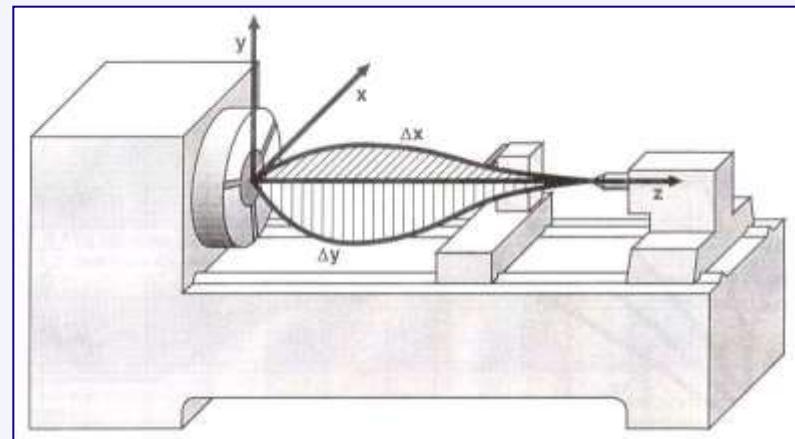
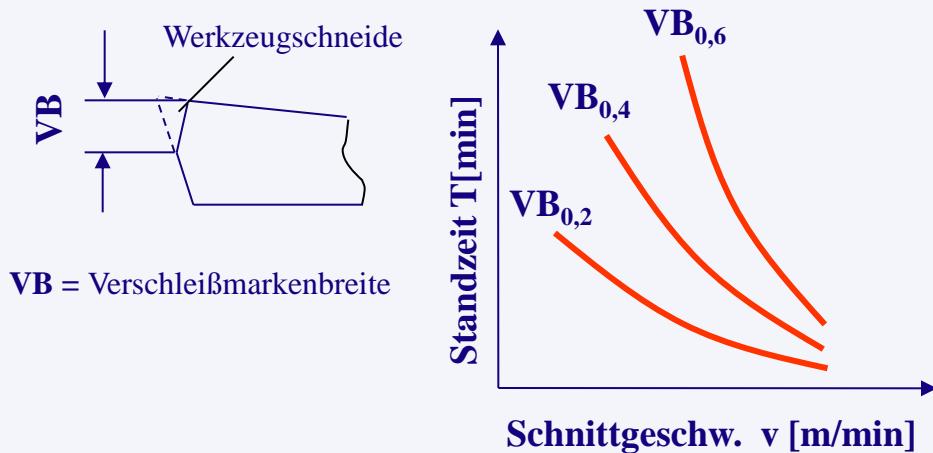
Abhilfe: rechtzeitiges Austauschen des Werkzeugs bei Erreichen der Standzeit

Langzeitverschleiß: Lagerungen und Führungen verschleißt. Die Folge ist Spiel, welches die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine nachhaltig beeinflusst.

Abhilfe: verschleißarme und nachstellbare Führungen, gute Schmierung, beschichtete Führungen



VB = Verschleißmarkenbreite



Langzeitverschleiß der Führungen und Lager (Quelle: Weck)

Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Arbeitsgenauigkeit



Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit

- hohe Herstellgenauigkeit der Bauteile einer WZM
- hohe statische und dynamische Steifigkeit
- günstiges thermisches Verhalten
- spielfreie Lager und Führungen
- stoßfreie und ausgewuchtete Antriebe
- genaue Wegbegrenzung
- Einbau von Kühlungen für Antriebe und Hydraulik
- angepasste Werkstückspannung (Steifigkeit, Genauigkeit)
- selbstdäigtes Messen in der Maschine
- Messen nach der Bearbeitung und Korrektur der Maschineneinstellung
- Verwendung von Kompensationsalgorithmen

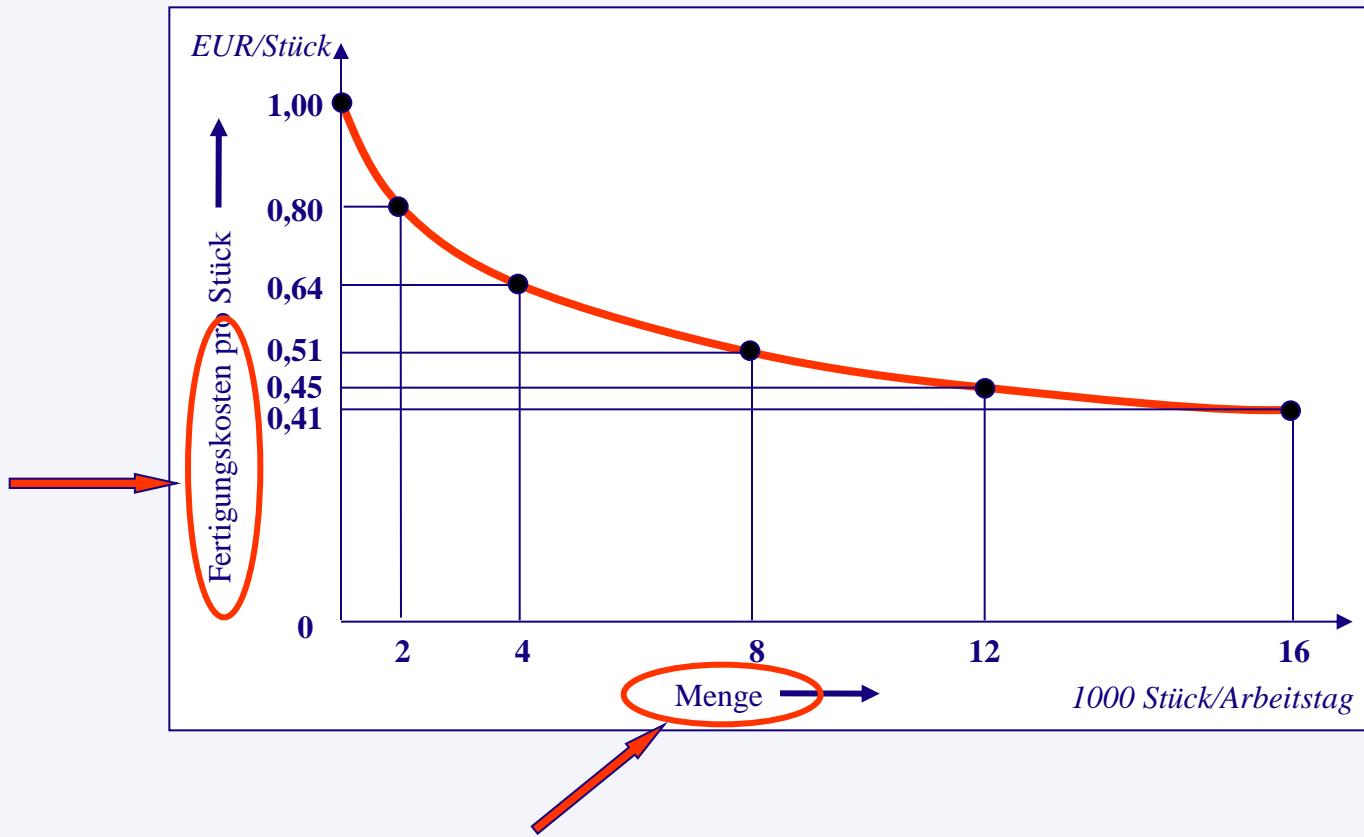


Maßnahmen zur Erhaltung der Arbeitsgenauigkeit

- Verschleißfeste und nachstellbare Lager und Führungen
- selbstdäigige Schmierung
- Überlastungssicherungen
- hohe dynamische Steifigkeit
- gute Reinigungsmöglichkeiten
- Späneschutz
- gehärtete Führungselemente
- ausreichende Dimensionierung der Bauelemente
- auswechselbare Verschleißteile

Mengenleistung

Mengenleistung und Fertigungskosten

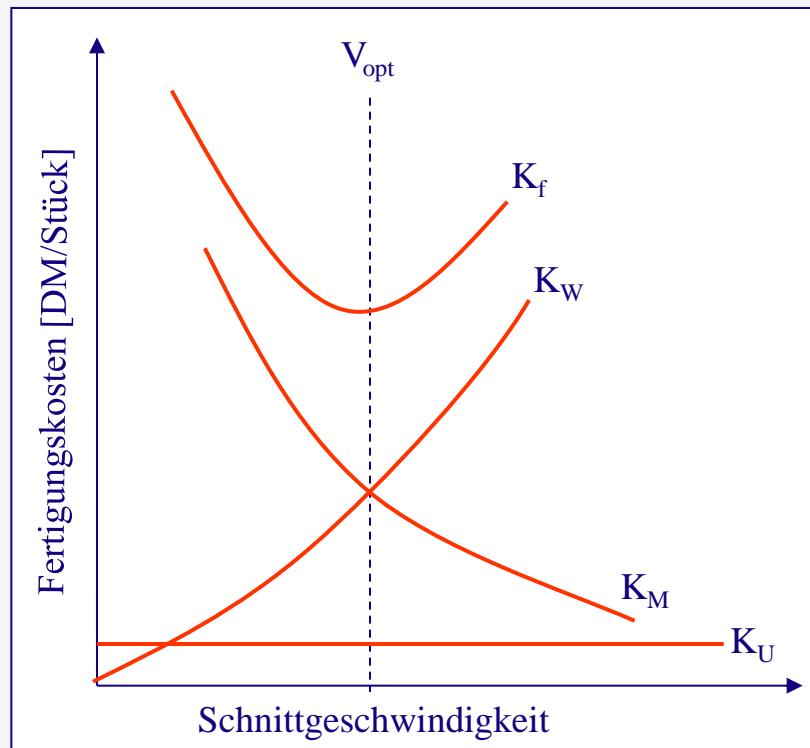


Quelle: Prof. Reinhart, iwb

Mengenleistung: Fertigungskosten

Die Fertigungskosten werden hauptsächlich durch folgende Faktoren beeinflusst:

- eingesetztes Fertigungsmittel
- technologische Werte der Zerspanung (z.B. Schnittgeschwindigkeit)
- geforderte Genauigkeit
- Stückzahlen



K_f : Fertigungsgesamtkosten
 K_w : Werkzeugkosten
 K_m : Lohn- und Maschinenkosten
 K_u : von der Schnittgeschwindigkeit unabhängige Kosten

Fertigungskosten bei der Zerspanung in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit (Quelle: Sautter, Fertigungsverfahren)

Mengenleistung

$$\text{Mengenleistung} = \frac{\text{Auftragsmenge}}{\text{Belegungszeit}} = \frac{m}{T_{bB}}$$

Belegungszeit
 T_{bB}

Betriebsmittel-
Rüstzeit
 t_{rB}

Betriebsmittel-
Ausführungszeit
 $t_{aB} = m t_{eB}$

Betriebsmittel-
zeit je Einheit
 t_{eB}

Betriebsmittel-
Rüstgrundzeit
 t_{rgB}

Betriebsmittel-
Rüstverteilzeit
 t_{rvB}

Betriebsmittel-
Grundzeit
 t_{gb}

Betriebsmittel-
Verteilzeit
 t_{vB}

Hauptnutzungszeit
 t_h

Nebennutzungszeit
 t_n

Brachzeit
 t_b

Quelle: REFA

Mengenleistung: Beschreibung der Teilzeiten

Belegungszeit T_{bB} : Vorgabezeit für die Belegung des Betriebsmittels durch den Auftrag

Betriebsmittel-Rüstzeit t_{rB} : Vorgabezeit für das Belegen eines Betriebsmittels durch das Rüsten bei einem Auftrag

Betriebsmittel-Ausführungszeit $t_{aB}=mt_{eB}$: Vorgabezeit für das Belegen eines Betriebsmittels durch die Menge m eines Auftrages

Betriebsmittelzeit je Einheit t_{eB} : Vorgabezeiten für die Belegung eines Betriebsmittels bei der Mengeneinheit 1 (t_{eB}), 100 (t_{eB100}) bzw. 1000 (t_{eB1000})

Betriebsmittel-Grundzeit t_{gb} : Summe der Sollzeiten aller Ablaufschritte, die für die planmäßige Ausführung eines Ablaufs durch das Betriebsmittel erforderlich sind.

Betriebsmittel-Rüstverteilzeit t_{rvB} : Summe der Sollzeiten aller Ablaufschritte, die zusätzlich zur planmäßigen Ausführung eines Ablaufes erforderlich sind.

Hauptnutzungszeit t_h : Summe aller Zeiten, in denen das Werkzeug am Werkstück die beabsichtigte Veränderung vollzieht.

Nebennutzungszeit t_n : Summe aller Zeiten, in denen am Werkstück mittelbare Fortschritte im Sinne des Auftrages, aber keine Formänderung bewirkt werden (Einspannen, Messen, Eilbewegung des Schlittens usw.)

Brachzeit t_b : Summe aller Zeiten, in denen die Nutzung des Arbeitsmittels planmäßig unterbrochen ist.

Mengenleistung: Maßnahmen zur Verkürzung der Belegungszeit

Hauptzeit

- Verwendung verbesserter Schneidstoffe
- Erhöhung der Antriebsleistung
- optimale Anpassung der Drehzahl- und Vorschubeinstellung
- gleichzeitige Mehrschnittbearbeitung
- gleichzeitige Mehrstückbearbeitung

Verteilzeit

- unfallsichere Gestaltung
- Überlastsicherungen, Verriegelungen
- Verwendung zuverlässiger Bauelemente
- guter Späneablauf, Spänefall, großer Späneraum
- gute Reinigungsmöglichkeiten
- selbsttätige Schmierung

Nebenzeit

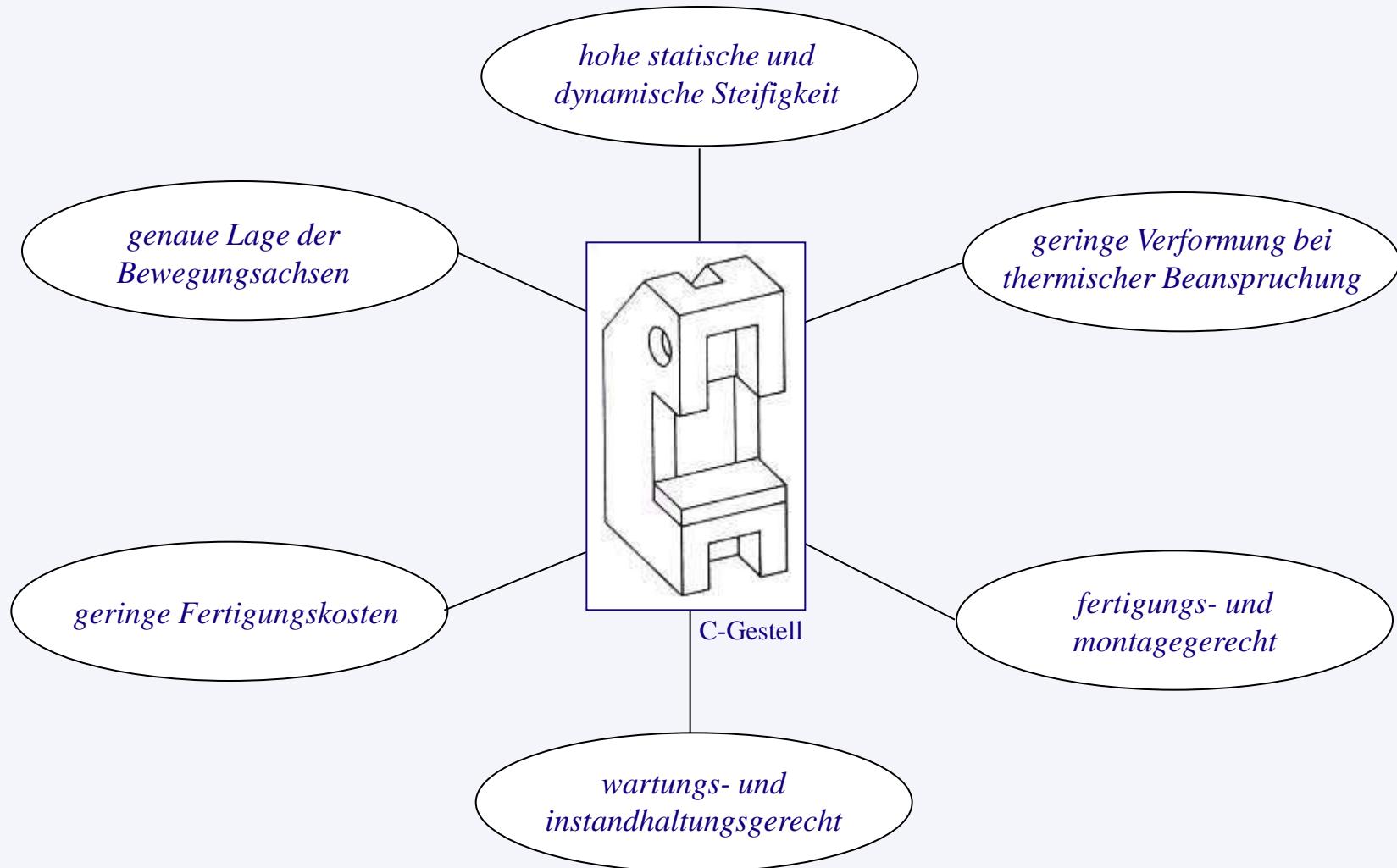
- Mechanisiertes Spannen (elektrisch, hydraulisch, pneumatisch)
- Zuführ-, Lade- und Entladeeinrichtungen
- Schnellwechselwerkzeughalter
- schwenkbare Werkzeugspeicher (Revolverköpfe)
- selbsttätiger Werkzeugwechsel mit Werkzeugspeicher
- selbsttätigtes Messen während der Bearbeitung
- Hohe Anlaufbeschleunigung und kurze Bremszeit

Rüstzeit

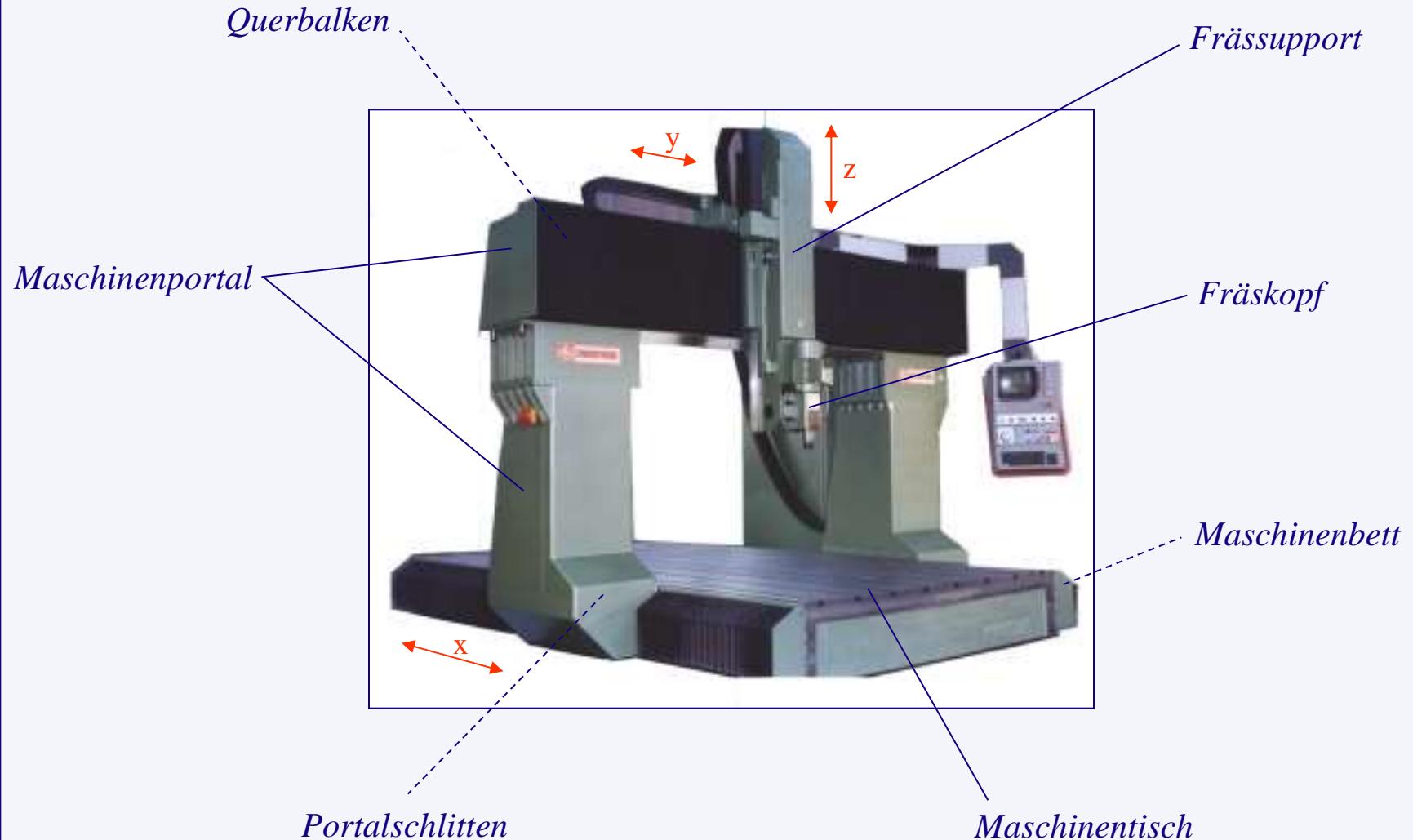
- Einrichtungen zur Werkzeugvoreinstellung
- Schnellwechsel-Werkzeughalter
- Schnellwechsel-Werkstückspanneinrichtungen
- austauschbare Werkzeugträger (z.B. Revolverköpfe)
- gute Zugänglichkeit beim Einrichten
- einfache austauschbare Programmspeicher
- CNC-Steuerung
- Werkstattorientierte Programmierung
- Off-line-Programmierung

Gestelle und Gestellbauteile

Anforderungen

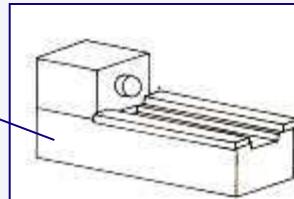


Gestellbauteile einer Portalfräsmaschine (Gantry-Bauweise)



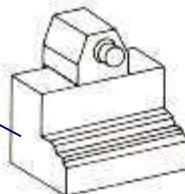
Gestellbauformen für Drehmaschinen (spanende Werkzeugmaschinen)

Flachbettausführung
(konventionell)

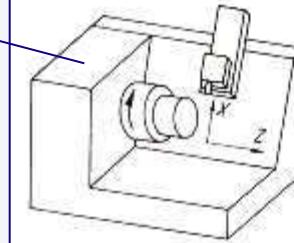


Frontbettausführung
Vorteil:

ein automatisierter Werkstückwechsel ist relativ einfach zu realisieren



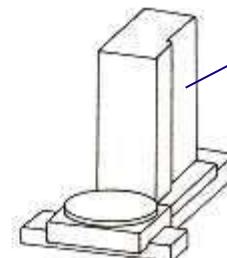
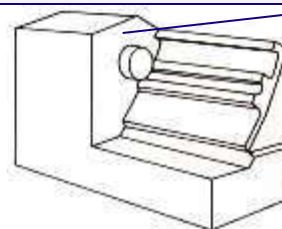
Waagerechtausführung
(Spindel liegt parallel zum Fundament)



Schrägbettausführung

Vorteil:

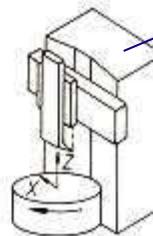
kein Späne- und Kühlmittelstau
(geringere thermische Belastung des Maschinenbetts)



Senkrechtausführung

Vorteil:

schweren Bauteilen üben keine Biegebeanspruchung auf die Spindel aus

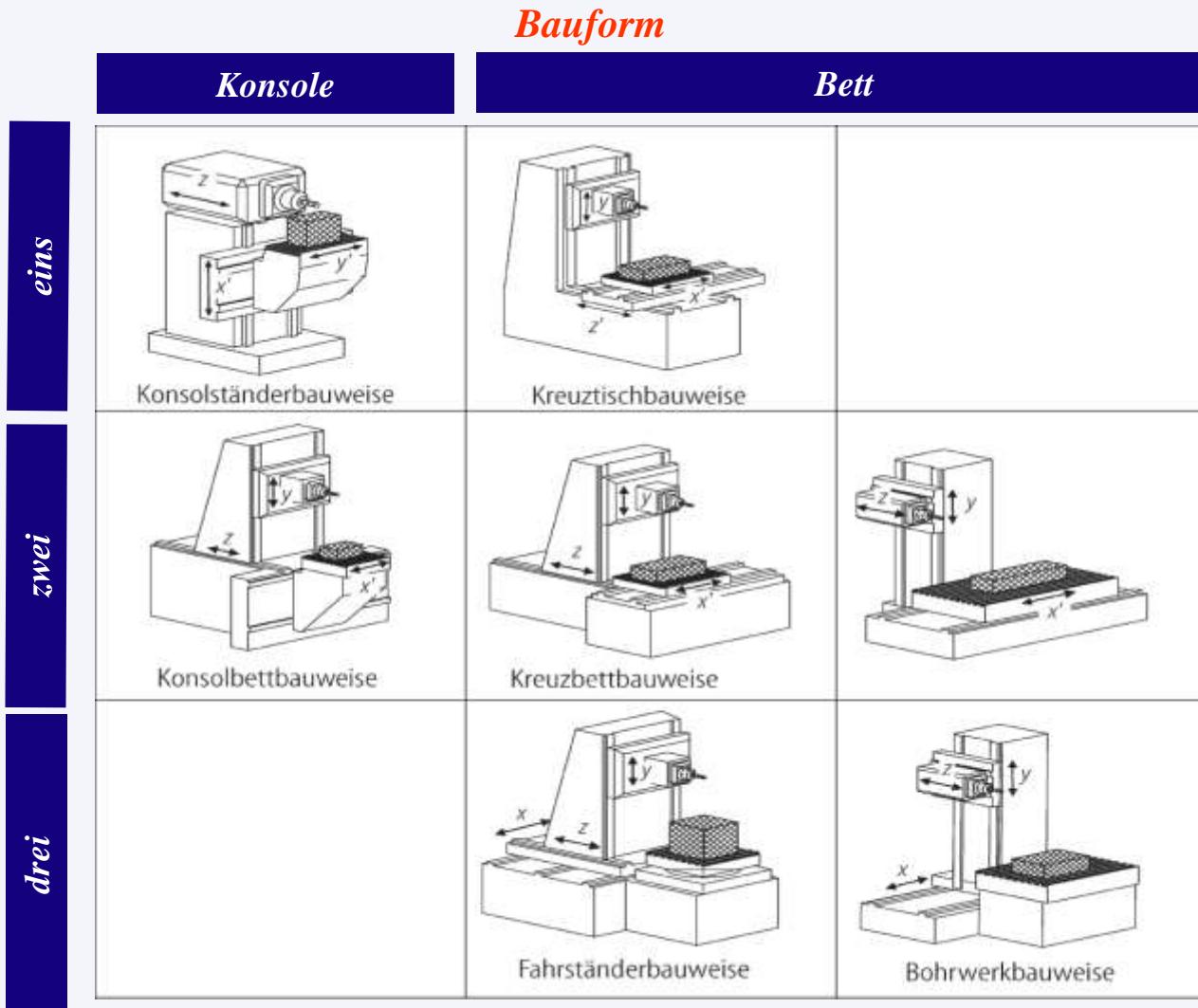


Senkrechtausführung
(Spindel liegt senkrecht zum Fundament)

Quelle: Dubbel

Bauformen horizontaler Bohr- und Fräsmaschinen

Anzahl der Achsen im Werkzeug



Quelle: Dubbel 2007

Bauformen vertikaler Bohr- und Fräsmaschinen

Anzahl der Achsen im Werkzeug

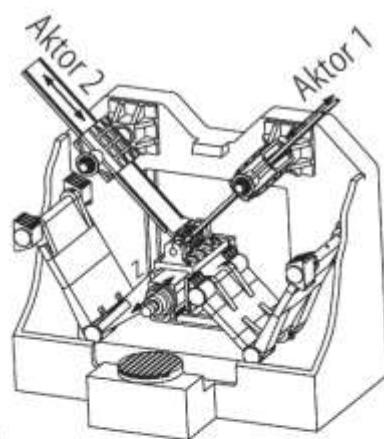
Bauform		
Konsol eins	Bett	Portal
 Konsolbettbauweise	 Kreuztischbauweise	
 Konsolbettbauweise	 Kreuzbettbauweise	 Tischbauweise
	 Fahrständerbauweise	 Gantrybauweise
		 obenliegende Gantrybauweise

Quelle: Dubbel 2007

Bauformen paralleler Kinematiken

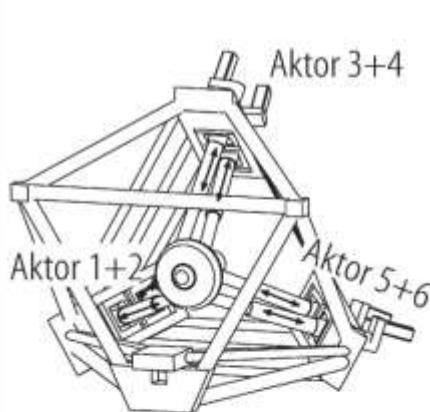
Bauform

Hybride Kinematiken

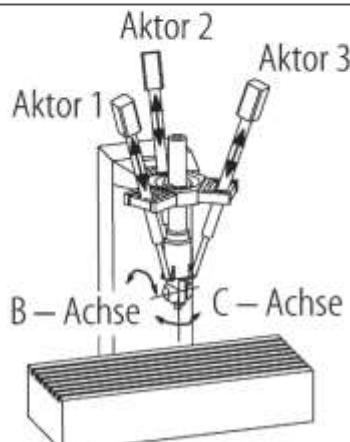


a

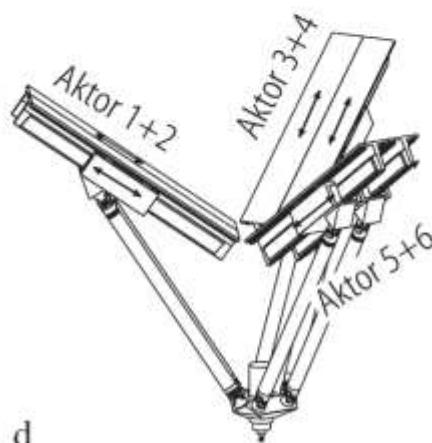
Vollparallele Kinematiken



c



b



d

Neben den konventionellen seriellen Maschinenkinematiken existieren ebenfalls parallele bzw. hybride Bauformen.

Dem Nachteil der komplexen Antriebssteuerung steht bei diesen Maschinenbauformen insbesondere ein Steifigkeitsgewinn durch die parallele Anordnung der Antriebe im Gegensatz zur seriellen Anordnung konventioneller Maschinen gegenüber. Die resultierenden Bewegungen des Werkzeugträgers können dabei je nach Maschinengestaltung drei- bis sechsachsig sein.

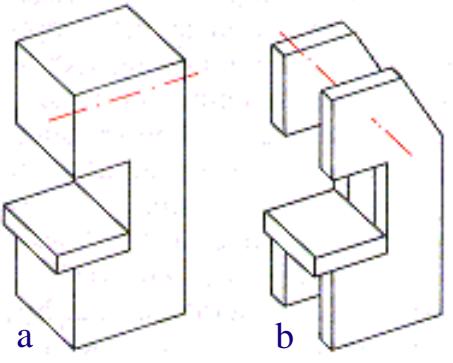
Bei den hybriden Kinematiken ist ein Teil der Achsen weiterhin seriell angeordnet, wobei die Bewegung des parallelen Anteils sowohl eben als auch räumlich sein kann. Die vollparallelen Kinematiken unterscheiden sich bezüglich der Antriebsform in Formen mit längenveränderlichen Streben und ortsfesten Fußpunkten und starren Streben mit beweglichen Fußpunkten.



Quelle: Dubbel 2007

Grundgestellbauformen für Pressen (umformende Werkzeugmaschinen)

C-Gestelle

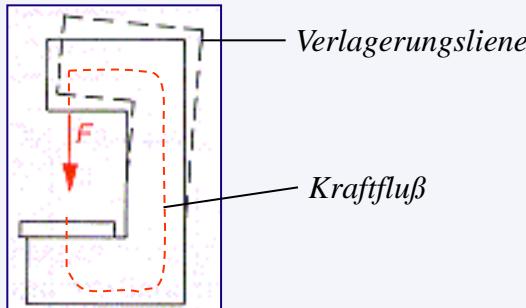


Einsatzbereich:
kleine bis mittlere Pressen
a) 1-Ständer-Gestell
b) Doppelständergestell

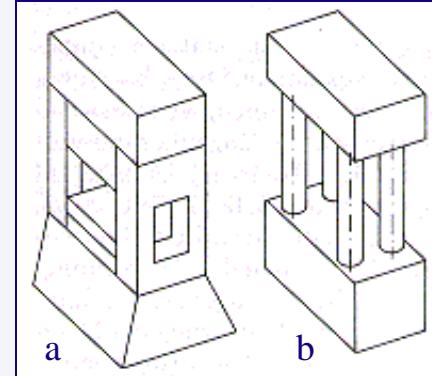
Vor- und Nachteil:

- + gute Zugänglichkeit zum Arbeitsraum
- Fluchtungsfehler des Werkzeugs durch Aufbiegen des Gestells

Verformung eines C-Gestells



O-Gestelle

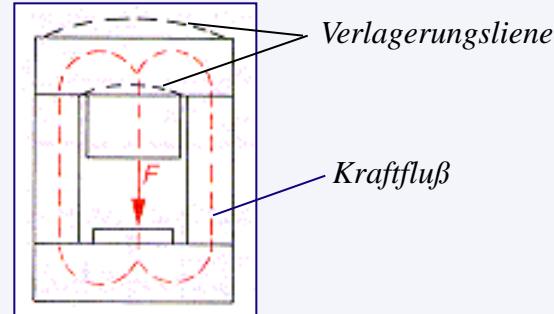


Einsatzbereich:
mittlere bis große Pressen
a) 2-Ständer-Gestell
b) Säulengestell

Vor- und Nachteil:

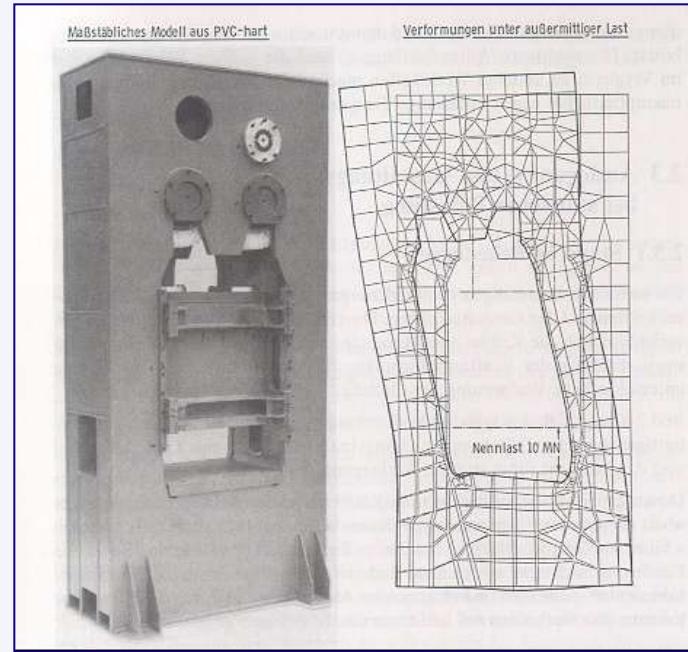
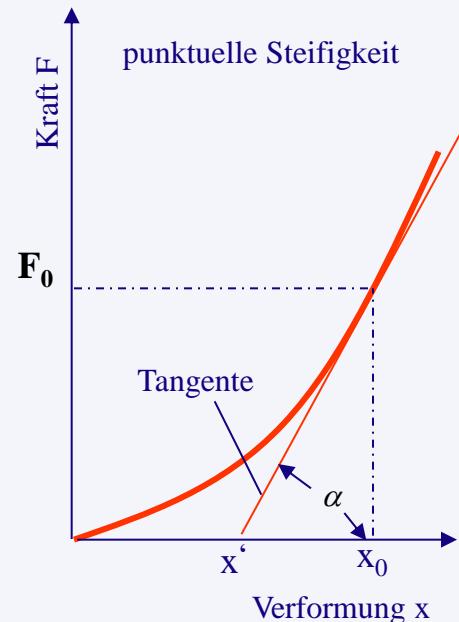
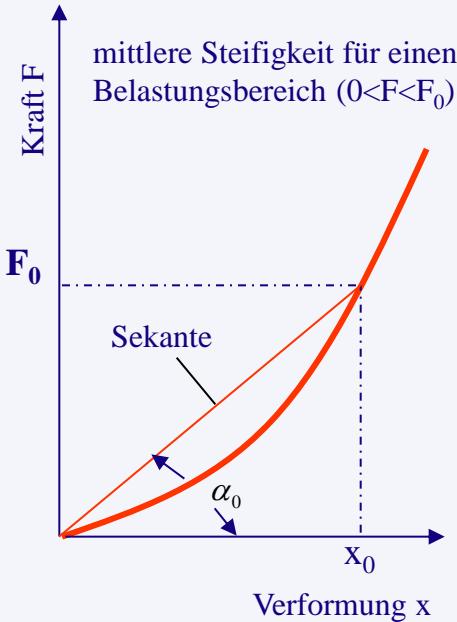
- + besonders gute Führung des Werkzeugs durch das steife O-Gestell
- schlechte Zugänglichkeit zum Arbeitsraum

Verformung eines O-Gestells



Quelle: Hesse, Umformmaschinen

Statische Kenngrößen: Steifigkeit und Nachgiebigkeit



$$k = \left(\frac{F}{X} \right)_{F_0} = \frac{F_0}{X_0} \left[\frac{N}{\mu m} \right]$$

$$k = \tan \alpha_0$$

$$k^* = \left(\frac{dF}{dX} \right)_{F_0} = \frac{F_0}{X_0 - x^*} \left[\frac{N}{\mu m} \right]$$

$$k^* = \tan \alpha$$

Die Nachgiebigkeit d ist der Kehrwert der Steifigkeit k

$$d = \frac{dX}{dF} = \frac{1}{k} \left[\frac{\mu m}{N} \right]$$

Kraftfluß- und Verformungsanalyse

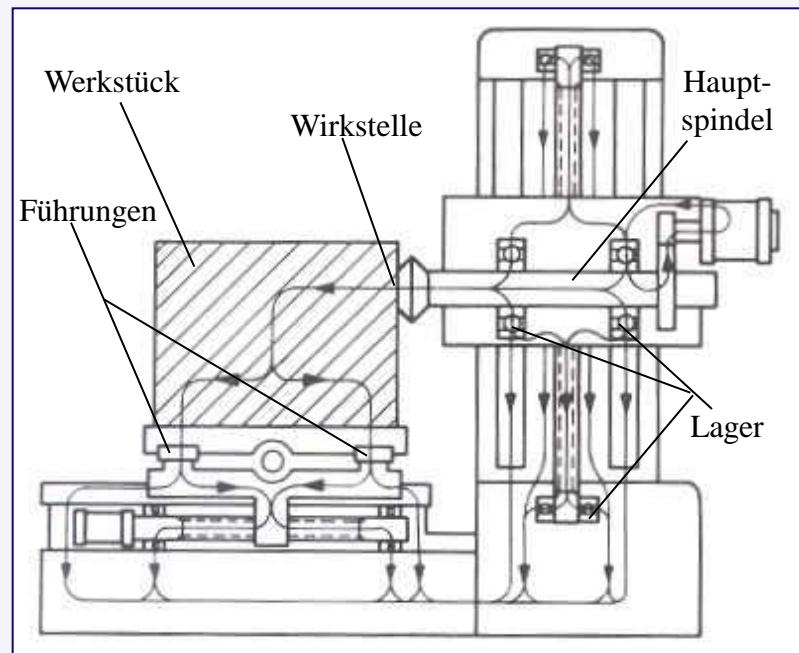
Die Gesamtverformung einer Werkzeugmaschine setzt sich aus den Deformationen aller im Kraftfluß liegenden Maschinenelemente (Lager, Führungen, Gestelle, Spindeln usw.) zusammen.

Die Kraftfluß- und Verformungsanalyse untersucht die Beanspruchung der einzelnen Elemente und ihre anteilige Verantwortung an der Gesamtverformung der Maschine.

Die Nachgiebigkeit der Bauteile kann vereinfacht als Parallel- bzw. Hintereinanderschaltung von Federn betrachtet werden. Die Gesamtnachgiebigkeit setzt sich somit additiv aus den Nachgiebigkeiten der einzelnen Federn zusammen.

$$d_{ges} = \frac{1}{k_{ges}} = \underbrace{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}_{\text{Reihenschaltung}} + \underbrace{\frac{1}{k_3 + k_4}}_{\text{Parallelschaltung}} + \dots$$

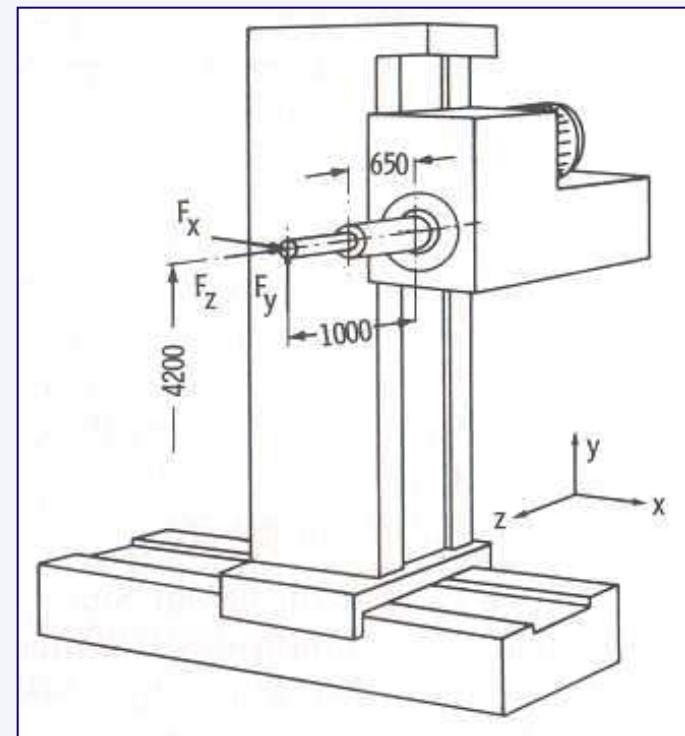
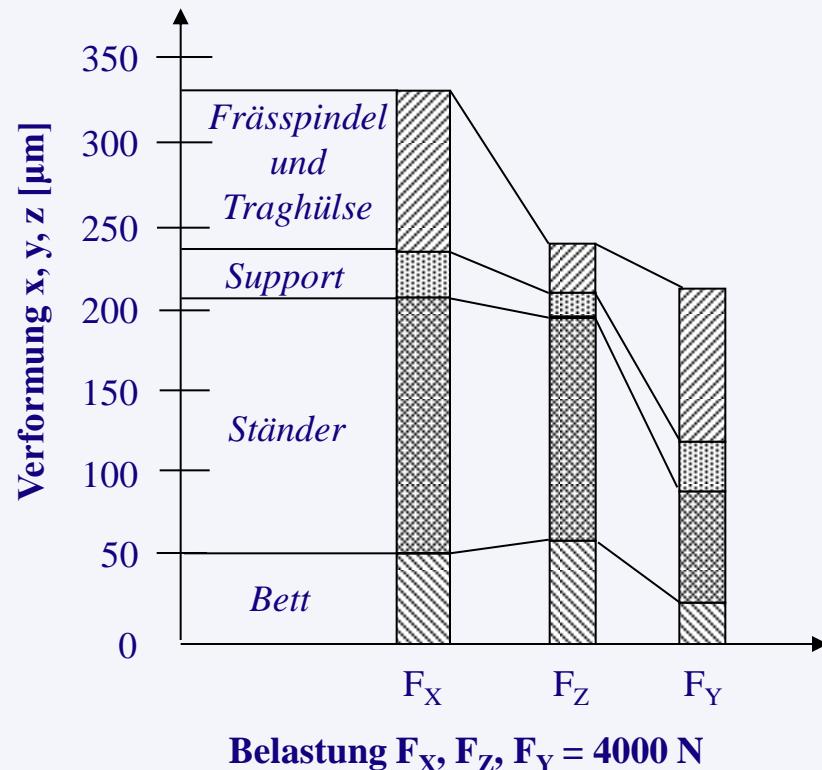
Die Werkzeugmaschine ist also stets „weicher“ als ihr nachgiebigstes im Kraftfluß liegendes Bauteil.



Kraftfluß in einer WZM (Quelle: Weck)

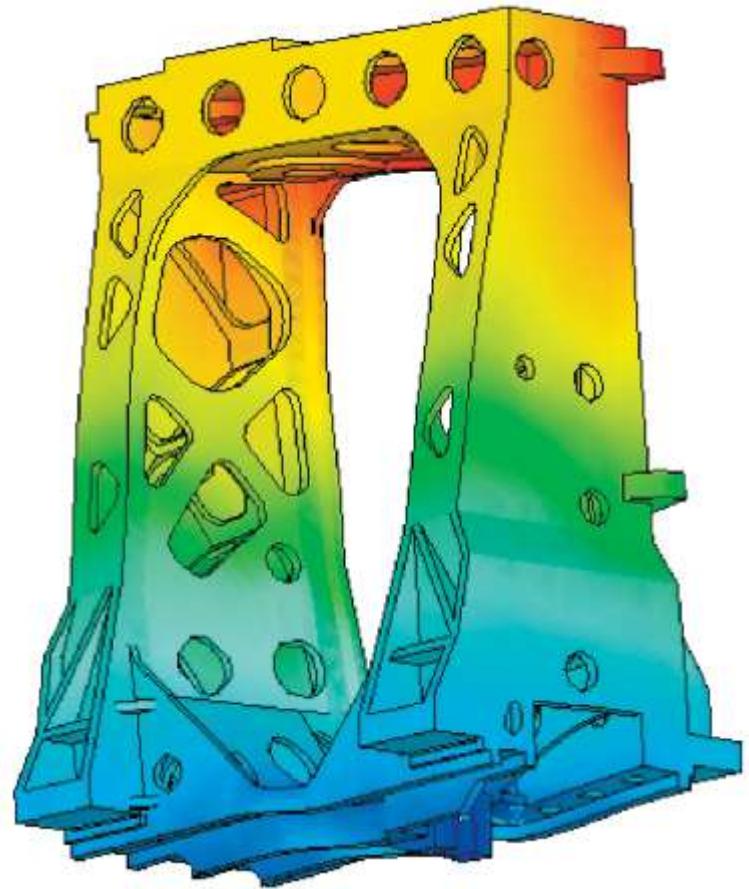
Verformungsanalyse an einem Bohr- und Fräswerk

Belastungfall: Die Spindel wird nacheinander in x-, y- und z-Richtung mit 40000 N beaufschlagt. Das beigefügte Diagramm gibt Aufschluss über die Verformungen in den einzelnen Koordinatenrichtungen.



Quelle: Weck

Beispiel FEM-Analyse



*Ursprünglicher und optimierter Maschinenständer
eines HELLER-Bearbeitungszentrums*

Quelle: Fa. Heller Maschinenfabrik

Querschnittsformen und ihre Flächenträgheitsmomente

Vergleich der Flächenträgheitsmomente für unterschiedliche Querschnittsformen mit gleichen Materialaufwand.

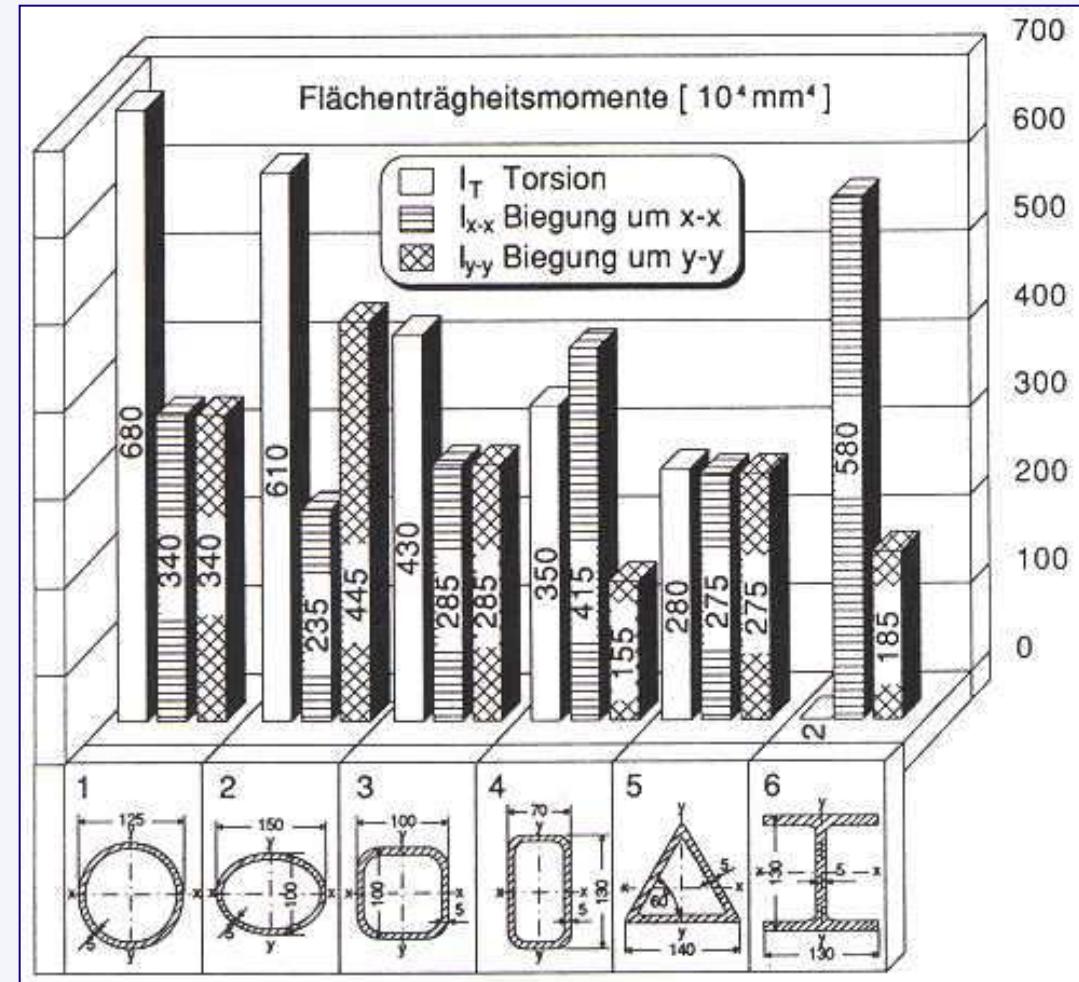
FAZIT

Biegebeanspruchung:

Verwendung von rechteckigen Querschnitten

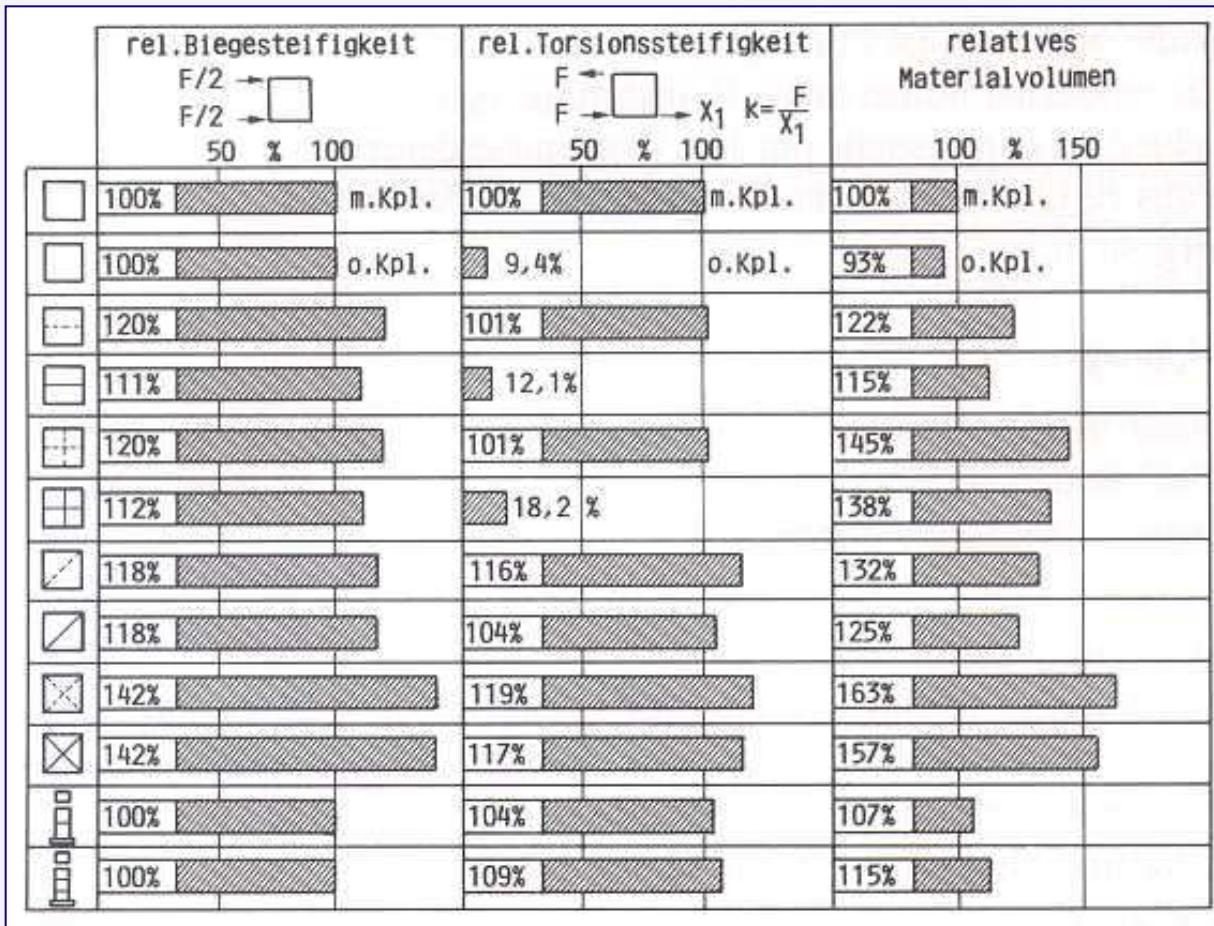
Torsionsbeanspruchung:

Kreisquerschnitte, geschlossene Querschnitte



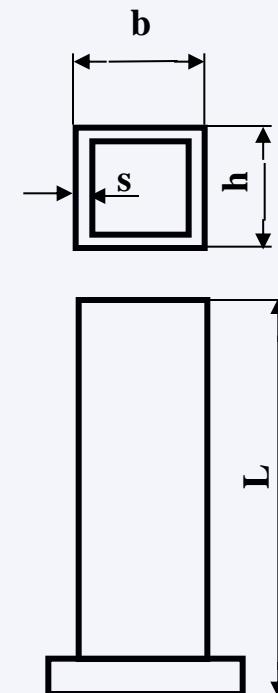
Quelle: Weck

Verrippung von Hohlkörpern



Abmessungen:

$L = 455 \text{ mm}$
 $b = 154 \text{ mm}$
 $h = 154 \text{ mm}$
 $s = 4 \text{ mm}$



FAZIT

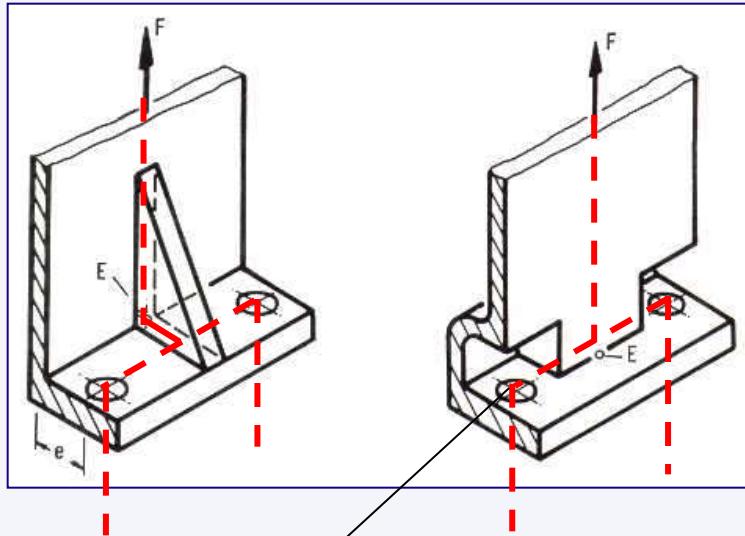
- geschlossene Bauweise (z.B. Kopfplatte)
- möglichst keine Wanddurchbrüche
- doppelt diagonale Längsverrippung

Quelle: Weck

Fügeverbindungen: Kraftflußgerechte Flanschgestaltung

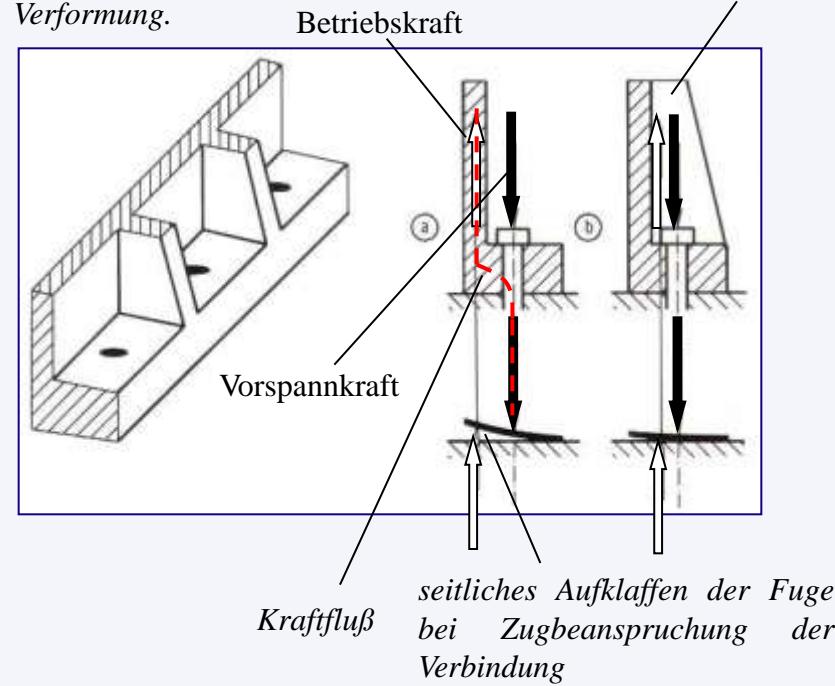
Gestellbauteile werden miteinander oder mit dem Fundament durch kraft- und formschlüssige Fügverbindungen gekoppelt. Die dabei entstehenden Fugen beeinflussen die Gesamtsteifigkeit der Gestelle nachhaltig, da diese meistens im Kraftfluss liegen.

Die Fügestellen zwischen den Bauteilen werden häufig als Mehrschraubenverbindungen ausgeführt.



Anordnung der Schrauben in der Wandungsebene
(Vermeidung der Biegebeanspruchung)

Durch die Kraftflussumlenkung im Bereich der Schraube, kommt es zu einer Biegebeanspruchung des Flansches und damit zu einer großen örtlichen Verrippung Verformung.



Gestaltungshinweise:

- Schraubenanordnung nahe der Ständerwandung (Optimierung des Kraftflusses)
- Schraubenanordnung **in der** der Ständerwandung (keine Biegebeanspruchung) - Schwächung des Querschnitts
- zusätzliche Verrippung (Erhöhung der Steifigkeit)
- größere Flanschdicke (Erhöhung der Steifigkeit)

Verringerung der statischen Verformung durch . . .

 . . . *Verringerung der Belastung!*

Eigengewichte

- **Massen verringern**
 - Werkstoffe mit niedrigem spez. Gewicht
 - Leichtbau
- **Stützpunkte günstig wählen**
- **Kräfte direkt auf das Fundament leiten**

Spann- und Klemmkräfte

- **hohe Reibungskoeffizienten vorsehen**
- **gleichmäßige Lastverteilung vorsehen**
 - hohe Schraubenzahl bei Verbindungen
 - höhere Spannstellenzahl bei Werkstückspannung

Reibungskräfte

- **Normalkraft minimieren**
 - Massen verringern
 - Prozeßkräfte minimieren
- **Reibungskoeffizient verringern**
 - günstige Werkstoffpaarung
 - Schmierung
 - Rollreibung statt Gleitreibung

Beschleunigungskräfte

- **Massen der zu bewegenden Bauteile minimieren**
(Schlitten, Tische)

Prozesskräfte

- **günstige Schneidengeometrie wählen**
(Spanwinkel)
- **Verschleiß führt zum Anstieg der Passivkraft**
- **Schnittkraft fällt mit v_c**

Verringerung der statischen Verformung durch . . .

 . . . *Erhöhung der Steifigkeit!*

kraftflussgerechte Gestaltung

- günstige Lasteinleitung
- Biegung und Torsion vermeiden
- Reihenschaltung von Federelementen vermeiden
- Überhänge vermeiden

günstige Querschnittsgestaltung

Biegebeanspruchung

- offene Profile sind günstig, wenn nur eine Biegebelastung in Richtung des größten Flachenträgheitsmomentes wirkt
große Bauteil Querschnitte

Torsionsbeanspruchung

- geschlossene Hohlprofile
- günstige Verrippung
- Durchbrüche vermeiden

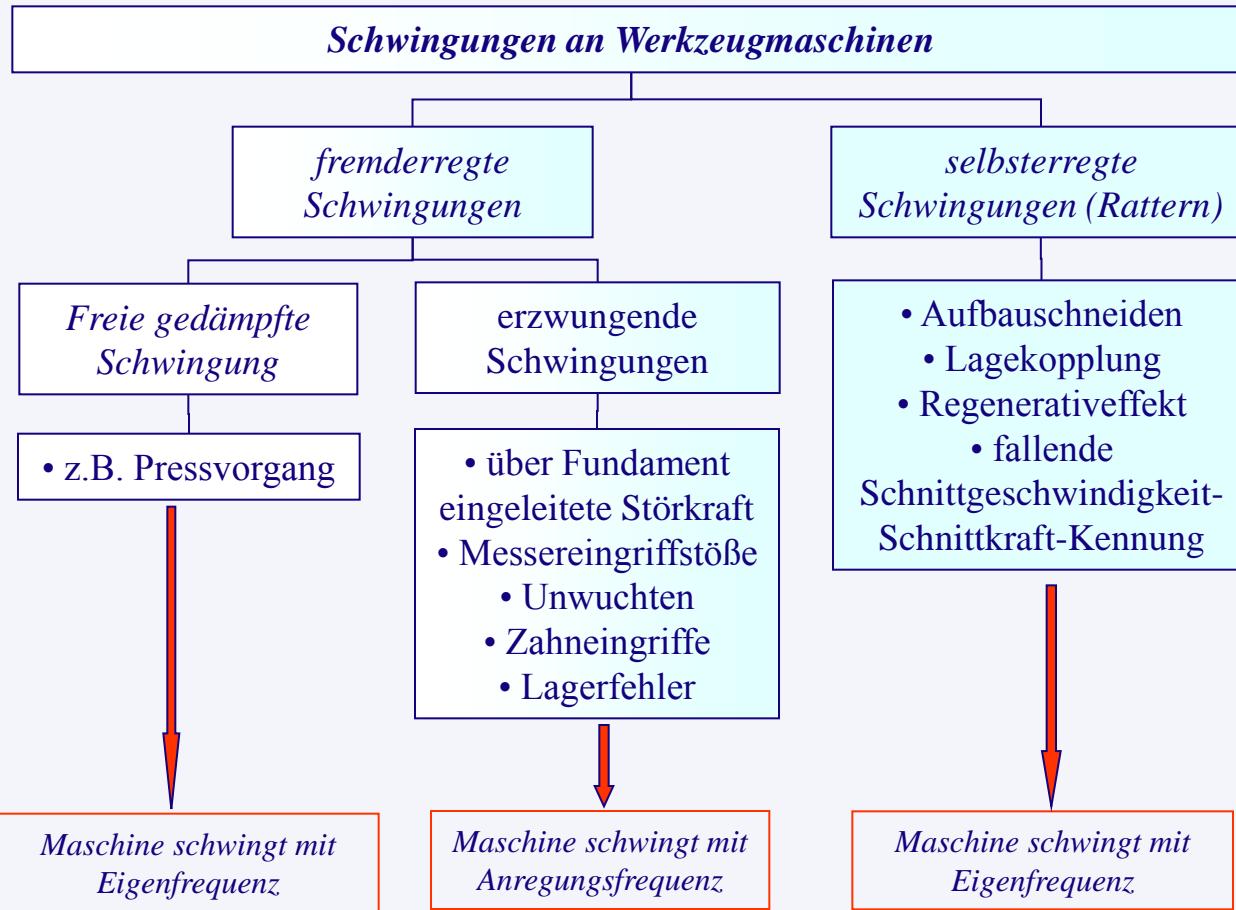
Werkstoff mit einem hohen E-Modul verwenden

Gestellwerkstoffe

Werkstoff	Vorteil	Nachteil
Grauguß	im Gießverfahren leicht verformbar, gut zerspanbar, gute Dämpfungsfähigkeit, billiger als Stahl-Gestelle	GG erfordert zusätzliche Modellkosten, geringe Dehnungsfähigkeit, kleinerer E-Modul = 100.000 N/mm^2 , geringe Verschleißfestigkeit
Stahlguß	im Gießverfahren leicht verformbar, höhere Festigkeit als GG, höhere Zähigkeit als GG	zusätzliche Modellkosten erforderlich, begrenzte Festigkeit, begrenzte Dehnungsfähigkeit, E-Modul = 190.000 N/mm^2
Stahl	große Festigkeit dadurch kleine Gestellquerschritte, große Dahnungsfähigkeit, gute Zerspanbarkeit	schlechte Dämpfungsfähigkeit, erfordert große Öfen zum Entspannungsglühen der geschweißten Teile, Verrippung für erforderliche Festigkeit notwendig, E-Modul = 210.000 N/mm^2
Beton	hohe statische und dynamische Steifigkeit, sehr gute Schwingungsdämpfung, Eigenschwingungszahl geringer als bei GG (dadurch wird auch die Betterregung z.B. beim Zerspanen stark verringert), große Wärmeträgerheit, Führungselemente sind als gehärtete Stahlschienen oder als Graugußkörper auf den Beton geschraubt	niedriger E-Modul (30.000 N/mm^2), unsicheres Langzeitverhalten, Zugempfindlichkeit, lange Aushärtedauer, teure Spannverfahren, aufwendige Oberflächenbeschichtung

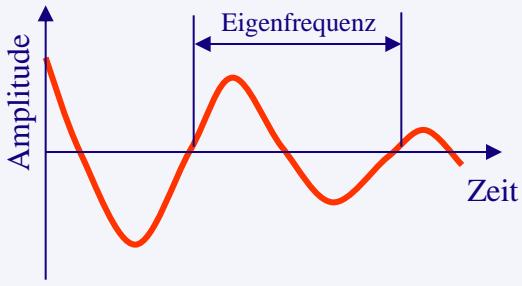
Dynamische Belastungen

Dynamische Belastungen (zeitlich veränderliche Kräfte $[F(t)]$) versetzen das Gesamtsystem „Werkzeugmaschine“ in Schwingung.

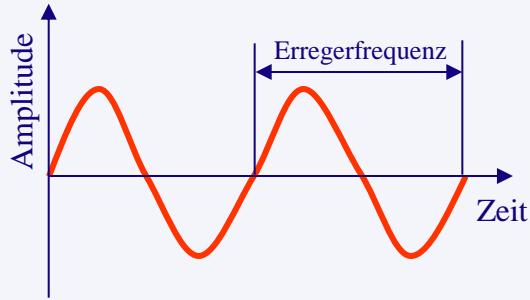


Schwingungsformen

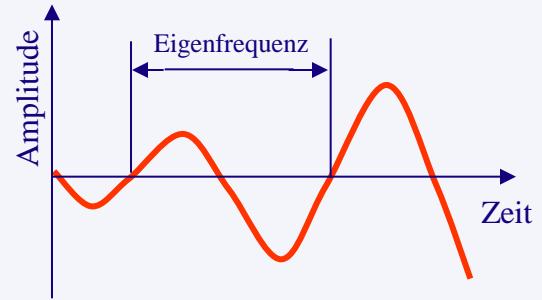
Freie gedämpfte Schwingung



Erzwungene (fremderregte) Schwingung



Selbsterregte Schwingung



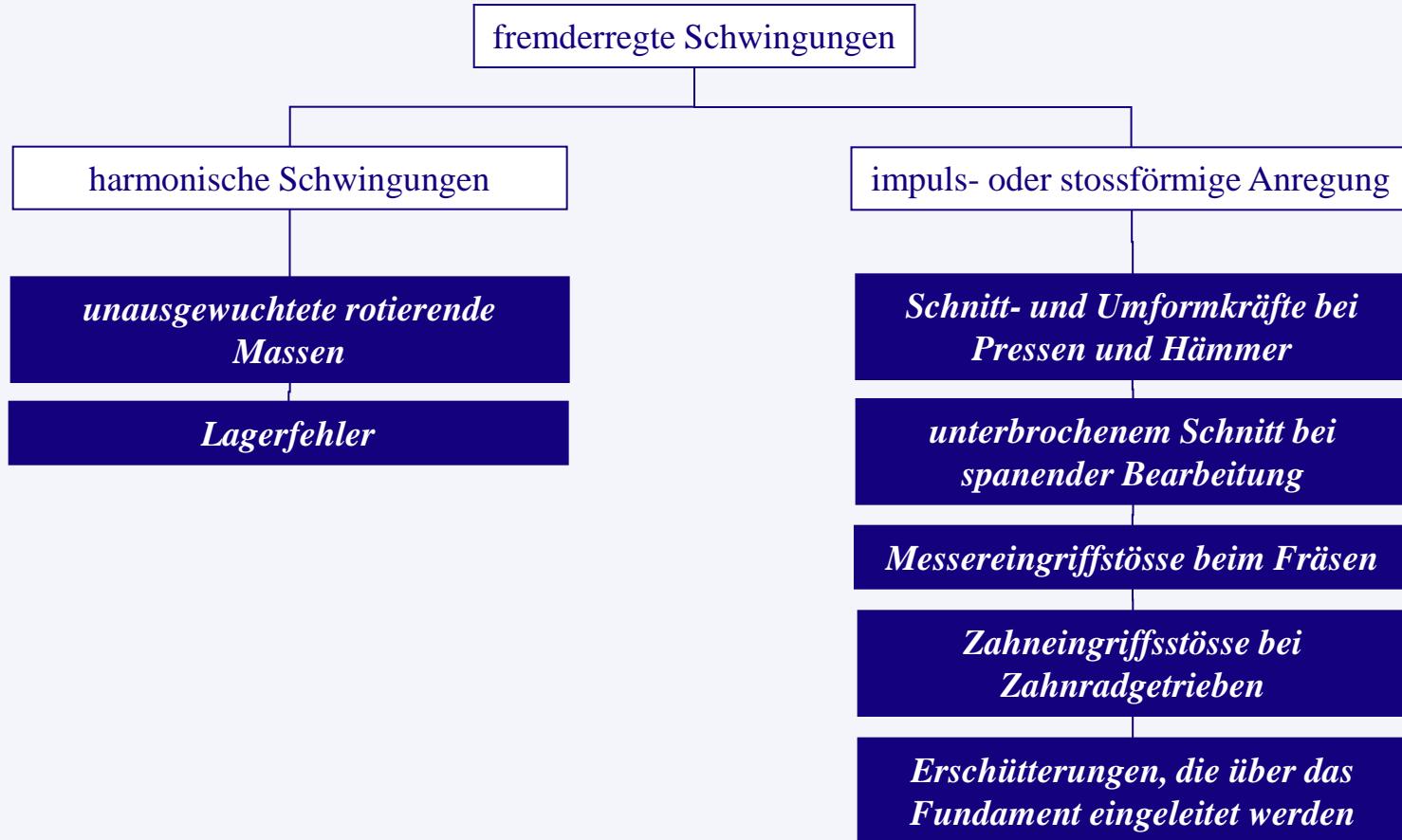
Die Eigenfrequenz ist die Frequenz, mit der ein schwingungsfähiges System bei einmaliger Anregung ausschwingt.

Die Erregerfrequenz ist die Frequenz, mit der ein schwingungsfähiges System gezwungen wird den Schwingungsvorgang beizubehalten. Bei eingeschwungenem Zustand entspricht die Schwingungsfrequenz der Erregerfrequenz.

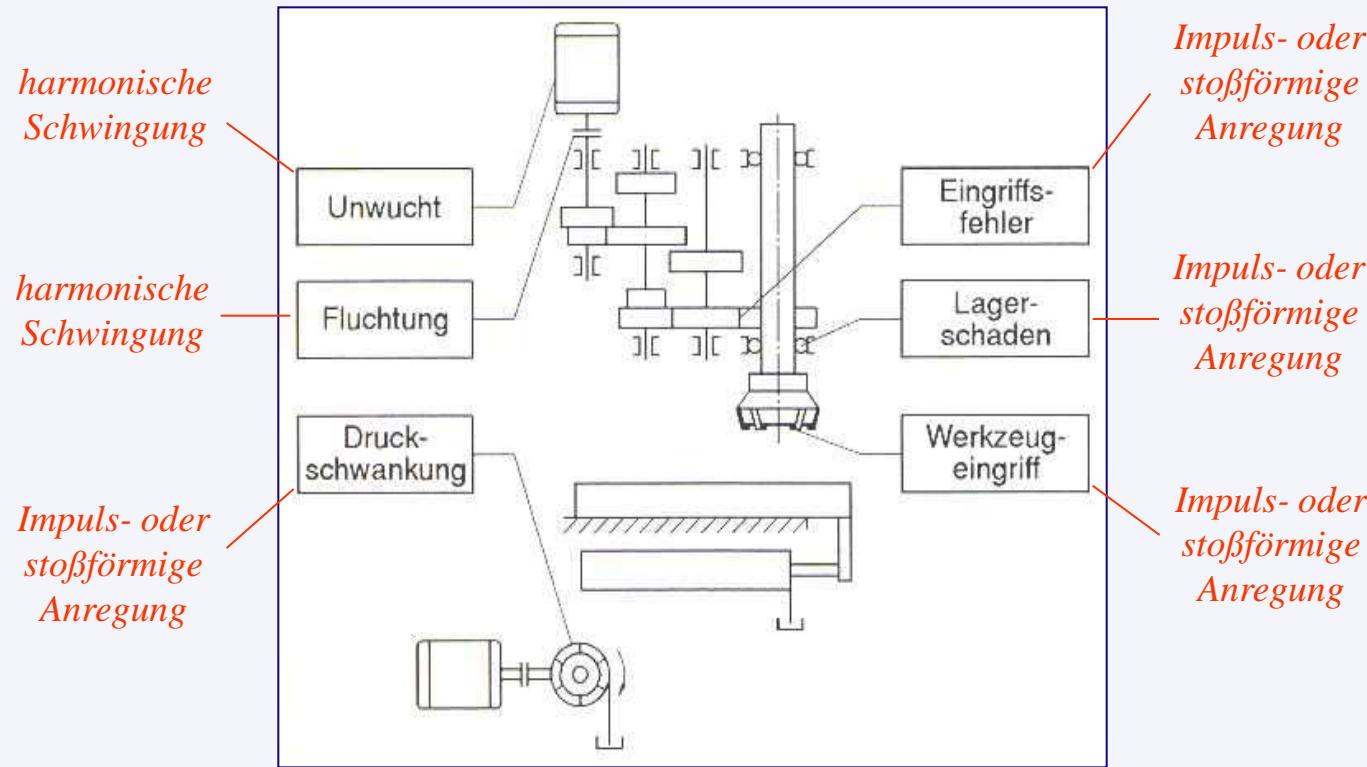
Liegt die Frequenz der Anregung im Bereich der Eigenfrequenz des Schwingungssystems, kann dies zu besonders großen Schwingungsausschlägen führen (siehe selbsterregte Schwingung). Das System wird instabil!

Fremderregte Schwingungen

Fremderregte Schwingungen werden weiterhin in harmonische und impuls- oder stossförmige Anregung unterschieden.



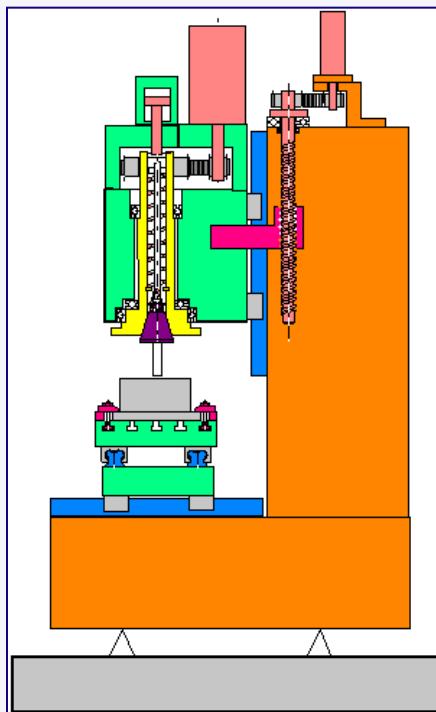
Schwingungsanregungen am Beispiel einer Fräsmaschine



Schwingungssystem: Werkzeugmaschine

Werkzeugmaschine:

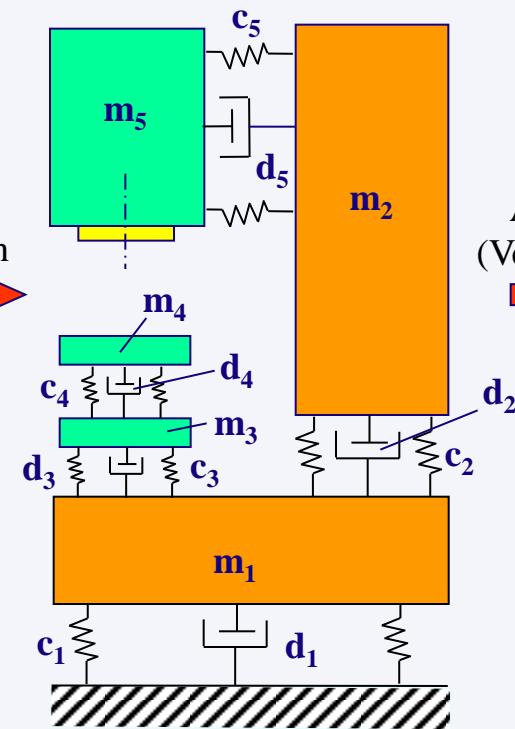
Sie verhält sich hinsichtlich des dynamischen Verhaltens wie ein Mehrmassenschwinger



Werkzeugmaschine
(Quelle: TU Dresden)

Mehrmassenschwinger:

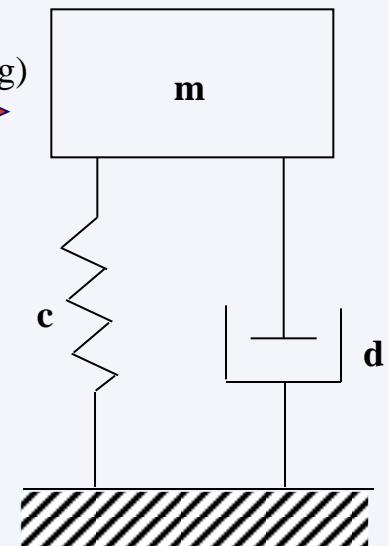
Die Schwingung eines Bauteils wird durch das benachbarte Bauelement beeinflusst. Dies führt zu einem sehr komplizierten Schwingungsgebiilde



WZM als ein mehrfach
gekoppeltes Schwingungssystem
(nach Perovic, WZM)

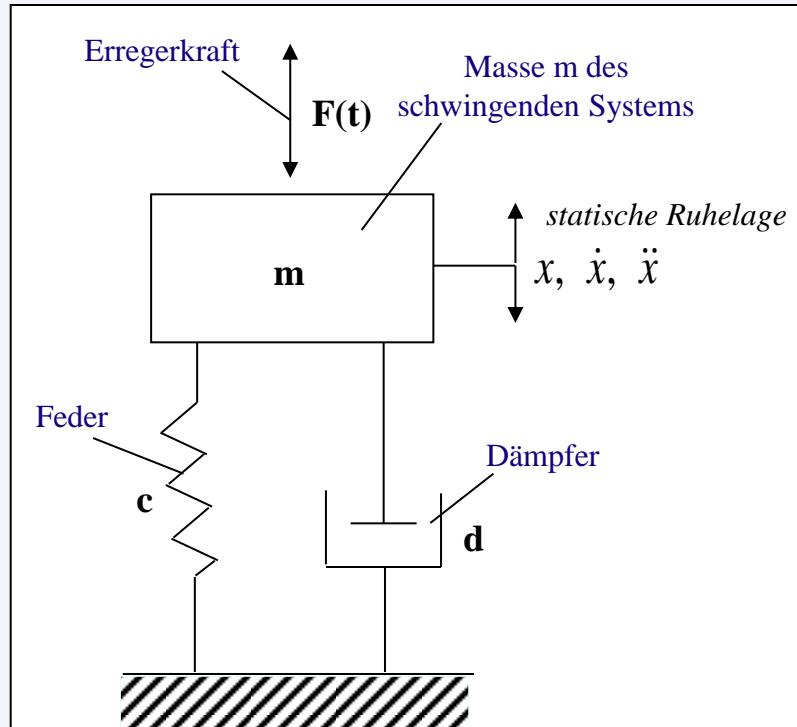
Einmassenschwinger:

Eine Abschätzung der Einflüsse auf das dynamische Verhalten lässt sich anhand eines einfachen Einmassenschwingermodells vornehmen!



Einmassenschwinger

Abstraktion: Modell eines Einmassenschwingers



Einmassenschwinger

Aus dem Kräftegleichgewicht, für eine gedämpfte Schwingung mit Erregerkraft $F(t)$, in x-Richtung folgt eine (inhomogene) Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten.

$$m \ddot{x} + d \dot{x} + c x = F(t)$$

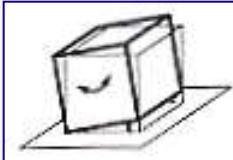
Massenkraft F_m Dämpfungskraft F_d Federkraft F_c
Masse Dämpfung statische Steifigkeit
— Erregerkraft

Dämpfung in Gestellbauteilen

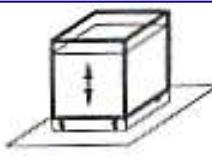
Je nach Belastungsart des Bauteils (Starrkörperschwingung, Biege- und Torsionsschwingung) sind verschiedene Faktoren für das Dämpfungsverhalten verantwortlich.

Starrkörperschwingung

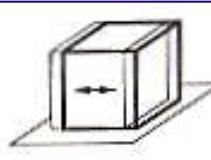
Kippen



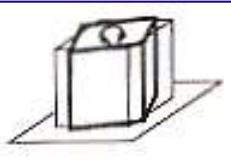
Heben



Schieben



Drehen



Dämpfung wird beeinflusst durch:

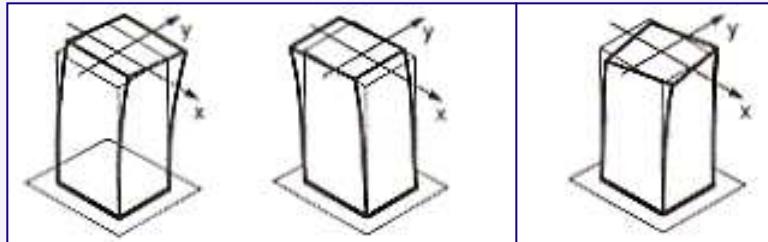
- Verschraubungen
- Schweißfugen
- Führungen
- Massenverteilung

Bei der Starrkörperschwingung entsteht die Dämpfung durch die Relativbewegung in Koppelstellen!

Biege- und Torsionsschwingung

Biegen

Tordieren



Dämpfung wird beeinflusst durch:

- Materialdämpfung
- Massenverteilung

Der Einsatz von hochdämpfenden Werkstoffen lohnt sich nur, wenn der Werkstoff durch die dynamische Beanspruchung verformt wird!

Gestellwerkstoffe

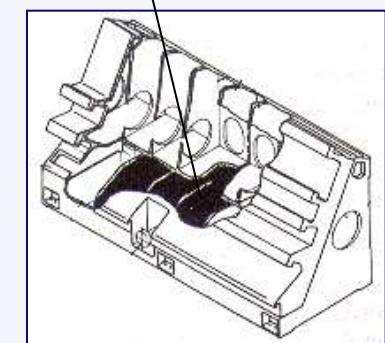
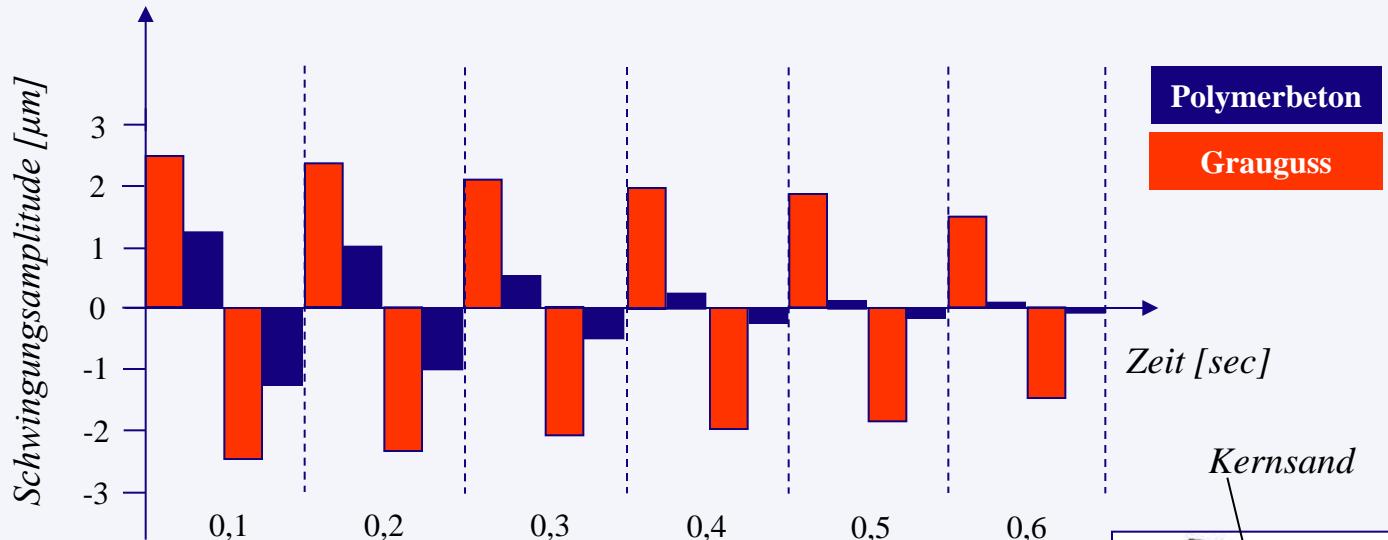
Werkstoff	Vorteil	Nachteil
Grauguß	im Gießverfahren leicht verformbar, gut zerspanbar, gute Dämpfungsfähigkeit, billiger als Stahl-Gestelle	GG erfordert zusätzliche Modellkosten, geringe Dehnungsfähigkeit, kleinerer E-Modul = 100.000 N/mm^2 , geringe Verschleißfestigkeit
Stahlguß	im Gießverfahren leicht verformbar, höhere Festigkeit als GG, höhere Zähigkeit als GG	zusätzliche Modellkosten erforderlich, begrenzte Festigkeit, begrenzte Dehnungsfähigkeit, E-Modul = 190.000 N/mm^2
Stahl	große Festigkeit dadurch kleine Gestellquerschritte, große Dahnungsfähigkeit, gute Zerspanbarkeit	schlechte Dämpfungsfähigkeit, erfordert große Öfen zum Entspannungsglühen der geschweißten Teile, Verrippung für erforderliche Festigkeit notwendig, E-Modul = 210.000 N/mm^2
Beton	hohe statische und dynamische Steifigkeit, sehr gute Schwingungsdämpfung, Eigenschwingungszahl geringer als bei GG (dadurch wird auch die Betterregung z.B. beim Zerspanen stark verringert), große Wärmeträgheit, Führungselemente sind als gehärtete Stahlschienen oder als Graugußkörper auf den Beton geschraubt	niedriger E-Modul (30.000 N/mm^2), unsicheres Langzeitverhalten, Zugempfindlichkeit, lange Aushärtedauer, teure Spannverfahren, aufwendige Oberflächenbeschichtung

Obwohl Stahl eine wesentlich schlechtere Dämpfungseigenschaft als Grauguss besitzt, wird dieses Defizit in der Regel durch die hohe Dämpfung in den Koppelstellen (Schweißfugen) kompensiert.

Quelle: Charchut/Tschätsch

Dämpfung in Gestellbauteilen

Schwingungsdämpfung von Grauguss im Vergleich zu Polymerbeton
(Quelle: Koether, Fertigungstechnik für Wirtschaftingenieure)

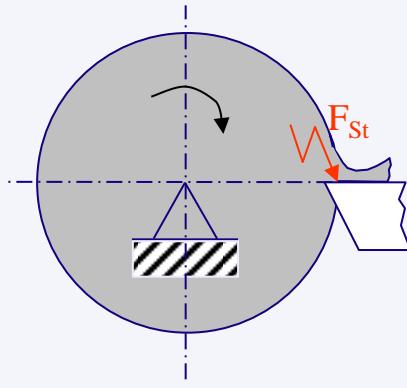


konventionelles Drehmaschinenbett
aus Grauguss (Quelle:Weck)

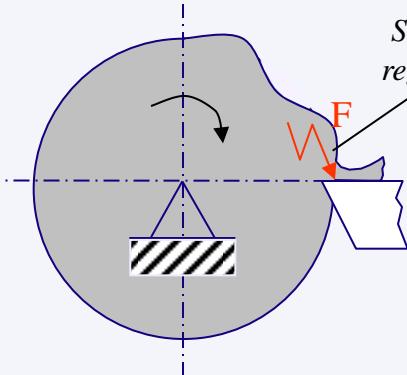
Um die Dämpfungseigenschaften von *Gussgestellen* zu verbessern, belässt man den Kernsand im Gestell (trockene Reibung).

Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Regenerativeffekt

Impulsartige Schnittkraftänderung

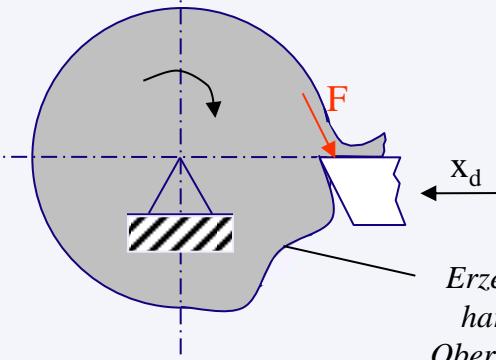


Nach einer Werkstückumdrehung
wird die harmonische Kontur
durch den Meißel abgespant



Schnittkraftschwankungen
regt die Maschine erneut zu
Schwingungen an

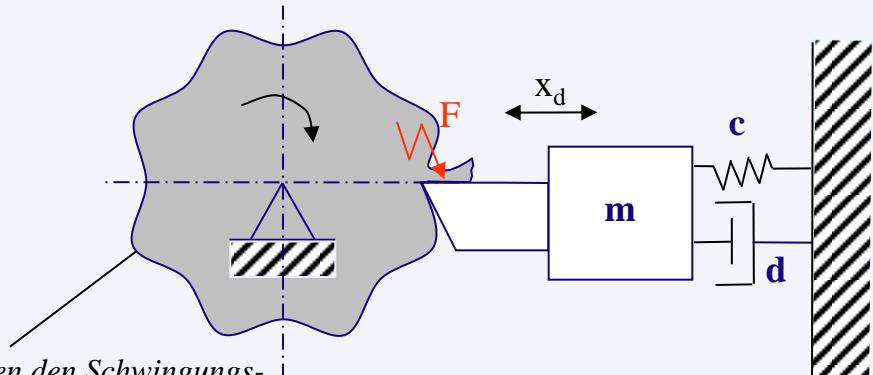
Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück



Erzeugung einer
harmonischen
Oberflächenkontur

Ab einer bestimmten Spanungsbreite reicht die
Systemdämpfung nicht mehr aus den Vorgang zu
beruhigen. Der Zerspanprozess wird instabil.

Oberflächenwellen halten den Schwingungs-
vorgang aufrecht (regeneratives Rattern)



Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Lagekopplung

Rattern durch Lagekopplung

Wenn ein System zwei oder mehr Freiheitsgrade in verschiedene Richtungen besitzt, kann es zum Rattern durch Lagekopplung kommen.

Belastungsfall:

Die Masse m schwingt in Richtung 1 und 2 mit gleicher Frequenz jedoch phasenverschoben und mit unterschiedlich großen Amplituden.

Die Werkzeugschneide beschreibt dadurch eine Ellipsenbahn (siehe Skizze).

Vom Punkt A zum Punkt B

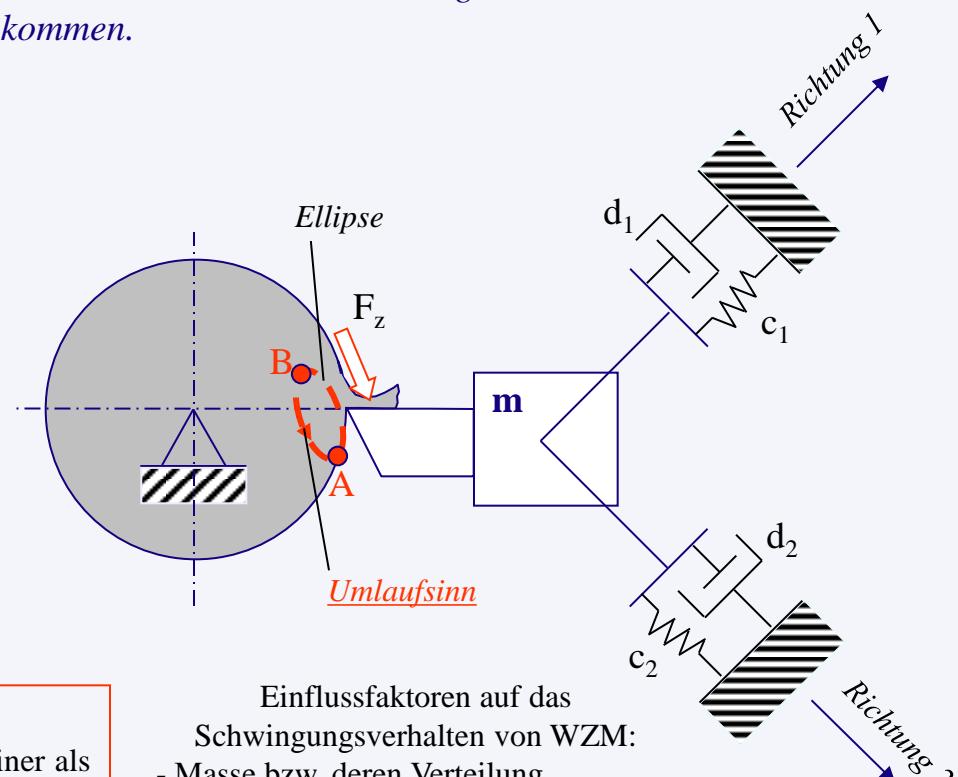
Während der Bewegung von A nach B muss gegen die Zerspankraft F_z Energie W_1 an den Zerspanvorgang abgegeben werden.

Vom Punkt B zum Punkt A

Auf den Rückweg von B nach A gibt dagegen der Prozess an den Schwinger Energie W_2 ab.

Resultat

Die Spanungsdicke ist jedoch auf dem Hinweg (A-B) kleiner als auf dem Rückweg (B-A). Daraus folgt, dass W_1 kleiner ist als W_2 . Dem Schwinger wird also während seiner Bewegung Energie zugeführt! Ist die zugeführte Energie größer als die Dämpfung, werden Schwingungen angefacht.

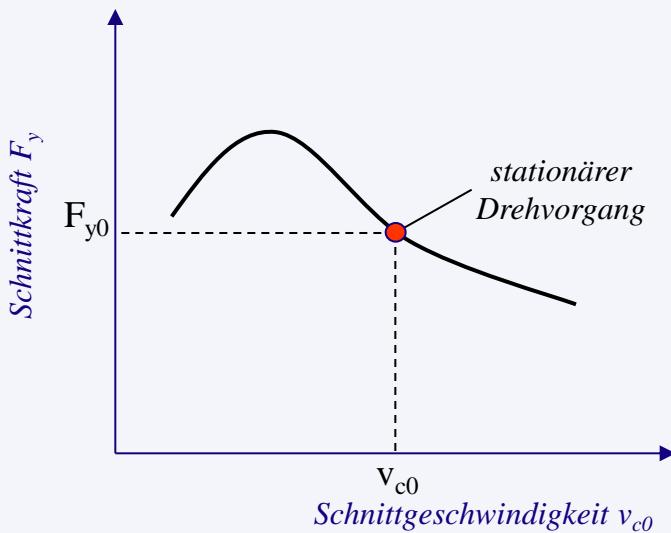


Einflussfaktoren auf das Schwingungsverhalten von WZM:

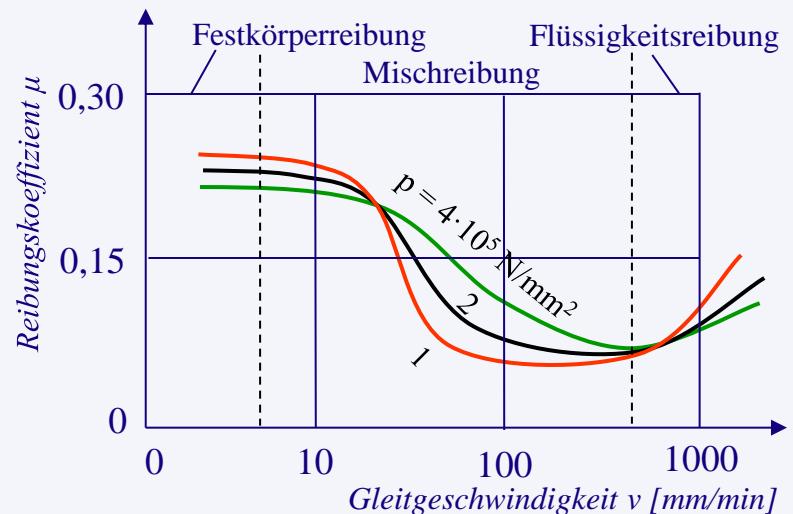
- Masse bzw. deren Verteilung
- Steifigkeit
- Dämpfung
- Richtungsorientierung + Frequenzlage einzelner Eigenschwingungen

Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Fallende Schnittkraft

Aus Schnittkraftmessungen bei der Drehbearbeitung von Stahlwerkstoffen ist bekannt, dass die Schnittkraft von der Schnittgeschwindigkeit abhängig ist. Die Ursache für die Schnittkraftcharakteristik liegt in thermischen Einflüssen und in sich ändernden Reibverhältnissen zwischen Werkzeug und Werkstück.



Schnittkraft als Funktion der Schnittgeschwindigkeit
(Quelle: Tönshoff, WZM)



Reibungskoeff. in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit bei verschiedenen Flächenpressungen (Quelle: Perovic, WZM)

Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Fallende Schnittkraft

Während des Drehvorganges mit der Schnittgeschwindigkeit v_{c0} stellt sich die dazu entsprechende Schnittkraft F_{y0} ein (stationärer Zustand).

Durch irgendeine Störung (z.B. Inhomogenität des Werkstoffs) wird die Masse m ausgelenkt und schwingt um die stationäre Mittellage. Beim Ausweichen der Masse nach unten ändert sich die Schnittgeschwindigkeit zu:

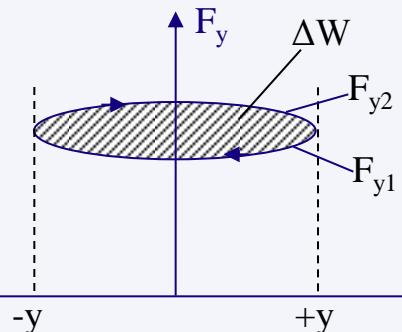
$$v = v_{c0} - \dot{y}$$

daraus folgt weiterhin:

$$F_y > F_{c0}$$

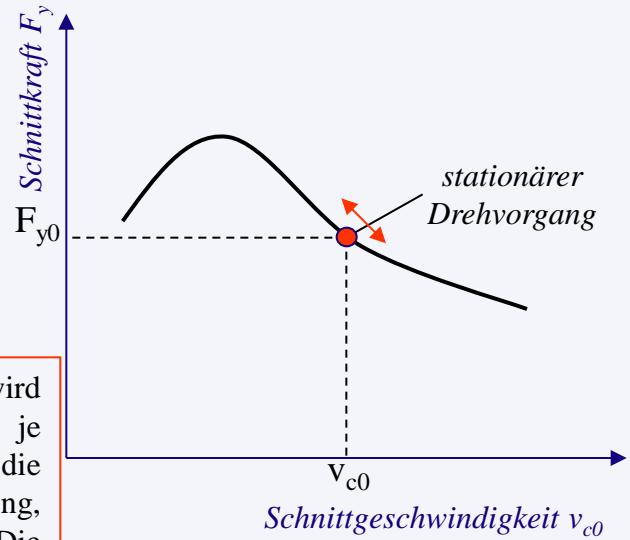
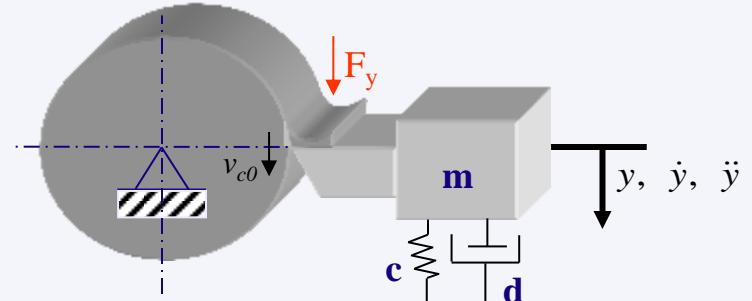
Für das Rückschwingen gilt das Umgekehrte!

Energiebetrachtung



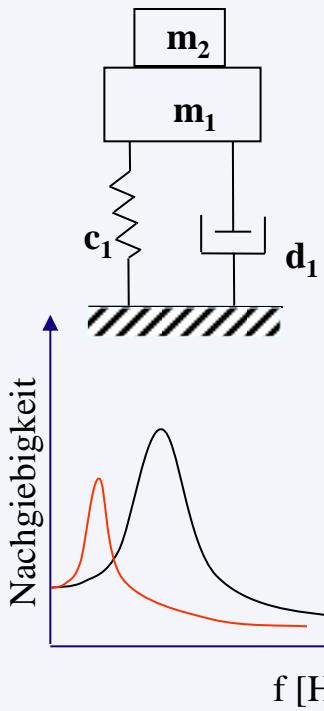
$$\Delta W = \int_{-y}^y F_{2y} dy + \int_y^{-y} F_{1y} dy$$

Durch die Drehbewegung des Werkstücks wird dem Schwingungsvorgang je Schwingungsperiode Energie zugeführt. Ist die zugeführte Energie größer als die Dämpfung, wird die Schwingung angefacht. Die zugeführte Energie wird durch die Steilheit der Schnittkraftkurve bestimmt!

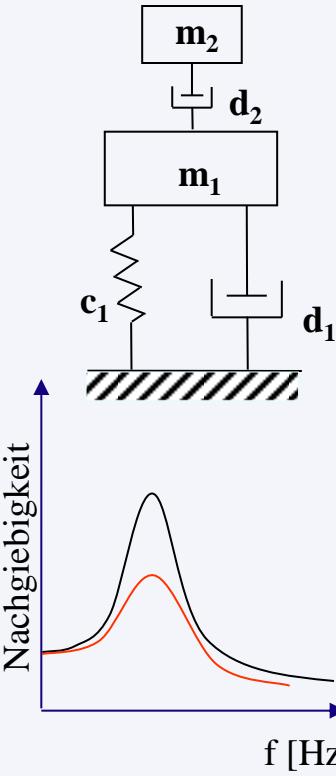


Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung: Dämpfungssysteme

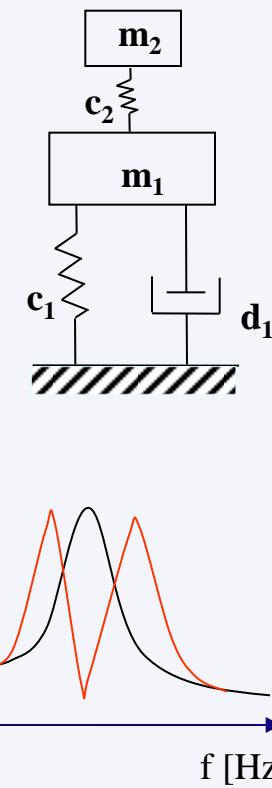
Impakt-Dämpfer



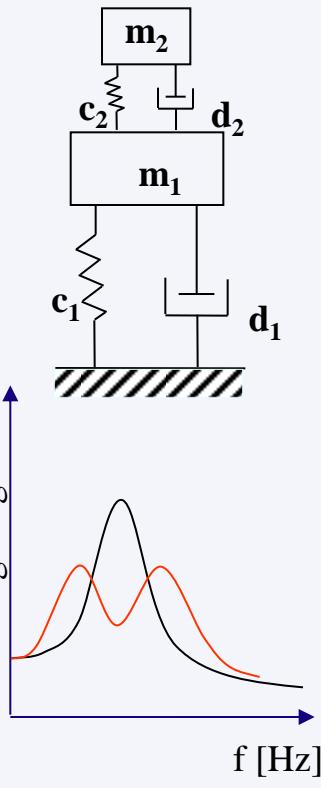
Lanchester-Dämpfer



Tilger



Hilfsmasse-Dämpfer



Quelle: Tönshoff, Werkzeugmaschinen

- keine zusätzliche Resonanzstelle (kein Energiespeicher „Feder“)

- keine zusätzliche Resonanzstelle (kein Energiespeicher „Feder“)
- das Systeme benötigt eine relativ große Masse m_2

- eine zusätzliche Resonanzstelle (wegen Energiespeicher „Feder“)

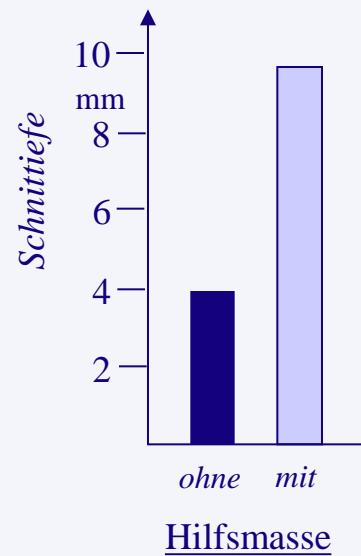
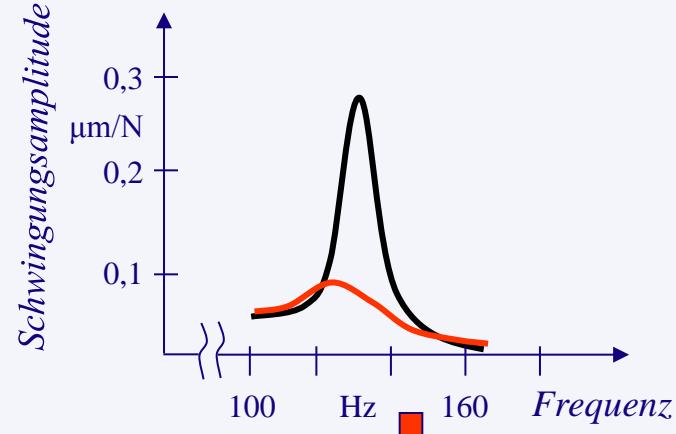
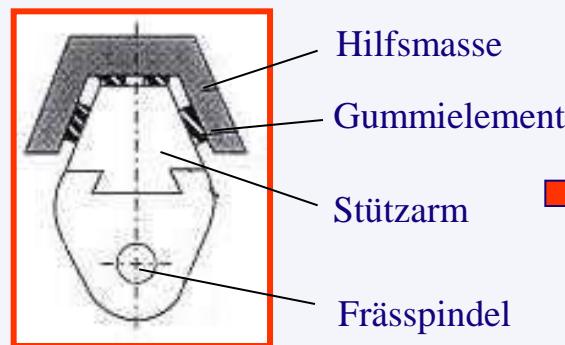
- eine zusätzliche Resonanzstelle (wegen Energiespeicher „Feder“)

Dämpfungssysteme: Fräsmaschine (Beispiel)

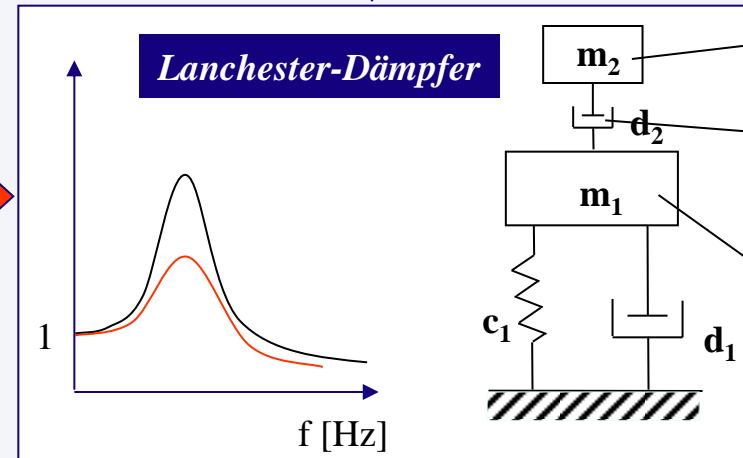


Waagerecht-Konsol-Fräsmaschine

Quelle: Prof. Uhlmann, iwf

Hilfsmasse

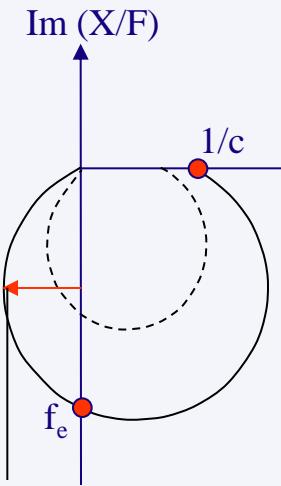
Hilfsmasse
Gummielement
Stützarm
Frässpindel



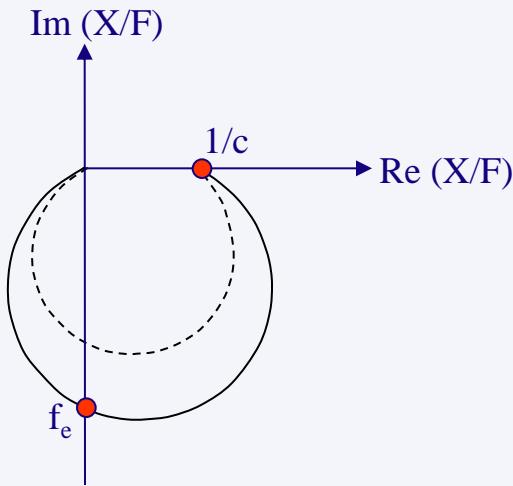
Hilfsmasse
Gummielement
Stützarm,
Frässpindel

Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

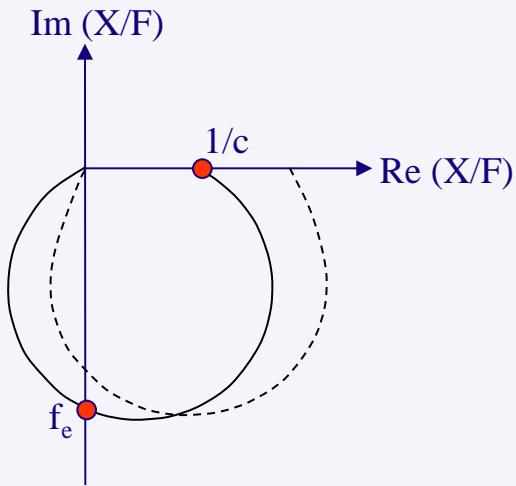
Zielrichtung bei allen Maßnahmen ist die Verringerung des negativen Realteils der Ortskurve, der ein direktes Maß für die Ratterneigung der Maschine ist.



1. Erhöhung der stat. Steifigkeit c



2. Erhöhung der Dämpfung



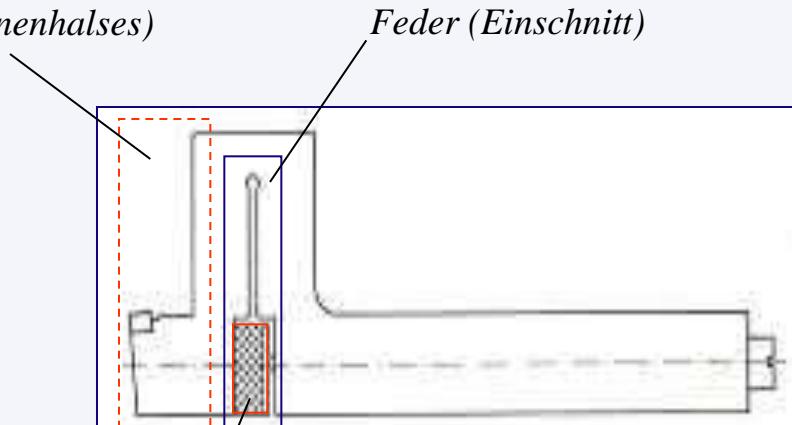
3. Verschiebung der Ortskurve
(Schwanenhalsprinzip: weiches Element hoher Eigenfrequenz und hoher Dämpfung im Kraftfluss der Maschine)

Verringerung des negativen Realteils: geschwächter Meißel (Beispiel)

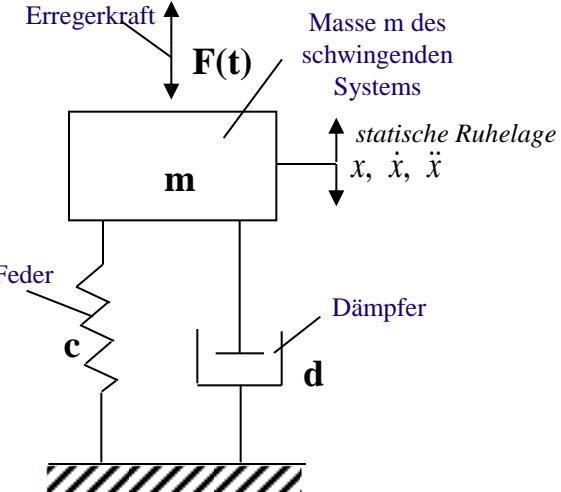
Schwanenhalsprinzip: Ein im Kraftfluss liegendes statisch weiches Element mit hoher Eigenfrequenz und Dämpfung verschiebt den gesamten Nachgiebigkeitsfrequenzgang in Richtung positiver Realanteile.

geschwächter Meißel

schwingende Masse
(linker Teil des
Schwanenhalses)

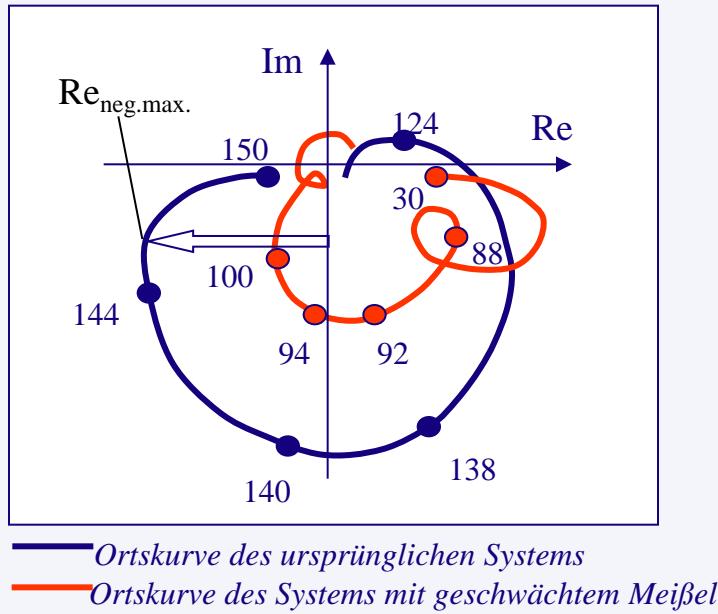


Dämpfer
(dämpfungswirksames
Material)

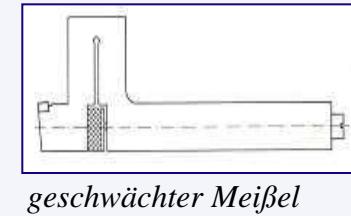
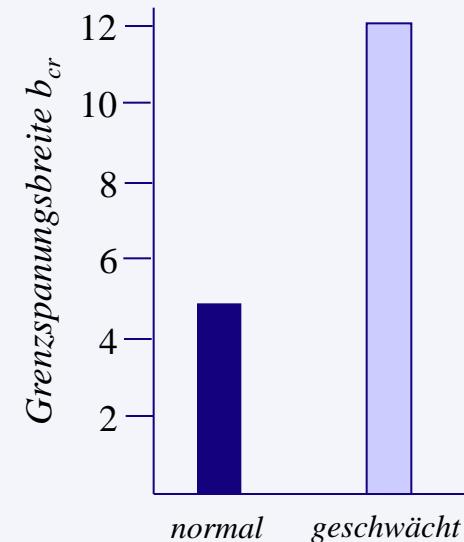


Einmassenschwinger

Verringerung des negativen Realteils: geschwächter Meißel (Beispiel)



Der negative Realanteil konnte mit Hilfe des „Schwanenhalsprinzips“ um den Faktor 4 verbessert werden. Die Ratterneigung wurde somit minimiert!



Das Ergebnis des verringerten negativen Realteils spiegelt sich auch in der Erhöhung der Grenzspannungsbreite b_{cr} wieder!

Grenzspannungsbreite/-tiefe – Spannungsbreite/-tiefe für die die Schwingungsamplituden bei bestimmten Drehzahlen stark anwachsen.

Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

→ Werkzeug mit ungleicher Teilung

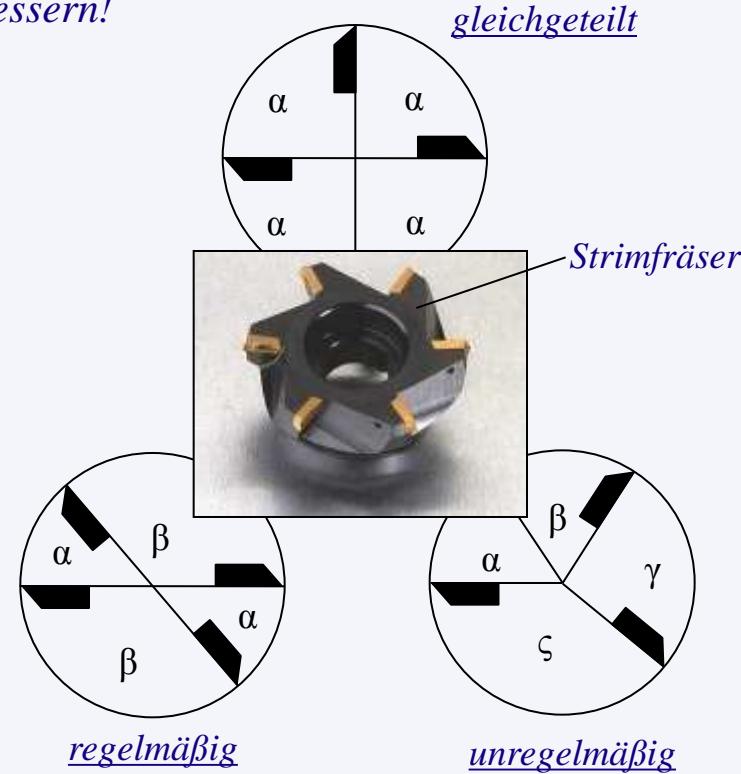
Das Stabilitätsverhalten eines Zerspanungsprozesses kann sich durch den Einsatz ungleichgeteilter Werkzeuge verbessern!

Das Wirkprinzip beruht

auf dem Einfluss des sich ständig ändernden Phasenwinkels ε zwischen einer zuvor aufgebrachten Oberflächenwelle und der aktuellen Verlagerung der Schneidkante. Hierbei kommt es zu einer Spandickenmodulation, welche einen positiven Einfluss auf die Ratterneigung des Systems ausübt.



Die sich normalerweise einstellende stationäre Ratterschwingung wird durch die Phasenmodulation des Werkzeugs ständig gestört!

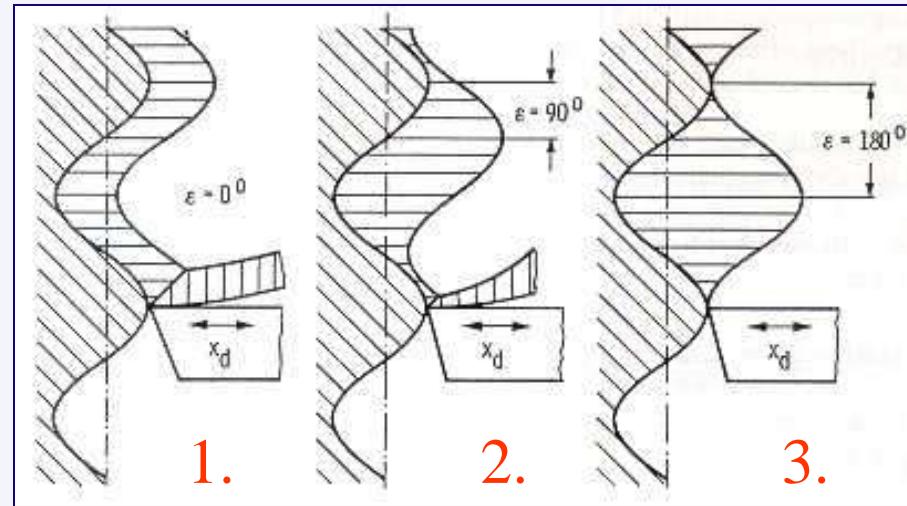


Einfluß des Phasenwinkels ε auf die Spandickenmodulation

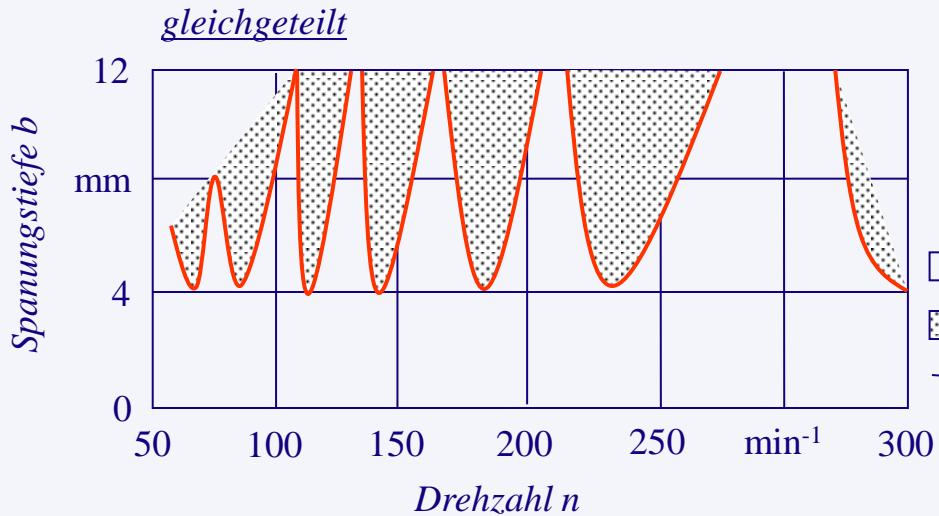
1. *Einschneidfrequenz des Werkzeugs = Schwingungsfrequenz des Werkstücks*
Phasenwinkel ε zwischen den Schwingungen 0°
keine Spandickenmodulation

2. *Einschneidfrequenz des Werkzeugs \neq Schwingungsfrequenz des Werkstücks*
Phasenwinkel ε zwischen den Schwingungen 90°
Spandickenmodulation

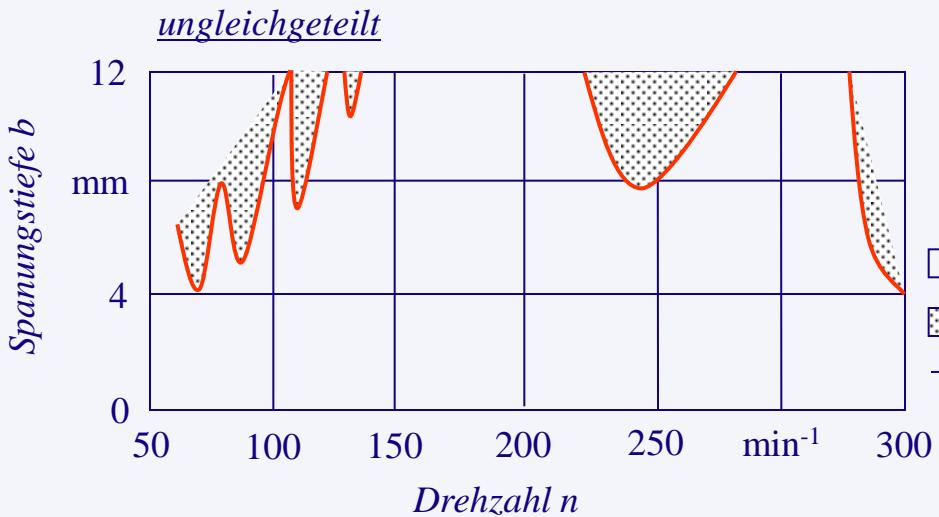
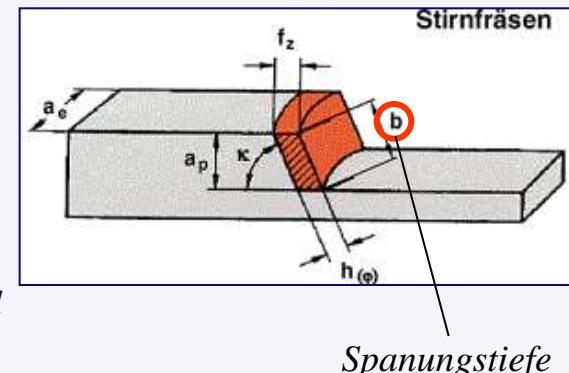
3. *Einschneidfrequenz des Werkzeugs \neq Schwingungsfrequenz des Werkstücks*
Phasenwinkel ε zwischen den Schwingungen 180°
maximale Spandickenmodulation



Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung



Eingriffs- und Spanungsgrößen beim Fräsen

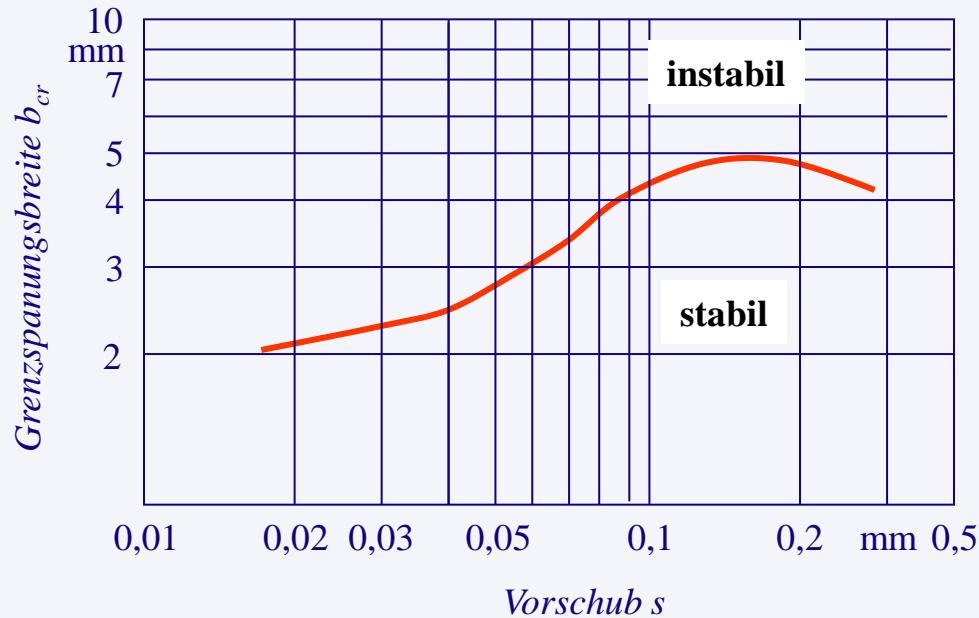


Die Stabilitätsgrenze für einen ungleichgeteilten Fräser liegt im Drehzahlbereich zwischen $n = 100 \text{ min}^{-1}$ bis $n = 225 \text{ min}^{-1}$ wesentlich höher als für eine gleichgeteilten Fräser.

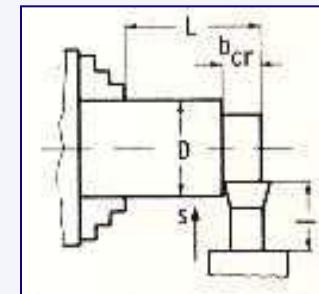
Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung



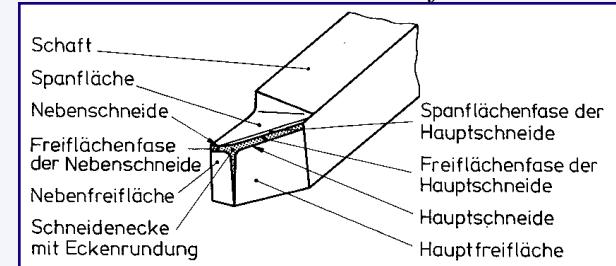
Variation des Vorschubs



Werkstoff: Ck 45 N
Schneidstoff: HM P 10
Drehzahl: $n = 900$ 1/min
Schnittgeschw. $v_c = 127$ m/min



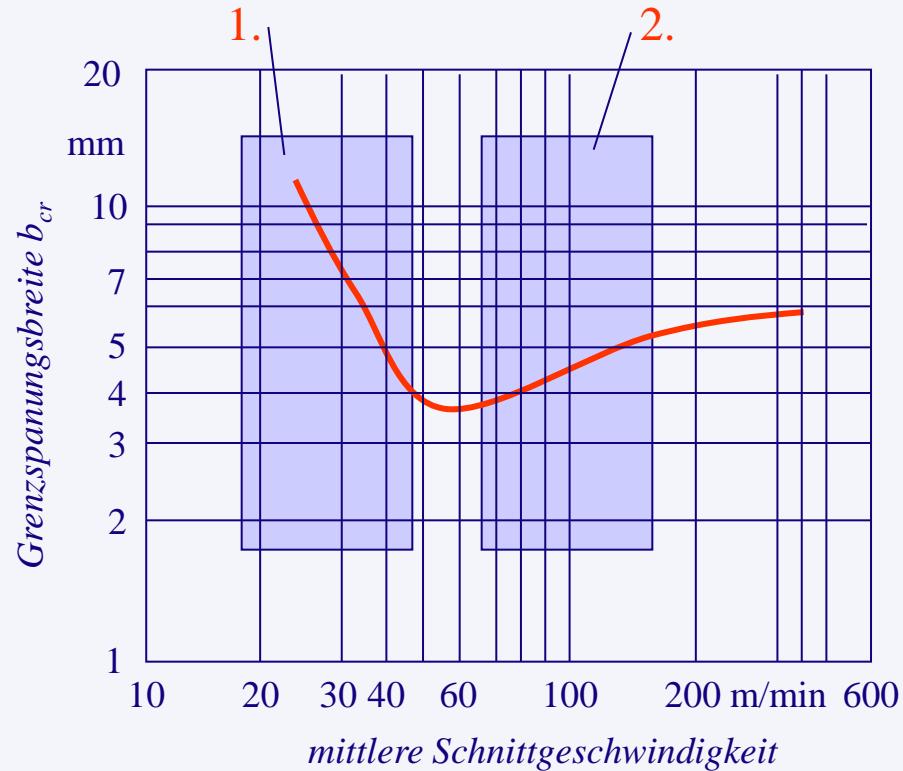
Flächen und Fasen am Drehmeißel



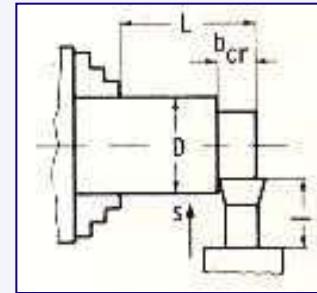
Effekt: Ein höherer Vorschub bewirkt einen größeren statischen Spandruck auf die Spanfläche. Dies führt zu einer größeren Reibung bzw. Dämpfung, welche sich positiv auf die Ratterneigung des Systems auswirkt.

Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

→ Variation der Schnittgeschwindigkeit



Werkstoff: Ck 45 N
Schneidstoff: HM P 10
Vorschub: $f = 0,1\text{mm}$



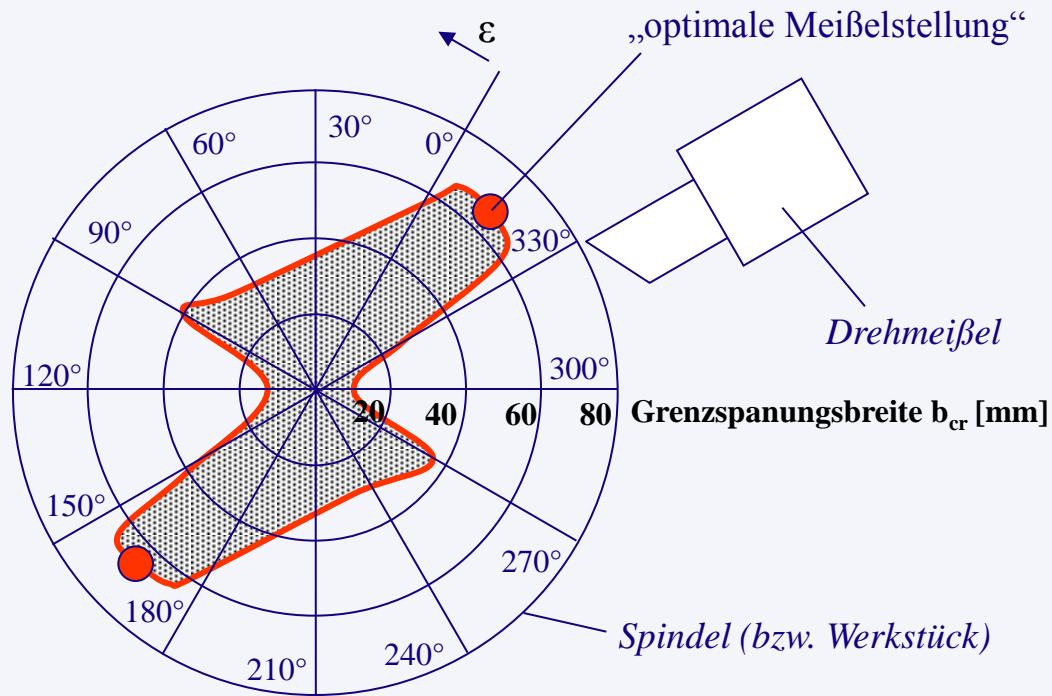
Effekt 1.: hoher Eindringwiderstand des Werkzeugs verursacht hohe Stabilitätsgrenze

Effekt 2.: bis heute keine zufriedenstellende Erklärung gefunden

Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

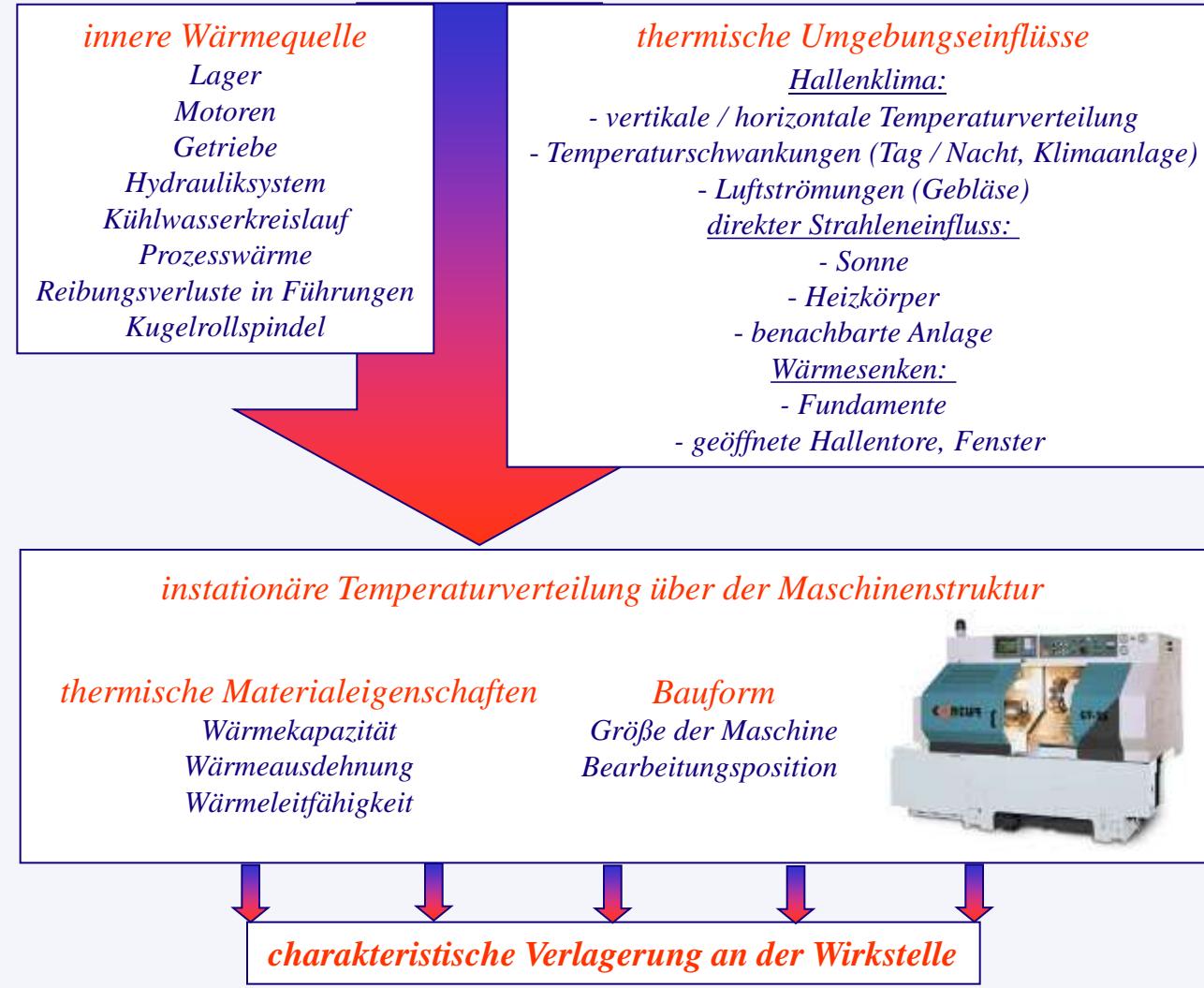


*Ausnutzung der Richtungsorientierung der dynamischen Steifigkeit
(Nachgiebigkeitsbetrachtung an einem Spindelkasten)*

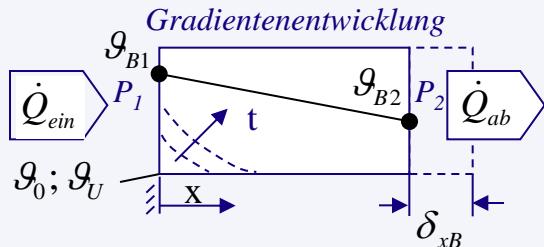


Fazit: Schnittkraft normal zu einer kritischen Eigenschwingung (keine Anregung durch Schnittkraft möglich) oder Werkstückoberfläche (Bearbeitungsfläche) parallel zu einer kritischen Eigenschwingungsrichtung (keine Spandickenänderung)

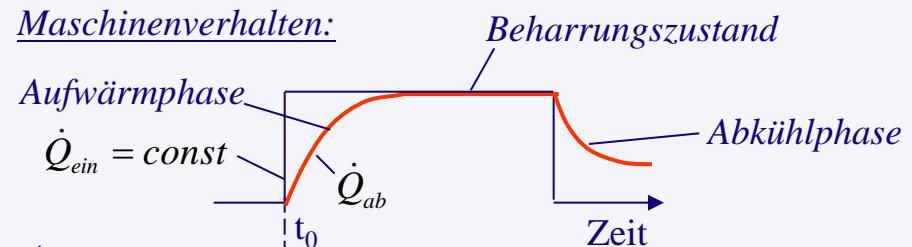
Thermische Belastungen



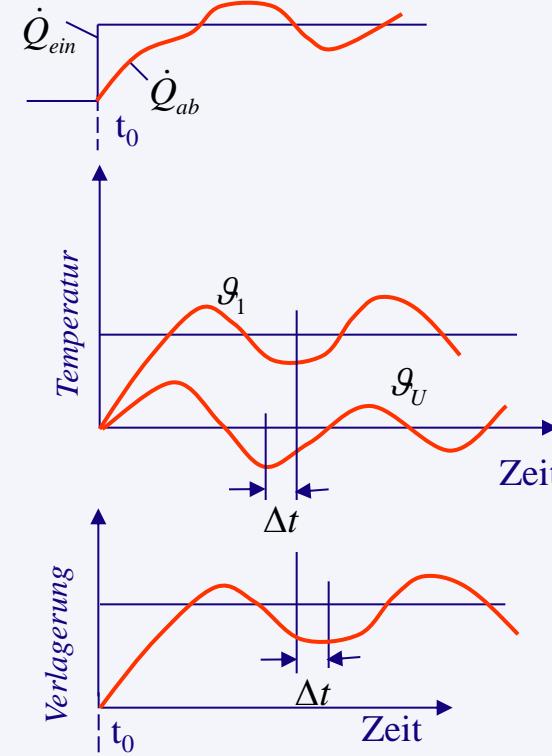
Eindimensionales Wärmeleitmodell



konstante Umgebungstemperatur

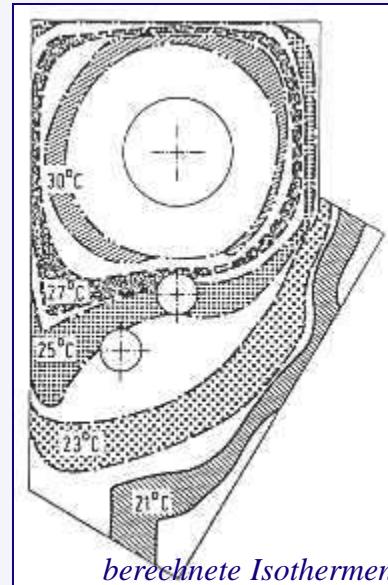
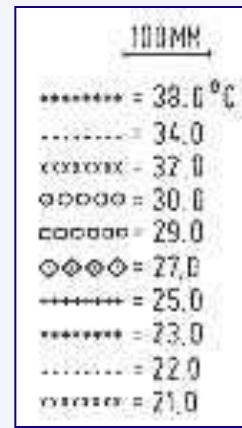
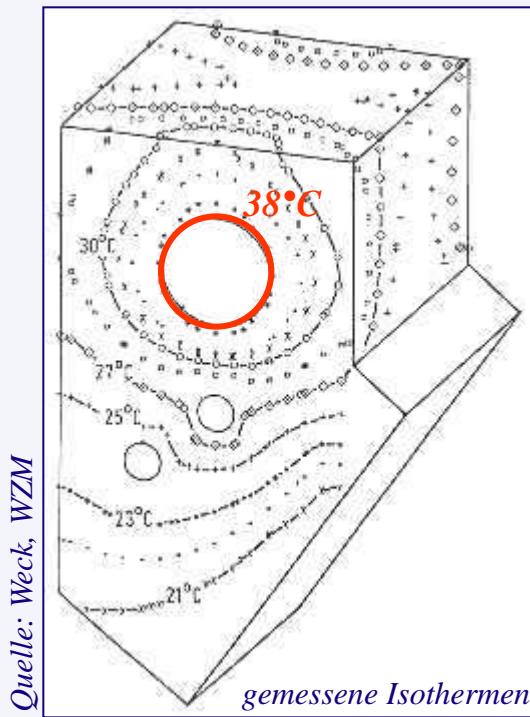


schwankende Umgebungstemperatur



Thermische Belastungen: instationäre Temperaturverteilung (Beispiel)

→ gemessene und berechnete (FEM) Isothermen (Temperaturverteilung) an einem Schrägbettspindelkasten nach einer Erwärmungsphase von 67 Minuten!



Der Schrägbettspindelkasten weist die höchste Temperatur im Bereich der Hauptspindellagerung auf. In diesem Bereich wird die Verlustleistung (Wärme) von der Lagerung selbst (aktives Bauelement) erzeugt und an anliegenden Bauteile (passive Bauelemente) abgegeben!

Thermische Belastungen: Wärmebilanz interner Wärmequellen

Belastungsfall: Umfangsfräsen mit Kühlsschmierung

Dem eigentlichen Zerspanprozess stehen nur ca. 67 % der aufgenommenen Leistung zur Verfügung. 33 % der Leistung wurden bereits in Reibungswärme, bedingt durch Motor-, Vorschubantriebs- und Hauptantriebsverluste, umgesetzt.

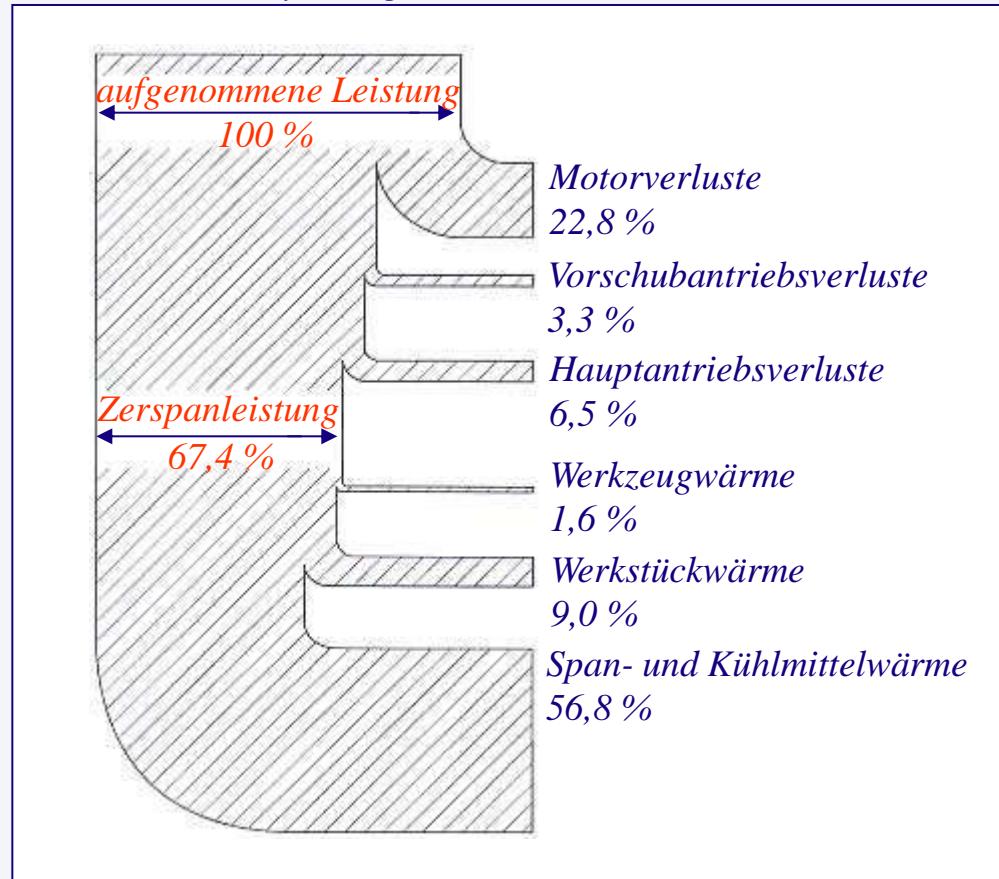
Von ca. 67 % der zur Verfügung stehenden Zerspanleistung werden ca. 57 % in Span- und Kühlmittelwärme umgesetzt.

Späne und Kühlmittel sind somit Hauptwärmequellen. Sie müssen daher schnell aus dem Bereich von Bauteilen, die die Genauigkeit der Werkzeugmaschine bestimmen, abtransportiert werden.

Maßnahmen:

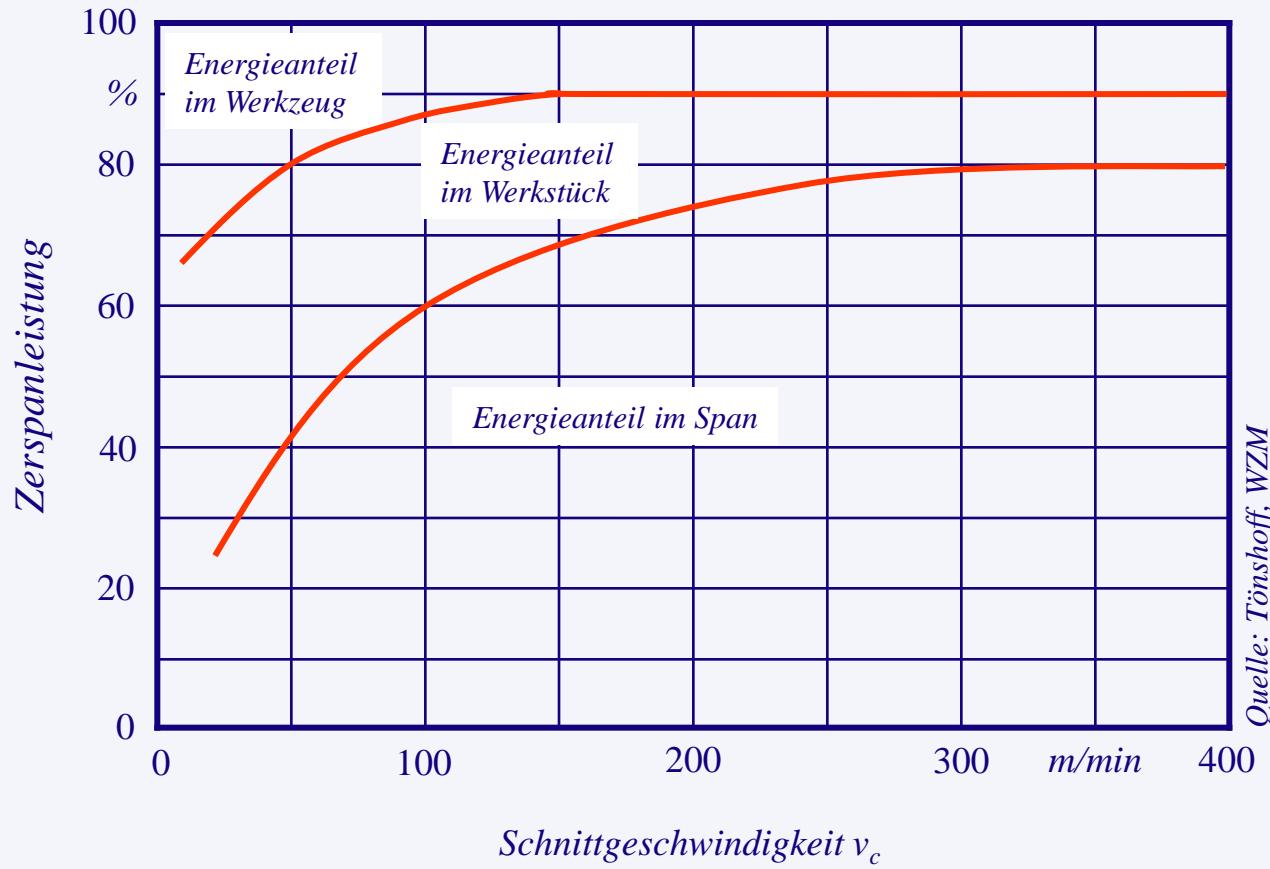
- Gestellteile gegen Späne abdecken
- Schrägbettmaschine
- Späneförderer

Sankey-Diagramm einer Fräsmaschine



Wärmebilanz interner Wärmequellen (Quelle: Diss, H. Fischer)

Thermische Belastungen: Energieverteilung an der Zerspanstelle



Der Energie- bzw. Wärmeanteil der einzelnen Komponenten (Werkzeug, Werkstück und Span) ist abhängig von der Schnittgeschwindigkeit v_c . Bei hohen Schnittgeschwindigkeiten ist der Energieanteil im Span am größten.

Thermische Belastungen

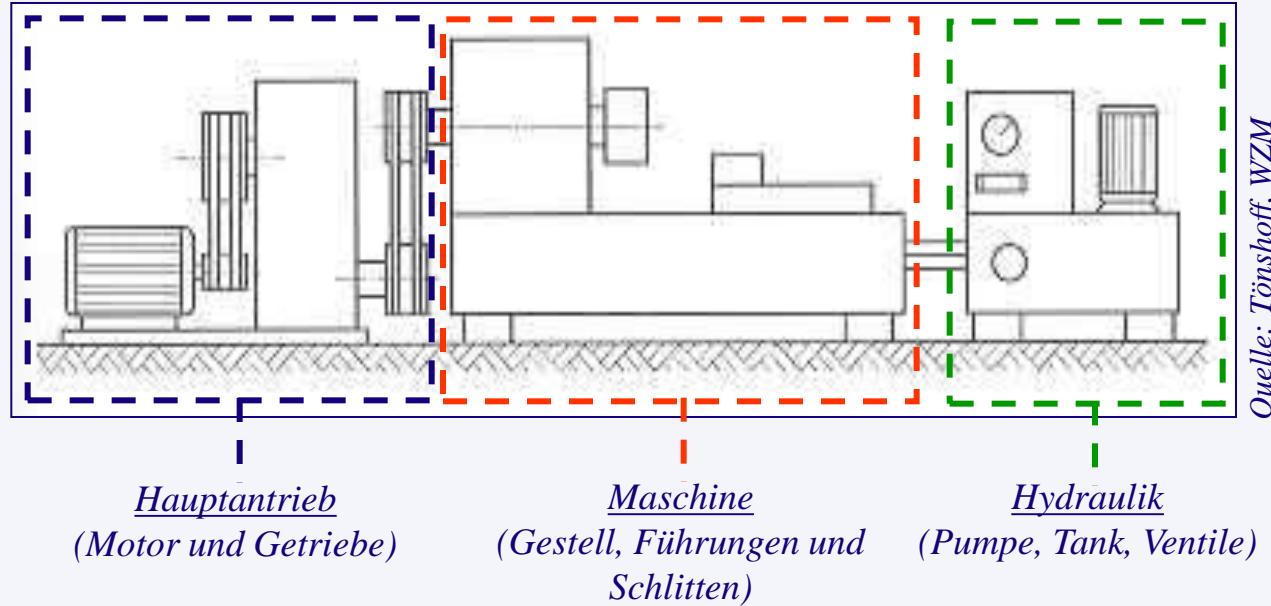
Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

Konstruktive Maßnahmen		Kompensatorische Maßnahmen		Umgebungseinfluß
Verringerung der Wärmequellen	Verringerung der Auswirkungen	mit Eingriff in den Energiehaushalt	ohne Eingriff in den Energiehaushalt	
Wärmequellen außerhalb der Maschine	thermisch optimierte Konstruktion <ul style="list-style-type: none"> • thermosymmetrisch • Kompensation von Verlagerungen thermisch optimierte Werkstoffauswahl <ul style="list-style-type: none"> • geringer Ausdehnungskoeffizient • gute Wärmeleitfähigkeit 	geregelte Kühlung geregelte Heizung	Nachstellen des Werkstücks oder Werkzeugs in Abhängigkeit von signifikanten Parametern Entwicklung von Kompensationsalgorithmen	Raumtemperatur konstant Kontrollierte Luftbewegung Wärmestrahlung unterbinden
Verbesserung des Wirkungsgrades <ul style="list-style-type: none"> • Schmierung • Lagerung • Gleitpaarung • regelbare Pumpen 				
Kühlung des Zerspanprozesses	Dehnfugen			
Späneabfuhr	wärmeabgebende Oberflächen groß Verlagerungsvektoren tangieren die Arbeitsebene			

Quelle: Prof. Uhlmann, iwf

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

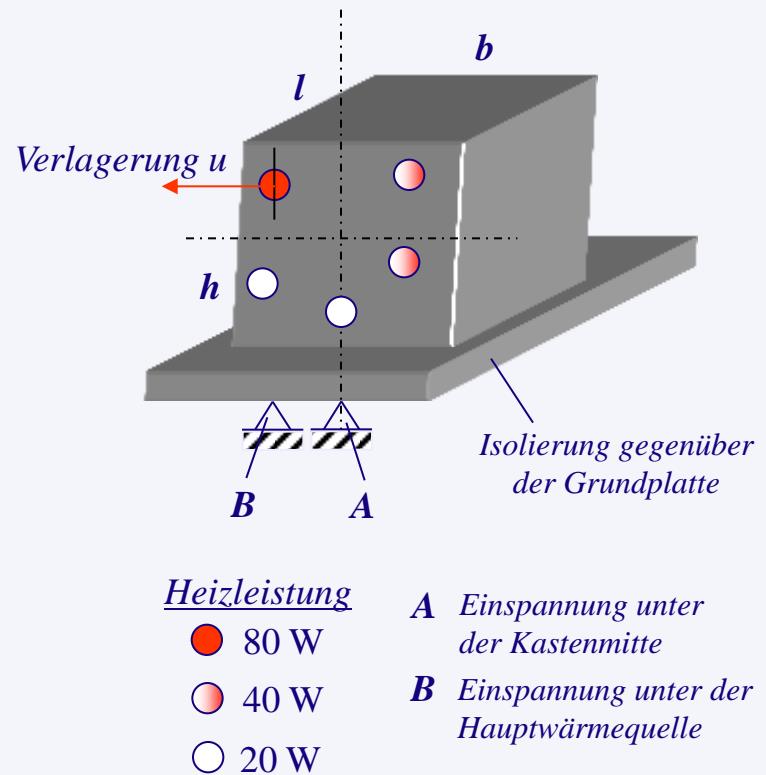
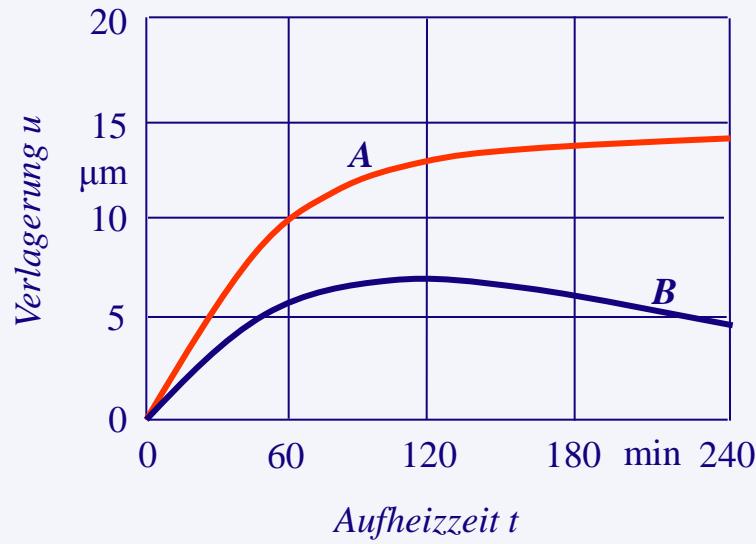
Auslagern von Wärmequellen
(Trennung der Wärmequellen vom Gestell)



Baugruppen, in denen Wärme entsteht, sollten aus dem Maschinengestell ausgelagert werden. Die thermische Belastung wird auf diese Weise gesenkt und die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine erhöht.

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

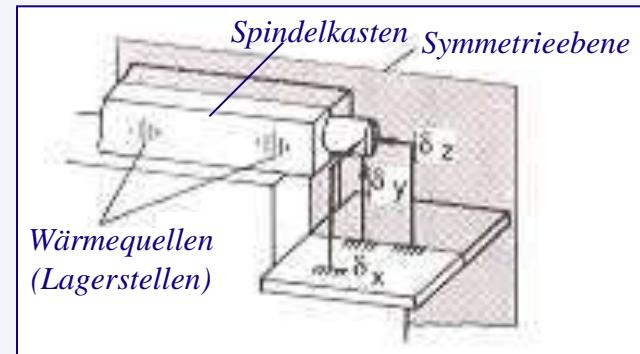
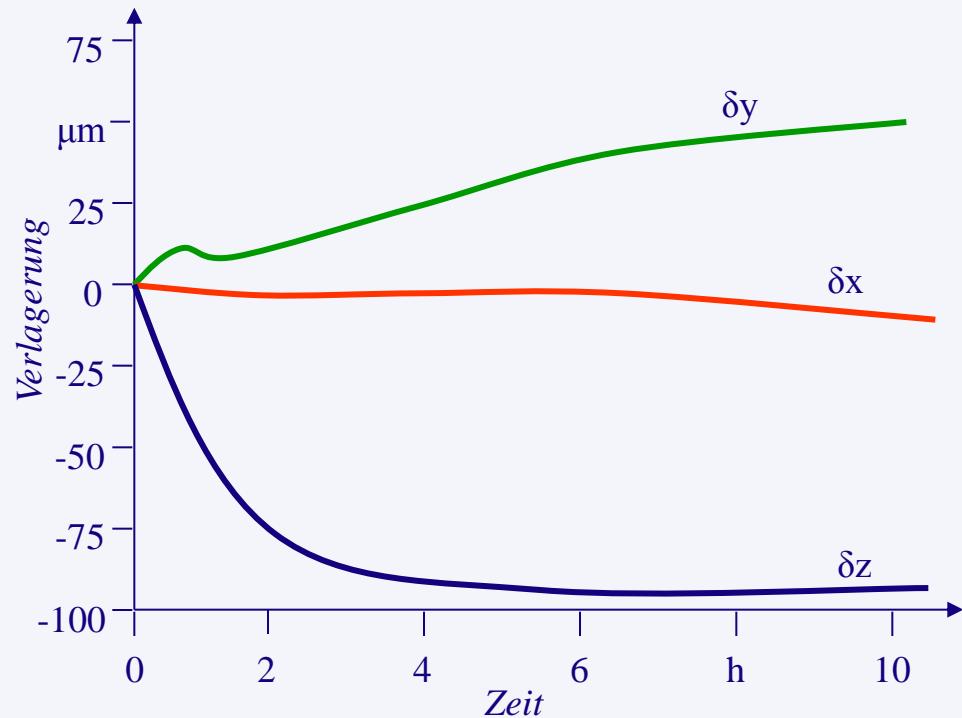
thermosymmetrische Konstruktion
(Einfluss der Einspannung auf die Verlagerung)



Durch die Variation des Befestigungspunktes konnte im gezeigten Beispiel die Verformung um ca. 50 % verbessert werden (Einspannung unter der Hauptwärmequelle). Die Baugruppenbefestigung spielt somit bei der Konstruktion einer Werkzeugmaschine eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

thermosymmetrische Konstruktion
(Thermosymmetrie bezüglich der y-z Ebene)



Thermosymmetrie bezüglich der y-z Ebene
(Quelle: Weck, WZM)

Normalerweise kann jedoch nur **eine** derartige Symmetrieebene in einer Maschine umgesetzt werden. Von großer Bedeutung ist dies für Maschinen mit nur **einer bevorzugten Achse** (z.B. x-Achse einer Drehmaschine)

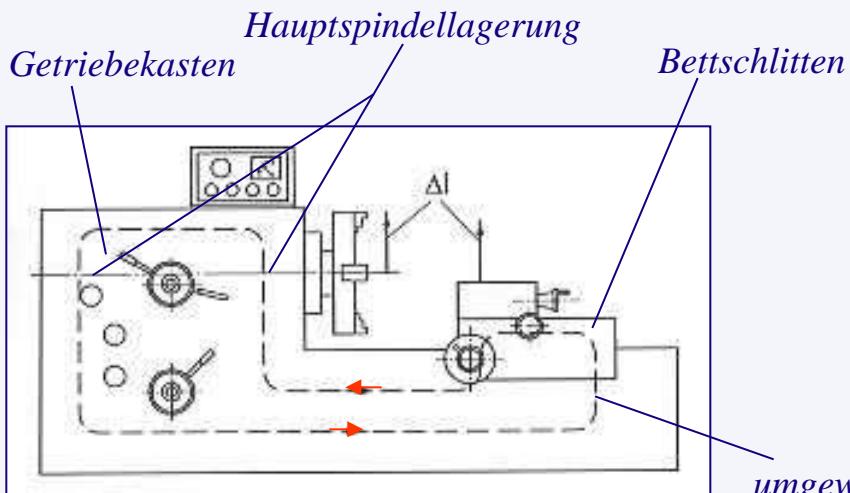
Durch gezielte Ausnutzung der Symmetrieebene konnte die x-Verformung des Spindelkastens auf nur 10 μm reduziert werden.

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

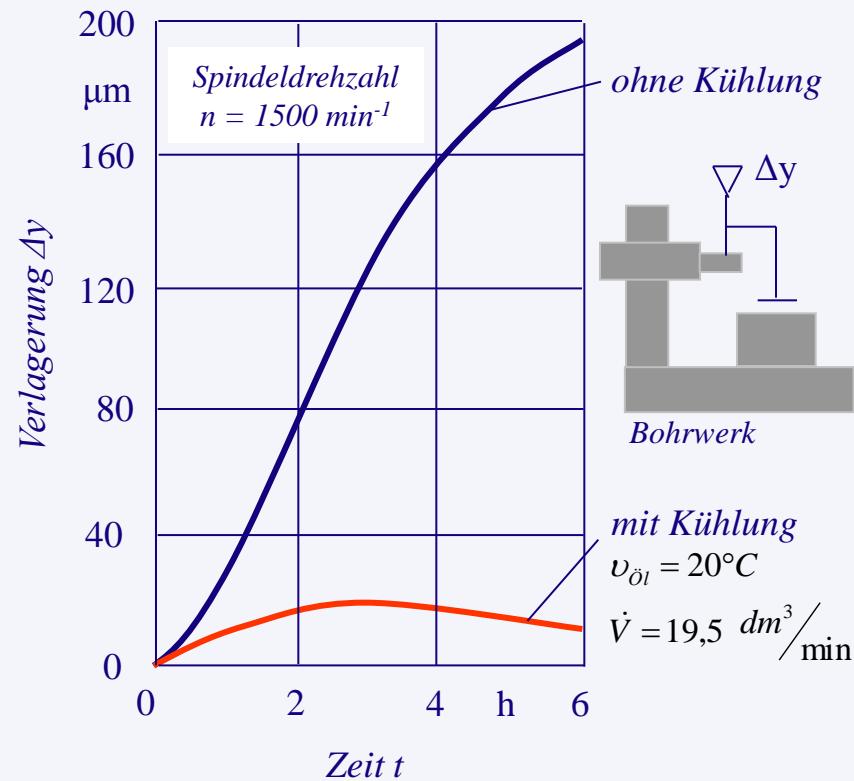
→ **Kühlung/Erwärmung**
(Temperaturausgleich durch Ölumlauf)

Eine Kompensation durch Erwärmung wird über den Temperaturausgleich durch Umwälzen des Schmieröls in der gesamten Maschine erreicht.

Alle Bauteile wachsen ungefähr gleichmäßig!



Temperaturausgleich an einer Bettmaschine durch Ölumlauf (Quelle, Tönshoff, WZM)



Verringerung der vertikalen Spindelverlagerung durch Öl Kühlung an einem Bohrwerk (Quelle: Tönshoff, WZM)

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

→ *gezielte Strukturschwächung*
(nur in Einzelfällen möglich)

Die inneren thermisch bedingten Verformungskräfte einer Struktur sind u.a. vom **Materialquerschnitt** abhängig. Im Einflussbereich einer Wärmequelle kann die daraus resultierende Verformung durch eine gezielte Strukturschwächung reduziert werden.

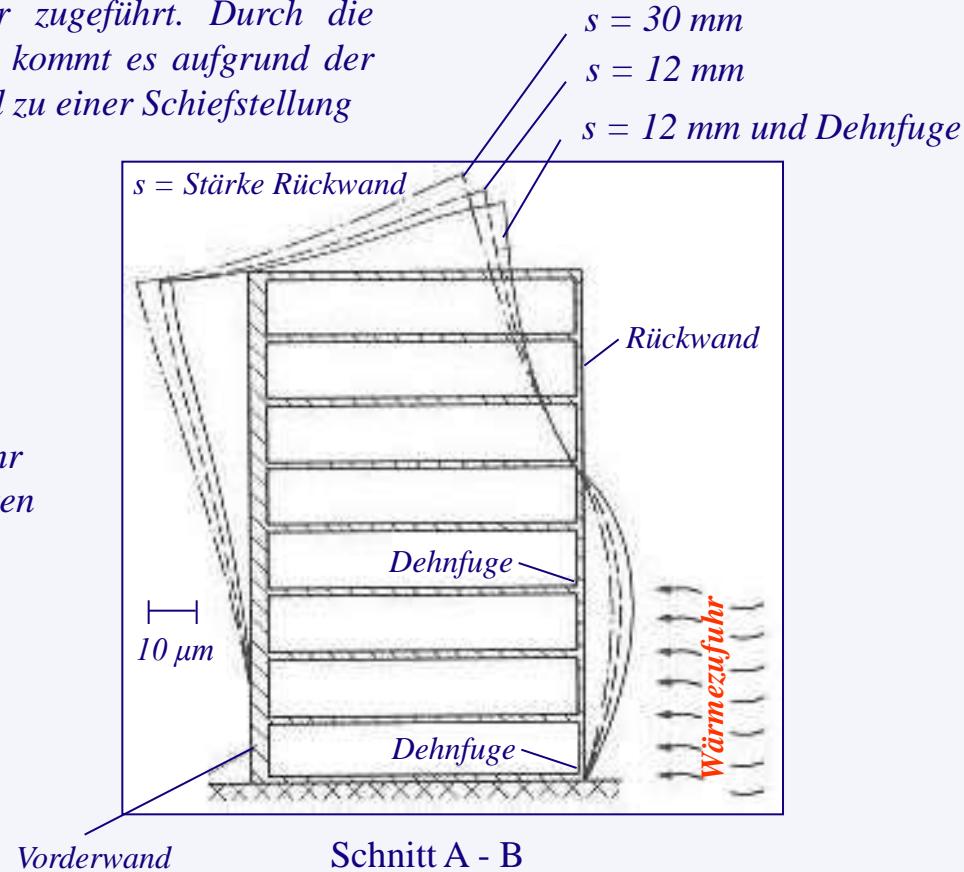
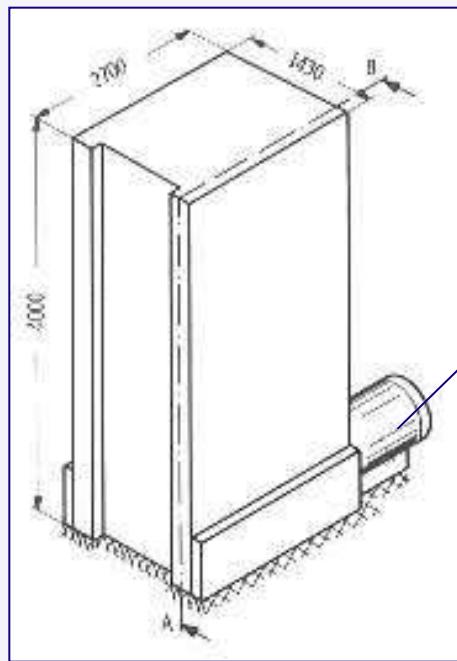
$$\text{innere thermische Verformungskraft} — F_T = \alpha \cdot A \cdot E \cdot \Delta \vartheta$$

Ausdehnungskoeffizient
Materialquerschnitt
Temperaturänderung
Elastizitätsmodul

Bei einer Strukturschwächung ist darauf zu achten, dass die statischen und dynamischen Eigenschaften des Bauteils (Maschinengestell) keine unzulässigen Werte annehmen!

Gezielte Strukturschwächung: Maschinenständer (Beispiel)

Belastungsfall: Dem Maschinenständer wird etwa 3 KW Wärmenleistung durch einen angeflanschten Motor zugeführt. Durch die einseitige Erwärmung des Ständers kommt es aufgrund der größeren Ausdehnung der Rückwand zu einer Schiefstellung



Durch eine Verringerung der Rückwanddicke s konnte die Schiefstellung des Maschinenständers verbessert werden!

Thermische Belastungen: thermisch optimierte Werkstoffauswahl

thermische Kenngrößen (Quelle: Tönshoff, WZM)

	Wärmekapazität $c [J/kgK]$	Wärmeleitfähigkeit $\lambda [W/mK]$	Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha [10^{-6}/K]$
Baustahl	460	50	11,0
Gußeisen	450	50	9,0
Polymerbeton	882	1,5	15
Wasser	4183	0,59	200
Spindelöl	1851	0,144	740

Beispiel: Polymerbeton

Die geringe Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit der hohen spez. Wärmekapazität führt zu einer relativ hohen thermischen Trägheit. Dies bedeutet, dass Lastschwankungen zu kleinen Temperaturänderungen und damit auch zu kleinen Temperaturverformungen führen.

Führungen

Aufgaben und Anforderungen

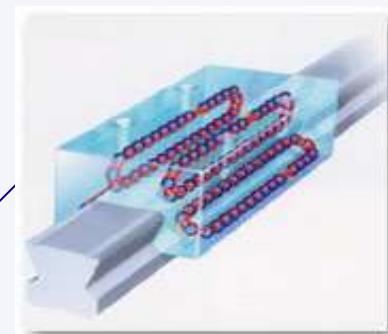
Führungen haben die Aufgabe, den zur Ausführung der Schnitt- und Vorschubbewegungen bestimmten Bauteile (Schlitten, Spindelkasten, Pressenstößel usw.) **eine exakte, lineare** Bewegungsbahn zu geben. Ferner müssen Führungen Bearbeitungs-, Gewichts- und Beschleunigungskräfte aufnehmen.

niedrige Herstellkosten

kostengünstige und einfache Fertigung

gute Montierbarkeit

preisgünstige Werkstoffe



Linearführung mit Kugelkette (Quelle: THK)

geringe Betriebskosten

Betriebssicherheit

geringe Schmutzempfindlichkeit

geringer Wartungsbedarf

Überlastbarkeit

hohe Arbeitsgenauigkeit und großes Leistungsvermögen

hohe Steifigkeit

geringe Reibung

gute Dämpfung

geometrische und kinematische Genauigkeit

geringer Verschleiß

spielfrei bzw. geringes Spiel

Einteilung der Führungen nach Art der

Führungsflächentrennung:

Bewegungsführungen

Verstellführungen

Führungen

Gleitführungen

Walzführungen

hydrodynamische
Gleitführungen

hydrostatische
Gleitführungen

aerostatische
Gleitführungen

freien Bewegung:

Rund- und Geradführung

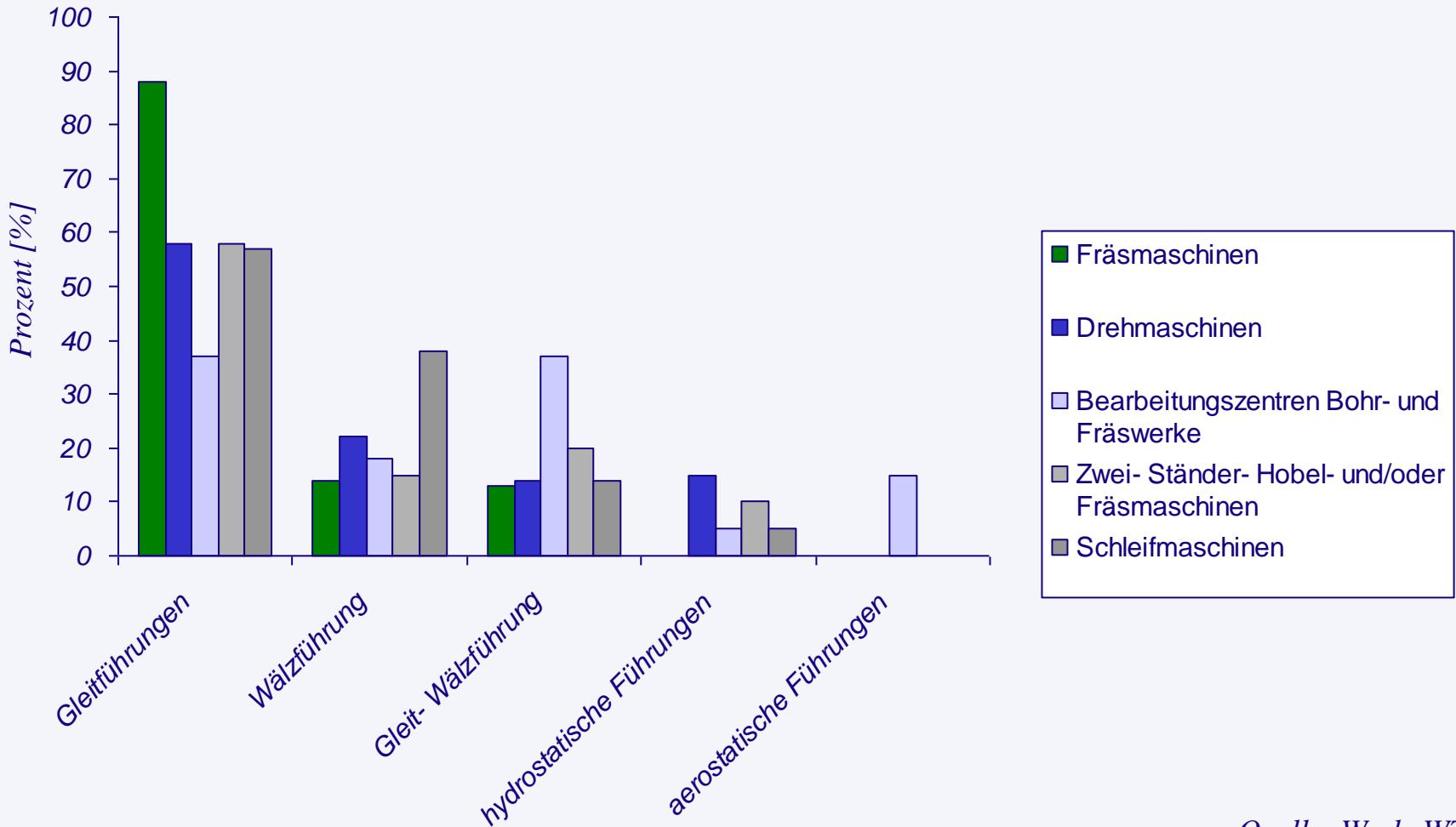
Querschnittsform:

Dreieck: V-, Dach-, Schwalbenschwanzführung

Kreis: Säulenführung

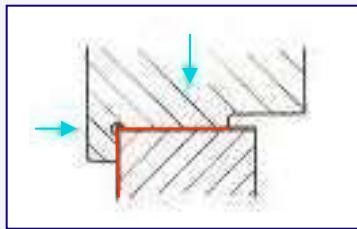
→ Führungssysteme, welche in der Lage sind abhebende Kräfte aufzunehmen, werden als geschlossene andernfalls als offene Führungen bezeichnet.

Häufigkeit der Führungsprinzipien



Führungsformen

Flachführung



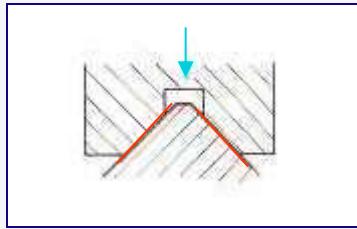
Vorteil

- einfache Fertigung
- einfache Nachbearbeitung
- gute Haftung des Schmieröls

Nachteil

- kein abgleiten von Schmutz und Späne
- kein selbstdämmiges Nachstellen

Dachführung und V-Führung



Vorteil

- Abgleiten von Schmutz und Späne
- selbstdämmiges Nachstellen

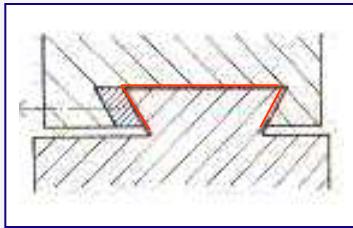
Nachteil

- Ablaufen des Schmieröls
- erhöhte Flächenpressung

Führungsformen

Schwalbenschwanzführung

(geschlossene Bauform)



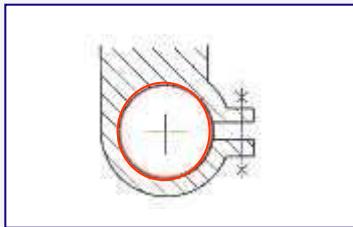
Vorteil

- *geringe Bauhöhe*
- *Kraftaufnahme in 3 rotatorischen und 2 translatorischen Freiheitsgraden*

Nachteil

- *kein selbständiges Nachstellen*
- *aufwendige Fertigung*
- *Gefahr des Führungswangenbruchs*

Rundführung



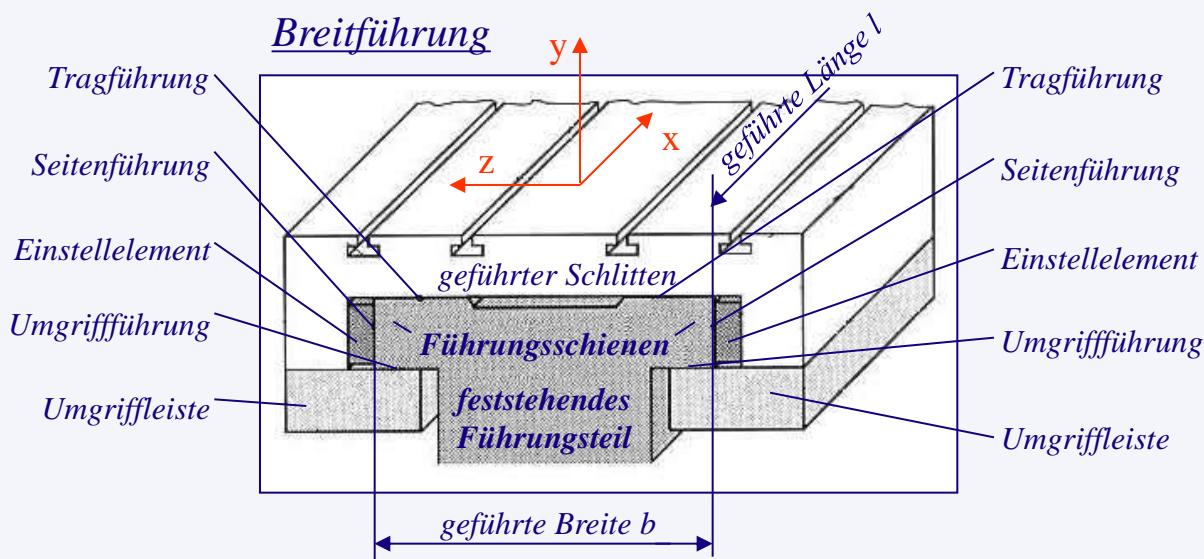
Vorteil

- *einfache Fertigung*
- *hohe Führungsgenauigkeit*
- *allseitiger Kraftangriff möglich*

Nachteil

- *kein selbstdäigiges Nachstellen*
- *begrenzte seitliche Belastung*

Führungen: grundsätzlicher Aufbau einer Geradführung



Führung	schieben in (nicht möglich)	drehen um (nicht möglich)
Tragführung	-y	z, x
Seitenführung	+z, -z	x, y
Umgriffführung	+y (abheben), [+z, -z]	x, y, z

Das Spiel der Seitenführung muss über Einstellelemente eingestellt werden!

Das notwendige Spiel in z-Richtung muss durch eingepaßte Umgriffleisten erzeugt werden!

Grundsätzlicher Aufbau einer Geradführung: Breit- und Schmalführung

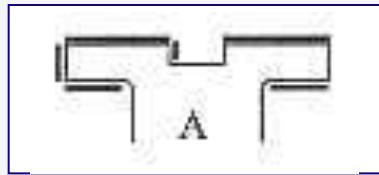
Breitführung: Verwendung der äußereren Führungsflächen für die Seitenführung

Um ein Verkanten des Schlittens zu vermeiden (Schubladeneffekt) sollte das **Führungsverhältnis**

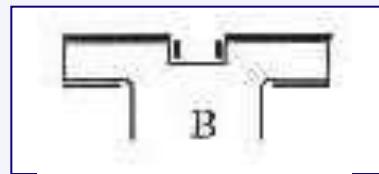
$$\frac{\text{geführte Länge}}{\text{geführte Breite}} = \frac{l}{b} > 1,3 \dots 1,5$$

sein.

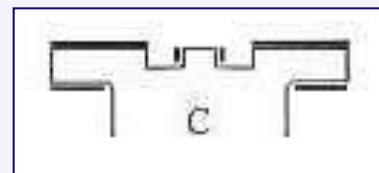
Maßnahmen zur Erreichung der kleinsten maximalen Führungslänge l oder eines großen Führungsverhältnisses l/b :



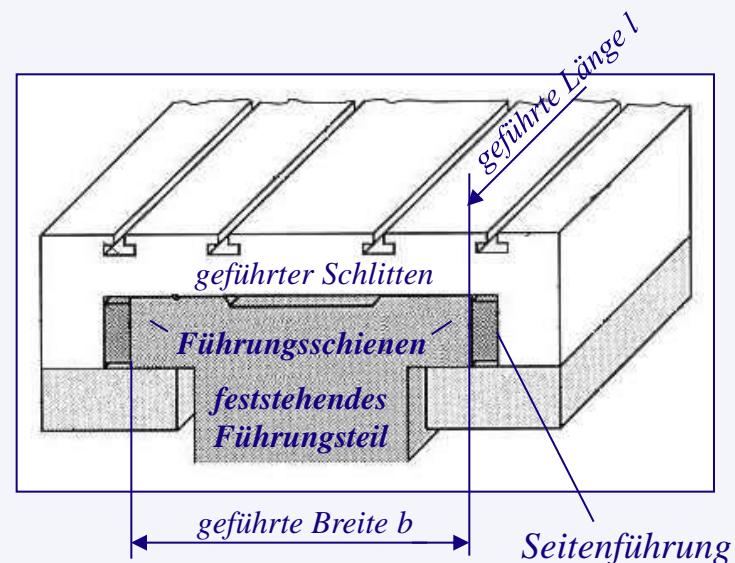
beide Seitenführungsflächen an eine Führungsschiene legen



die Seitenführungsflächen an die Innenseite der Führungsschienen legen



separate Flächen für die Seitenführung schaffen



positive Auswirkungen auf:

- Genauigkeit der Führung
- Verschiebekräfte

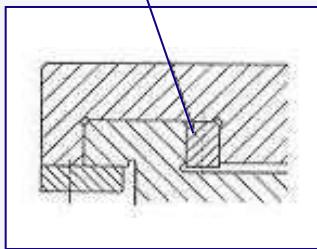
Einstellen von Führungen

Führungen, die auf die Grundformen Rechteck oder Dreieck zurückgeführt werden können, sind durch

- *Paßleisten*
- *Stellleisten oder*
- *Keilleisten*

einstellbar.

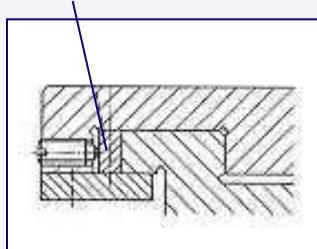
Paßleiste



Paßleisten werden nach dem Ausmessen des Spiels gefertigt und eingesetzt

- *keine weitere Anpassung möglich*
- *bei Verschleiß muss eine stärkere Paßleiste gefertigt werden*

Stellleiste



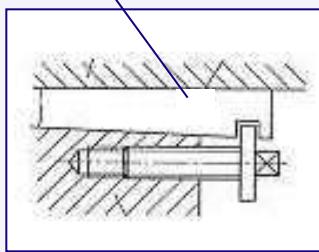
Einstellung erfolgt über Stellelemente (z.B. Schrauben)

- *geringe Herstellkosten*
- *ungleichmäßiges Tragbild bedingt durch punktuellen Angriff der Stellleisten*
- *eingeschränkte Steifigkeit*

Einsatzbereich: Stellführungen

Einstellen von Führungen

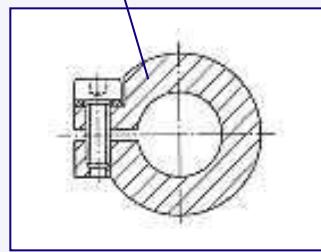
Keilleiste



Keilleisten weisen eine Verjüngung in Führungsrichtung auf

- Einstellung des Spiels über verschieben der Keilleiste in Führungsrichtung
- hohe Steifigkeit

geschlitzte Buchse

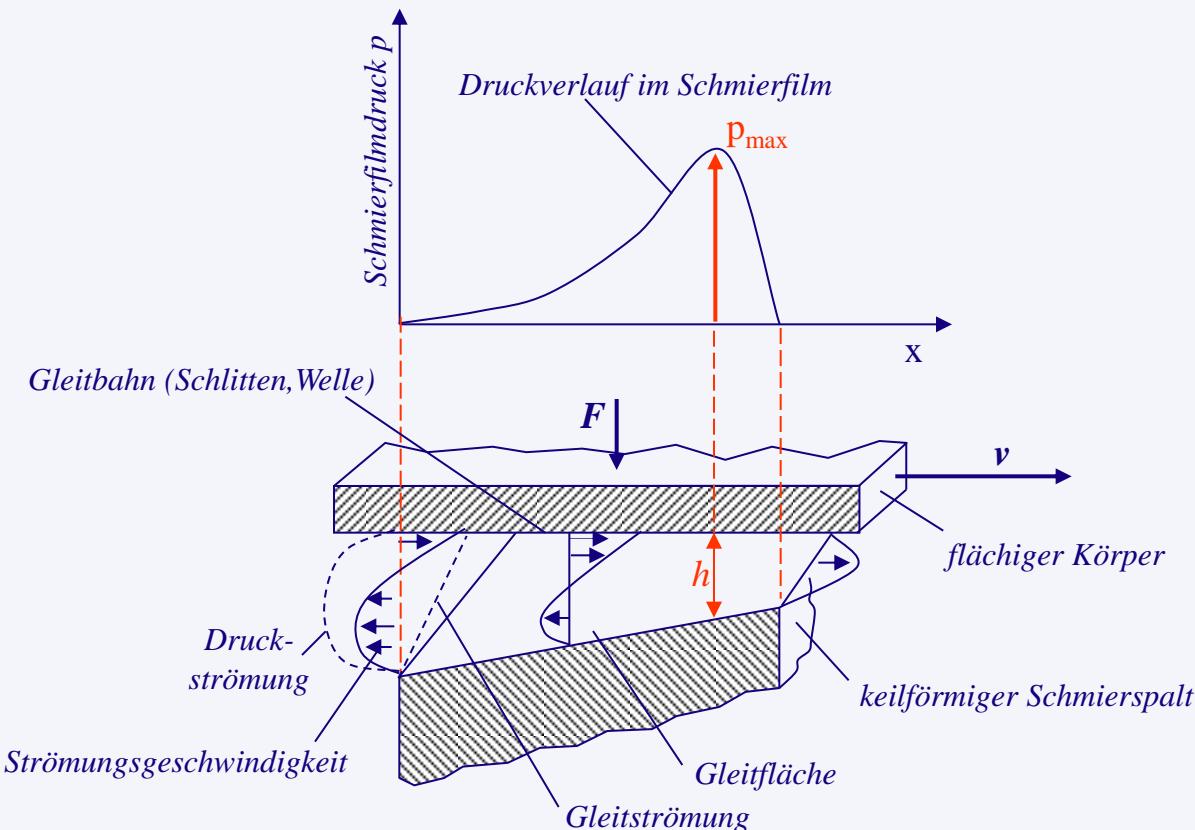


Das Nachstellen von Rundführungen ist schwierig, da der Vorgang eine Krümmungsänderung des Radius mit sich bringt.

- in gewissen Grenzen ist ein Nachstellen des Spiels über elastische Führungshülsen möglich

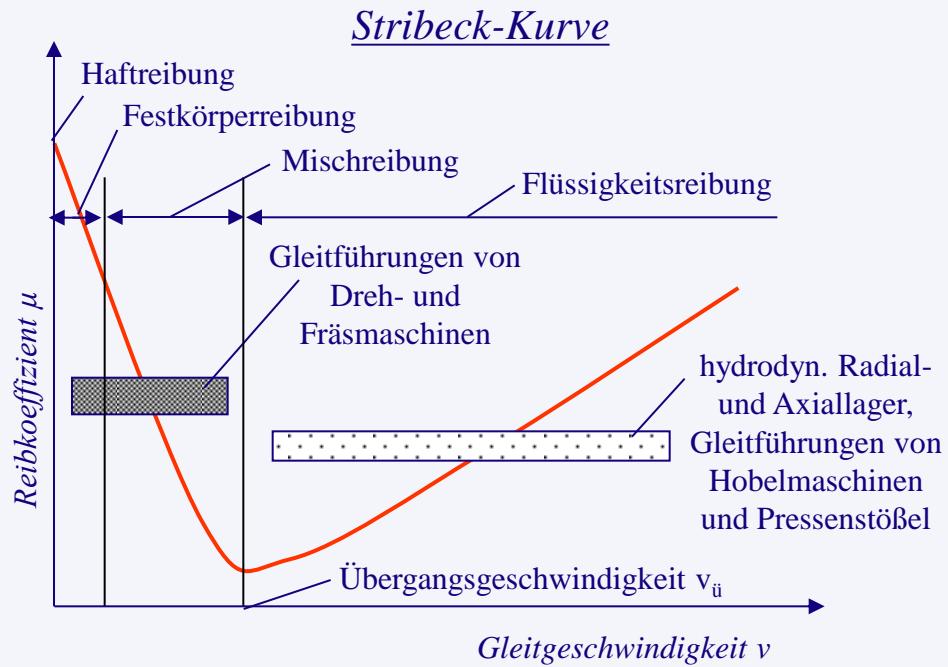
Gleitführung mit hydrodynamischer Schmierung

Funktionsprinzip: Wird ein flächiger Körper über einen keilförmigen Schmierspalt bewegt, so entsteht durch das Einschleppen des Schmierstoffs in den sich verengenden Keilspalt ein Flüssigkeitsdruck, der den Körper aufschwimmen lässt.



Gleitführung mit hydrodynamischer Schmierung

Gleitführungen arbeiten je nach Verfahrgeschwindigkeit in unterschiedlichen Reibungsgebieten bei unterschiedlichen Reibkoeffizienten!



Erst im Gebiet der Flüssigkeitsreibung ist eine vollständige Trennung der Führungen durch einen Schmierfilm vorhanden und der Reibwiderstand am geringsten.
Eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer größeren Reibung im Schmierstoff, was einen Anstieg des Reibwerts zur Folge hat!

Gleitführung mit hydrodynamischer Schmierung



*Die meisten Führungssysteme in Werkzeugmaschinen arbeiten im Gebiet der Mischreibung. Damit sind folgende **Nachteile** verbunden:*

- *ungünstiges Reibungsverhalten*
- *höherer Verschleiß*
- *geringe Bewegungsgleichförmigkeit bei kleinen Geschwindigkeiten (Stick-Slip-Effekt)*
- *keine Spielfreiheit*



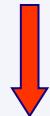
*Trotz dieser Nachteile werden hydrodynamische Führungen aufgrund folgender **Vorteile** eingesetzt:*

- *geringer Fertigungsaufwand*
- *geringer Montage aufwand*
- *geringer Wartungsaufwand*
- *ausreichend gutes statisches Verhalten*
- *ausgezeichnete Dämpfungseigenschaften*

Gleitführung mit hydrodynamischer Schmierung: Stick-Slip-Effekt (Ruckgleiten)

Stick-Slip-Effekt: (bei kleinen Gleitgeschwindigkeiten im Bereich der Mischreibung)

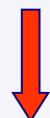
Um den Schlitten in Bewegung zu setzen, muss die Haftriebung überwunden werden.



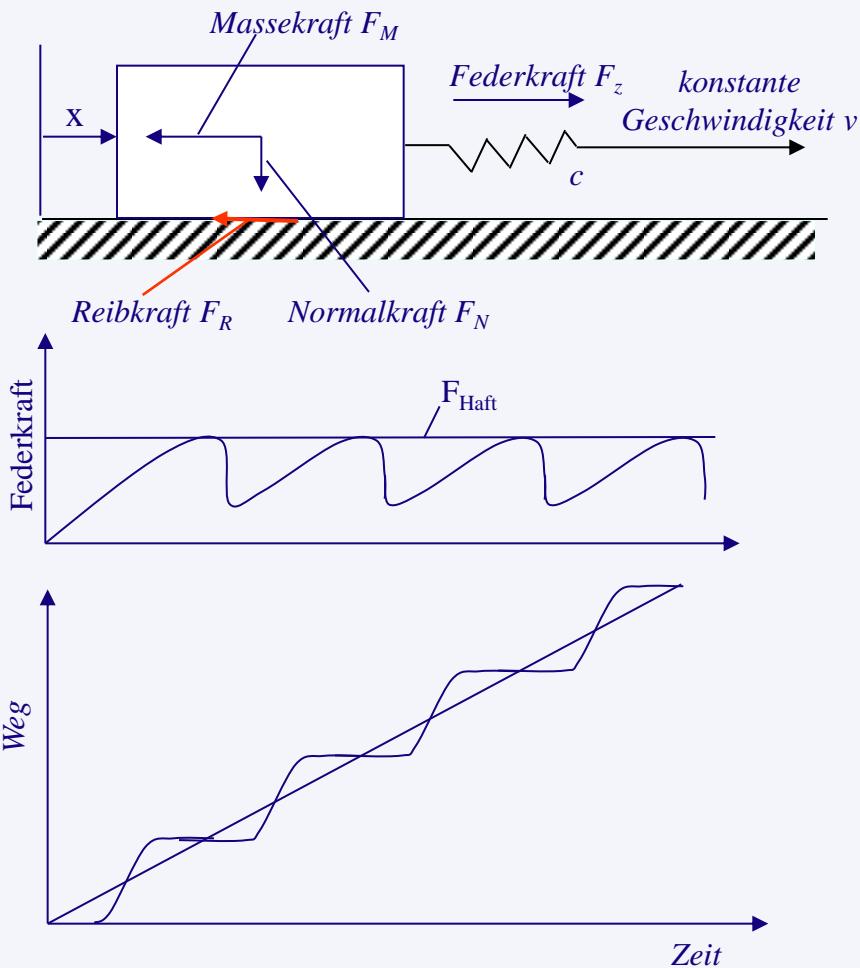
Der dazu notwendige Antrieb besitzt eine endliche Steifigkeit (Zugfeder) und wird bei der Überwindung der Haftriebung durch die dabei entstehende Kraft gespannt.



Setzt sich der Schlitten in Bewegung, geht die Haftriebung in die Mischreibung über und der Reibungskoeffizient nimmt ab (siehe Stribeck-Kurve).



Dadurch wird der Schlitten beschleunigt (Gleitruck) und die Feder entspannt. Fällt dabei die Federkraft unter die zu überwindende Reibkraft, bleibt der Schlitten erneut stehen und der Zyklus wiederholt sich!



Modell zum Stick-Slip-Effekt (Quelle: Hirsch, WZM)

Maßnahmen zur Verminderung des Stick-Slip-Effekts

Maßnahmen:

- höhere statische Steifigkeit der Elemente des Vorschubantriebs
- geringere bewegte Massen

Steigung im vorderen Ast der Stribeck-Kurve vermindern oder vermeiden:

- Verwendung geeigneter Führungsbahnwerkstoffe
- gefräste, geschliffene oder geschabte Führungsflächen
- Verwendung hochviskoser Schmierstoffe

Werkstoffpaarung

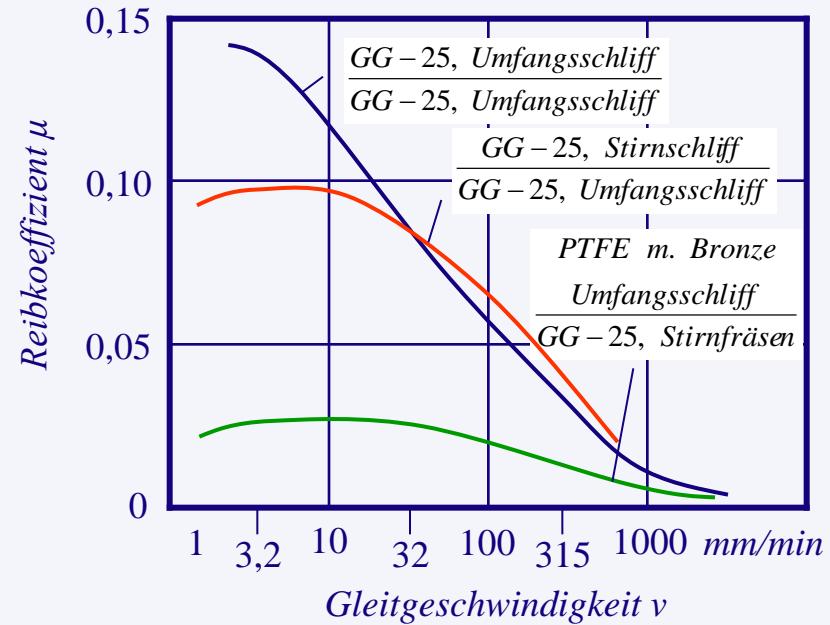
Das leichter herzustellende bzw. das kleinere Führungsteil erhält den Werkstoff mit der etwas geringeren Härte!

Grauguß – Grauguß

Grauguß – Stahl (gehärtet)

Kunststoff – Grauguß

Kunststoff – Stahl



Gleitweg: 60 km
 Pressung: 50 N/cm²
 Gleitfläche: 50 x 50 mm²
 Gleitöl: $\eta_{20} = 170$ mPas
 Intervallschmierung: 15s

Schmiernuten

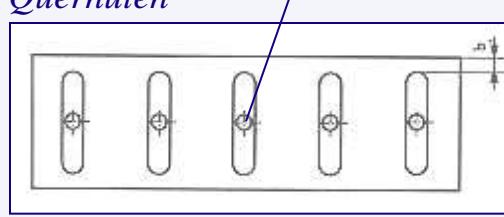
Schmiernuten haben die Aufgabe, die Zuführung und Verteilung des Schmiermittels auf der gesamten Gleitfläche sicherzustellen. Sie werden grundsätzlich in die Schlittenführung eingearbeitet.

Gestalt und Lage der Schmiernuten haben einen entscheidenden Einfluss auf den Schmierdruckaufbau.

Beispiel: bei Verwendung von Längsnuten kann kein Schmierdruck aufgebaut werden

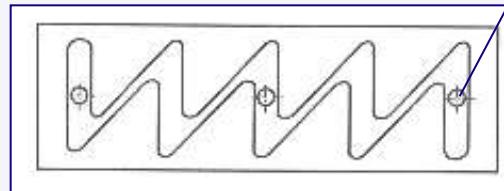
Schmiernutenformen (Beispiele)

Quernuten



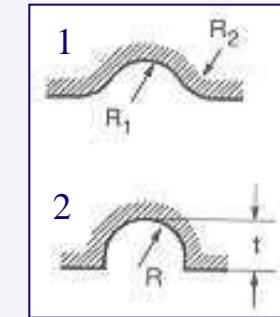
- **hoher Schmierdruck durch Quernuten (hohe Tragkraft)**
- **günstiges Reibungsverhalten**

Quernuten mit Diagonalnuten



- **verminderter Schmierdruckaufbau durch zusätzliche Diagonalnuten (verminderte Tragkraft)**
- **kein zu starkes Aufschwimmen bei hohen Gleitgeschwindigkeiten**
- **ungünstigeres Reibungsverhalten (Verschleiß)**

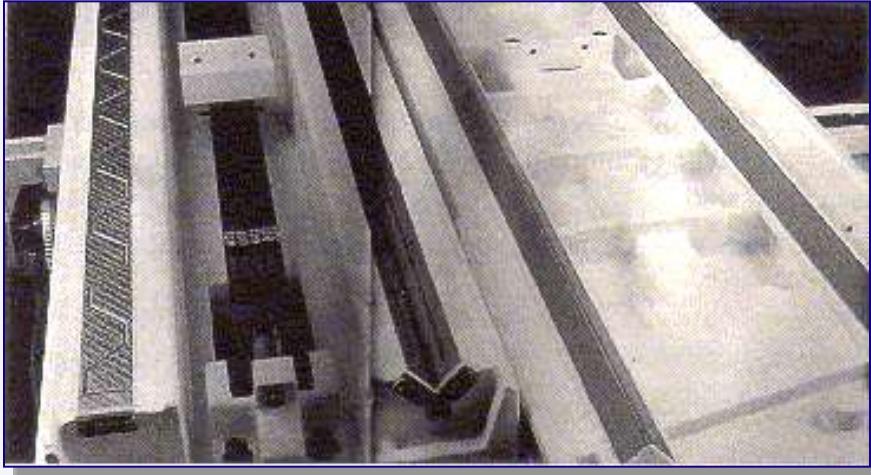
Schmiernutenquerschnitt



günstig

ungünstig
(Schmiermittel wird abgestriffen)

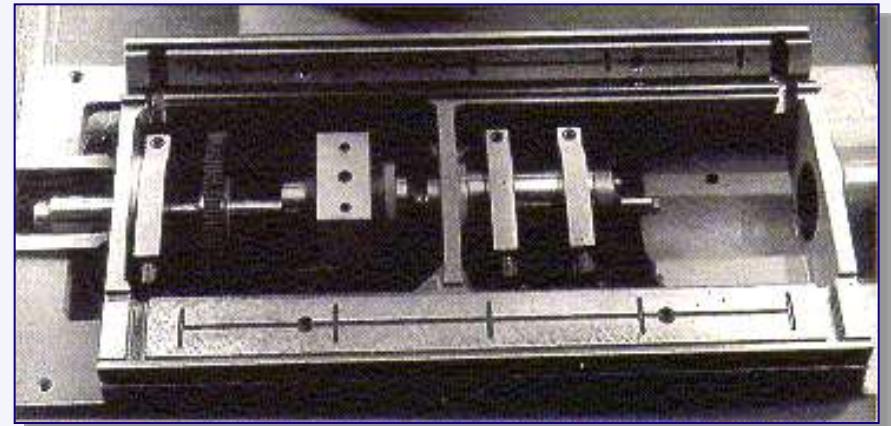
Schmiernuten: hydrodynamische V-Flach-Führungen ohne Umgriff



*Führungsbahnen beschichtet, Gegenbahnen
geschliffen und von Hand gemustert*

Quelle:Hirsch, WZM)

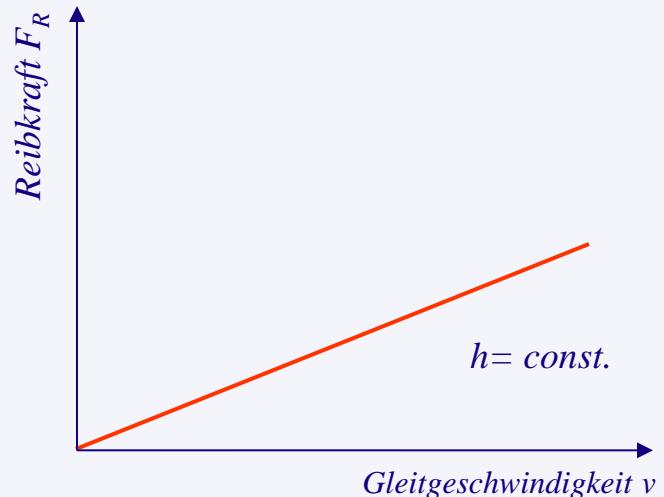
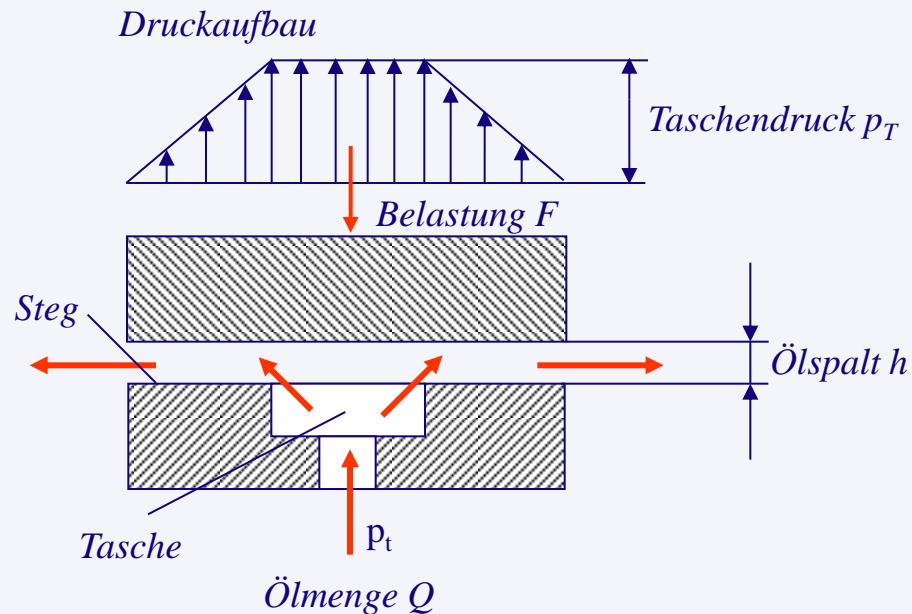
*Führungsbahnen unbeschichtet,
geschliffen und eingeschabt*



Quelle:Hirsch, WZM)

Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung

Funktionsprinzip: Der unter erhöhtem Druck zugeführte Ölstrom entweicht durch den dabei entstehenden Führungsspalt h . Der Führungsspalt entspricht einer Drosselstelle, so dass in der Öltasche ein Überdruck p_t aufgebaut werden kann, der zu den Stegseiten hin wieder abfällt. Beide Führungshälften werden, selbst im Stillstand, durch den aufgebauten Öldruck voneinander getrennt.



Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung

Vorteile:

- verschleißfrei
- hohe Bewegungsgleichförmigkeit (kein Stick-Slip-Effekt)
- gutes statisches Verhalten
- hohe Tragfähigkeit
- gute Dämpfung in Tragrichtung

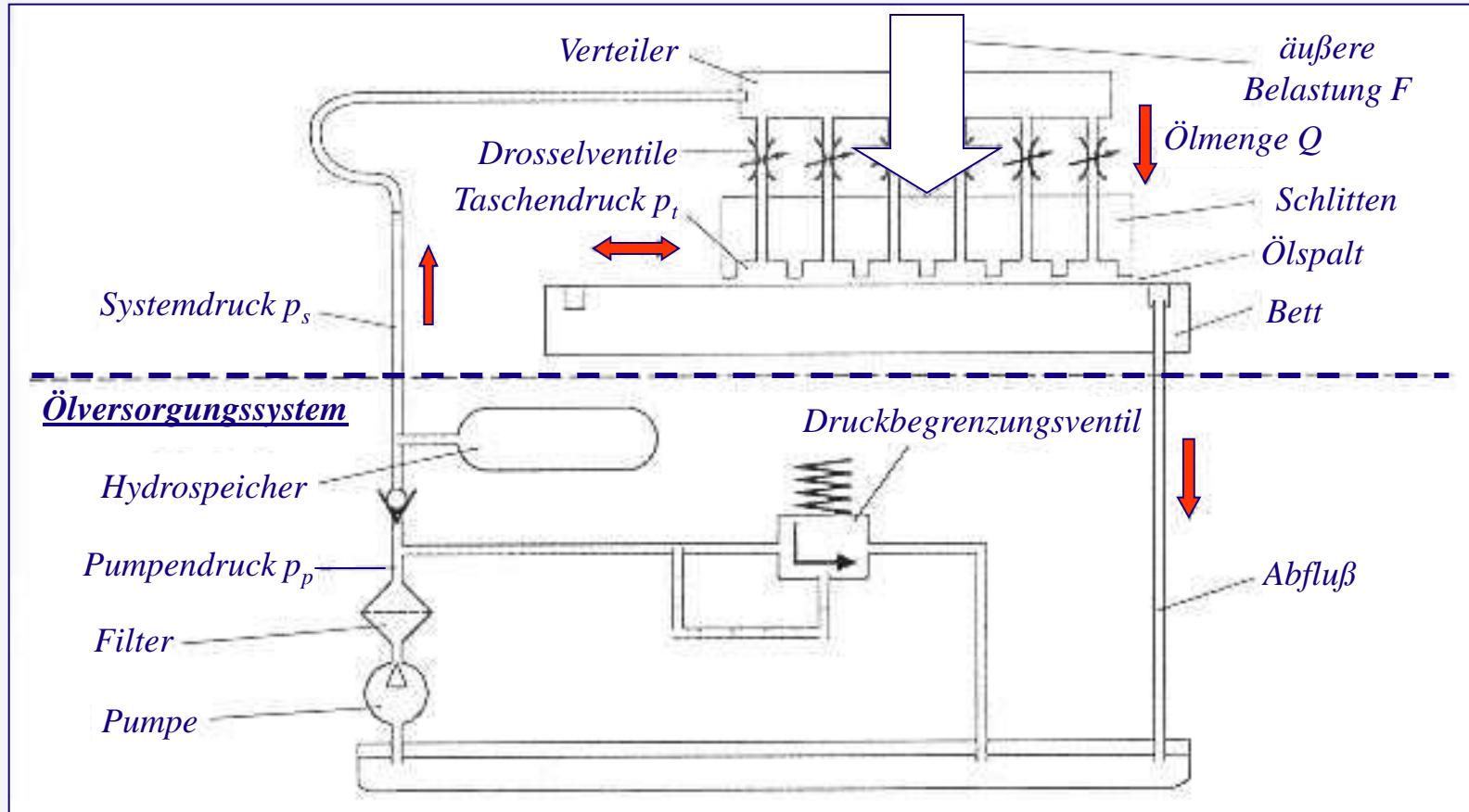
Nachteile:

- hoher Fertigungsaufwand
- hoher Montageaufwand
- hoher Wartungsaufwand
- hohe Kosten für die Ölversorgung
- geringe Dämpfung in Bewegungsrichtung



Damit sich entsprechend den Gleichgewichtsbedingungen unterschiedliche Taschendrücke einstellen können, muss die Ölversorgung der einzelnen Taschen unabhängig voneinander erfolgen.

Wesentliche Komponenten einer hydrostatischen Führung

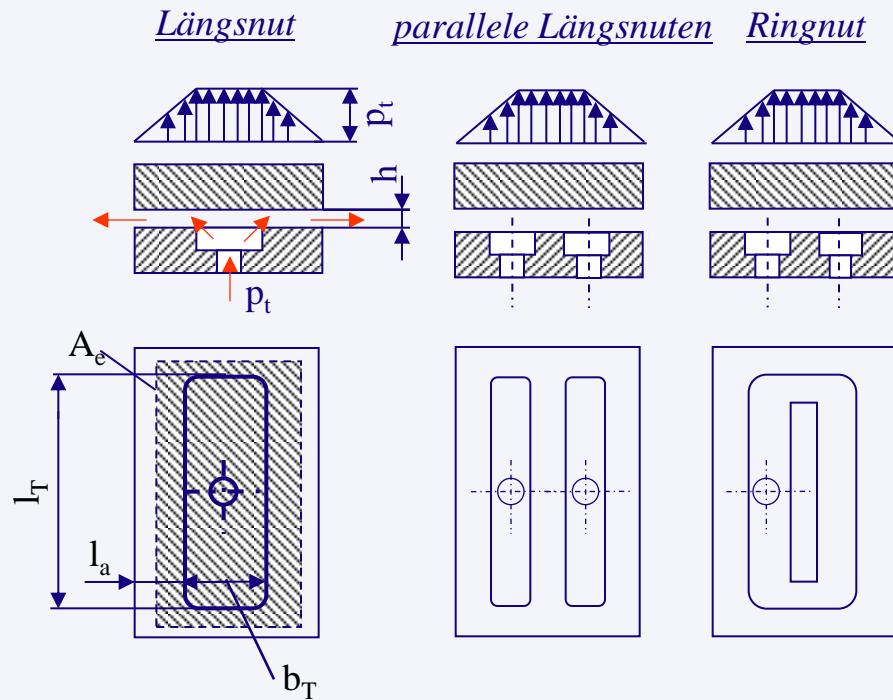


Quelle: Prof. Reinhart, iwb

Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Öltaschenformen

- Öltaschen sind grundsätzlich im kürzerem Führungsteil anzutragen!
- um außermittige Kräfte und Momente aufnehmen zu können, ist es notwendig mindestens 2 Öltaschen je Führungsbahn vorzusehen
- Welligkeiten von Führungsbahnen können mit einer größeren Anzahl von Öltaschen kompensiert werden. Mehrere und dafür kürzere Taschen vorsehen!
Erfahrungswert: 4 – 8 Öltaschen
- es ist zu beachten, dass bei Öldruckausfall eine große Stegfläche gute Notlaufeigenschaften (geringe Flächenpressung $p=F/A$) garantiert.

→ Wegen der Verschmutzungsgefahr sind scharfkantige Öltaschenränder zu vermeiden. Sie beeinflussen den Ölfilm im Führungsspalt h nachhaltig!



A_e effektive Taschenfläche

b_T Öltaschenbreite

h Führungsspalt

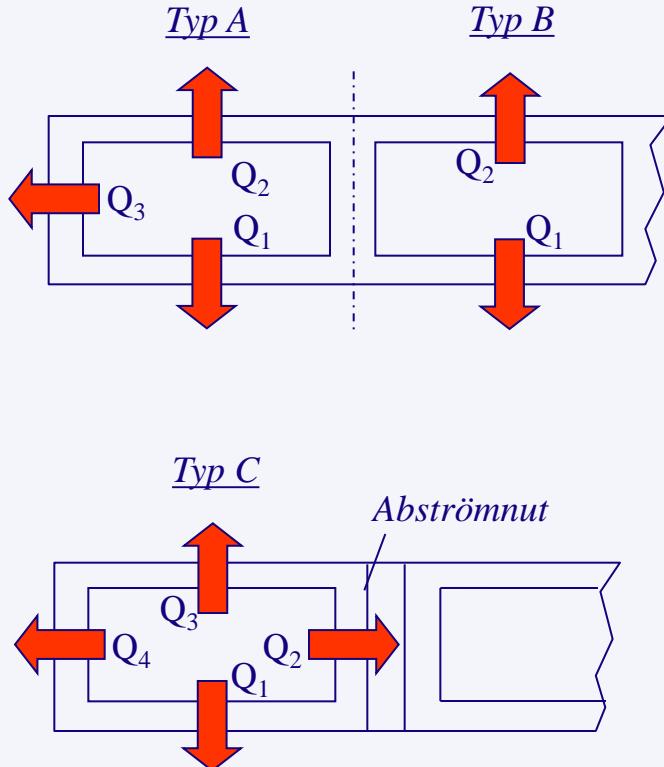
l_a Abströmlänge

l_T Öltaschenlänge

p_t Taschendruck

Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Öltaschentypen

Nach der Abströmmöglichkeit des Öls unterscheidet man folgende Öltaschentypen:



Typ A: Randtasche

Abströmen des Öls über die beiden Längsstege und den Quersteg am Rand der Führungsfläche

Typ B: Mitteltasche

Abströmen des Öls über die beiden Längsstege

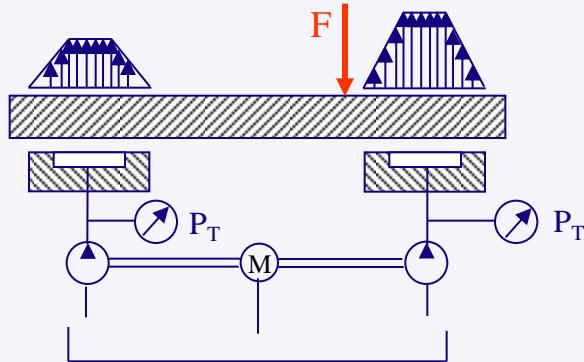
Typ C: Randtasche mit Abströmnut

Abströmen des Öls über zwei Längs- und zwei Querstege

Nach jeder zweiten Öltasche sollte ein freier Rand oder eine Abströmnut vorgesehen werden!

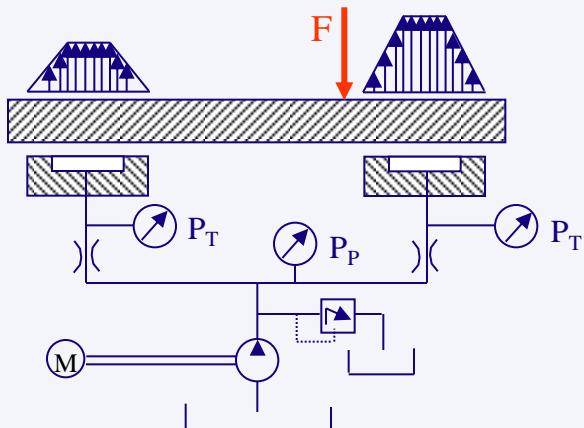
Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Ölversorgungssysteme

eine Pumpe je Öltasche



- Pumpenleistung wird vollständig ausgenutzt
- große Tragfähigkeit
- hohe Steifigkeit
- Spalthöhe und Steifigkeit sind temperaturabhängig
- hohe Anschaffungs- und Betriebskosten

gemeinsame Pumpe und je Öltasche eine Drossel



- konstanter Druck an den Drosselstellen
(Spalthöhe und Steifigkeit sind temperaturunabhängig)
- geringe Anschaffungs- und Betriebskosten
- ein Teil der Pumpenleistung geht durch die Drosselung verloren (Erwärmung)
- geringere Tragfähigkeit
- geringere Steifigkeit

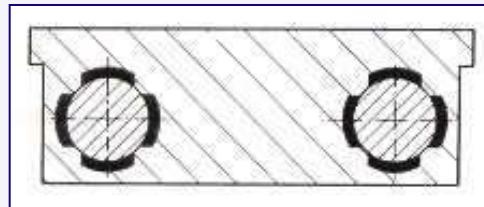
Drosselung über:

Konstanddrossel (Blenden oder Kapillaren)
Regeldrossel (z.B. Membrandrossel, Progressiv-Mengen-Regler)

Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Schlittenführungen

→ *In der Regel werden hydrostatische Führungen mit einem Umgriff versehen!*

Rundführung



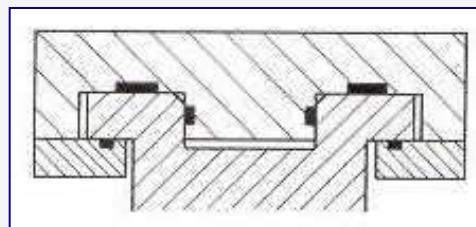
Vorteil:

- einfache Fertigung

Nachteil:

- starke Durchbiegung bei schlanken Säulen
- statisch überbestimmt

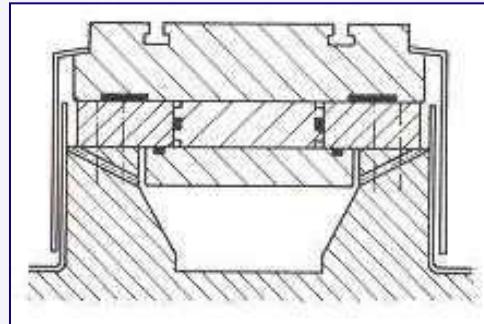
Flachführung mit außenliegendem Umgriff



Vorteil:

- einfache Montage

Flachführung mit innenliegendem Umgriff



Vorteil:

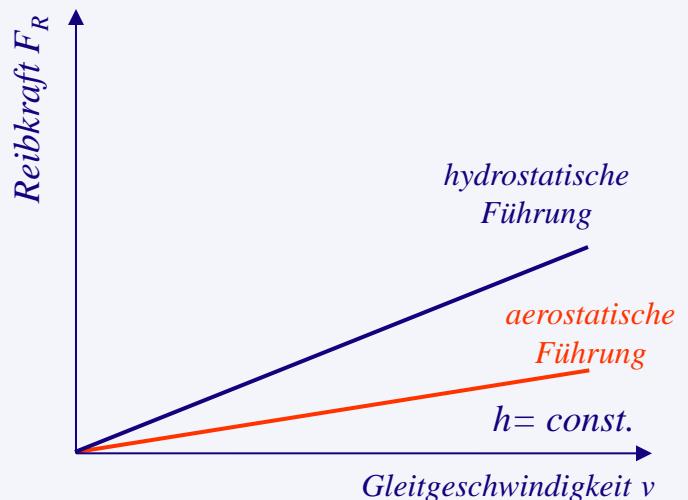
- steifer als bei außenliegendem Umgriff, da der innenliegende Umgriff sich weniger aufbiegt!

Quelle: Weck, WZM

Gleitführung mit aerostatischer Schmierung

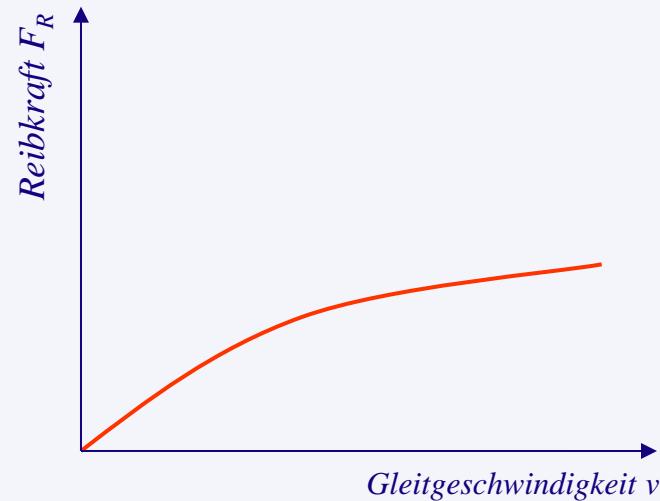
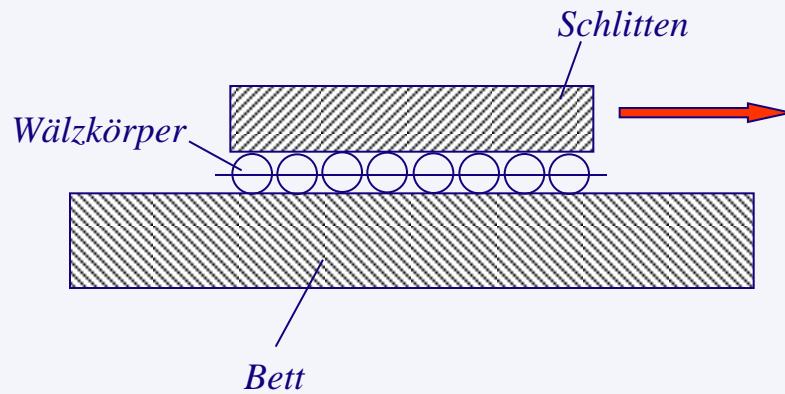
Funktionsprinzip: Aerostatische Führungen (Luftlager) arbeiten ähnlich wie hydrostatische. Als Trennmittel wird jedoch Luft verwendet. Wegen der geringeren Zähigkeit von Luft gegenüber Öl und wegen der Kompressibilität ergeben sich einige typische Merkmale gegenüber der hydrostatischen Führung:

- Luft kann nach Austritt aus der Führung an die Umgebung abgegeben werden. Sie wird nicht zurückgeführt!
- wegen der geringen Zähigkeit von Luft ist die Reibung äußerst gering
- die dynamische Zähigkeit hängt nur wenig von der Temperatur ab. Temperaturschwankungen wirken sich kaum auf das Führungsverhalten aus.
- die geringe Viskosität der Luft setzt sehr enge Lagerspalte voraus, um hohe Tragfähigkeiten und Steifigkeiten realisieren zu können.
- flächenbezogene Tragfähigkeit und Steifigkeit sind geringer als bei hydrostatischen Führungen
- Luftführungen neigen wegen der Kompressibilität der Luft zu selbsterregten Schwingungen



Wälzführungen

Funktionsprinzip: Bei Wälzführungen werden die Führungsflächen durch Wälzkörper voneinander getrennt. Als Wälzkörper werden Kugeln (punktförmige Berührung) oder Zylinder (linienförmige Berührung) eingesetzt. Bei der Bewegung der Führungspartner entsteht hauptsächlich Rollreibung.



Wälzführungen

Vorteile: • *kein Stick-Slip-Effekt (wegen Rollreibung)*

• *geringer Verschleiß*

• *problemloser Einbau*

• *geringer Wartungsaufwand*

• *für höchste Verfahrgeschwindigkeiten geeignet*

• *Standardisierung der Wälzelemente*

Nachteile: • *geringe Dämpfung*

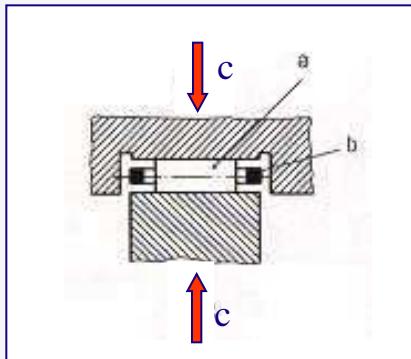
• *Neigung zu unruhigem Lauf, besonders bei Systemen, bei denen die Wälzkörper rückgeführt werden*

• *wegen der hohen Anzahl an Tragelementen ist die Führung in der Regel statisch überbestimmt*

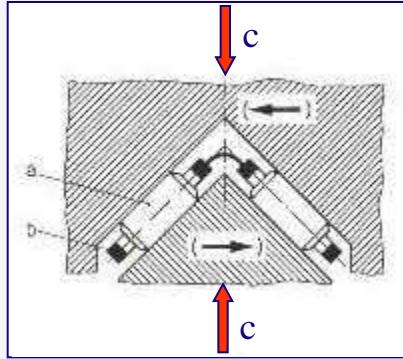
Wälzführungen: Unterscheidungsmerkmale

Wälzführungsarten: **a** Wälzkörper **b** Käfige **c** äußere Kräfte **d** Vorspannungskräfte

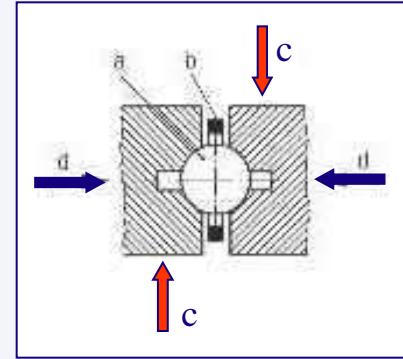
Flachführung



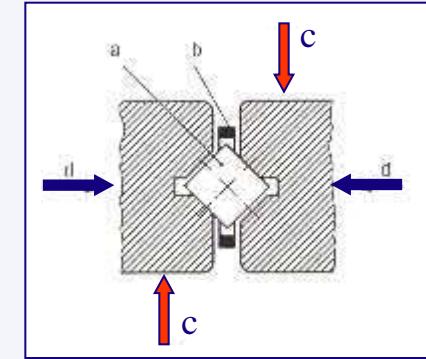
prismatische Führung



Kugelführung



Kreuzrollenkette



Unterscheidungsmerkmale zwischen den einzelnen Wälzführungselementen:

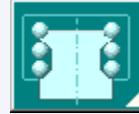
- Wälzkörpertyp (Kugel, Zylinderrolle)
- Berührungsart zwischen den Walzkörpern und Laufbahnen (punktförmige bzw. linienförmige Berührung)
- Anzahl der Wälzkörperreihen
- Wälzkörperleisten oder Wälzkörperrückführung in den Laufeinheiten

Wälzführungen: Beispiele zu den Unterscheidungsmerkmalen

● Anzahl der Wälzkörperreihen



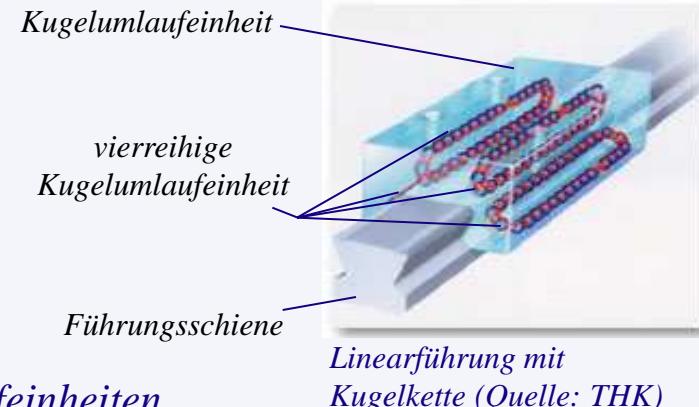
zweireihige
Kugelumlaufeinheit



sechsreihige
Kugelumlaufeinheit



vierreihige
Kugelumlaufeinheit



● Wälzkörperleisten oder Wälzkörperrückführung in den Laufeinheiten

mit
Wälzkörperleiste

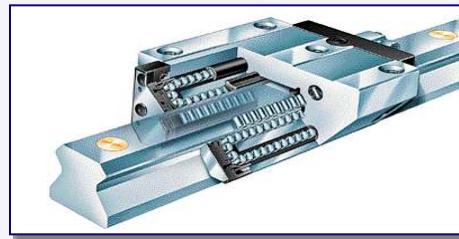


Nadelrollenführung

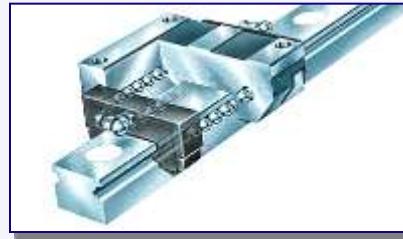


Kreuzrollenführung

mit
Wälzkörperrückführung



Rollenumlaufeinheit



Kugelumlaufeinheit

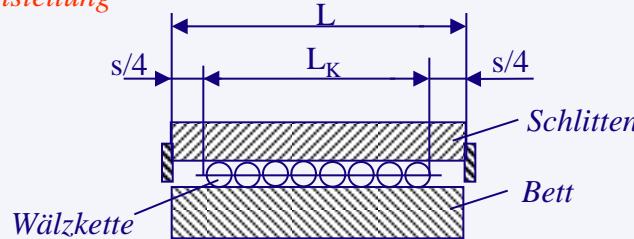


Linearkugellager

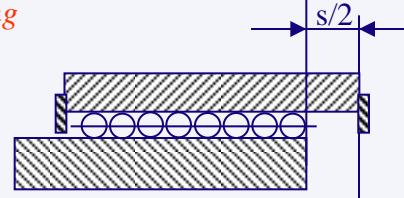
Ausführungsformen: Linear-Wälzführungen mit Wälzkörpertonkette

Wälzkette kürzer als Führungsschiene

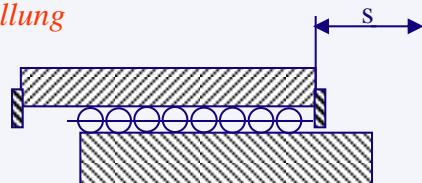
Mittelstellung



rechte Endstellung



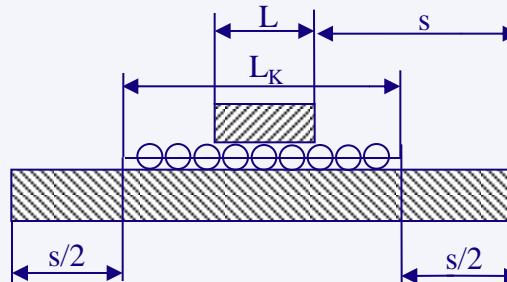
linke Endstellung



Der Schlitten sollte aus Stabilitätsgründen in seiner Endstellung die Wälzkette nur geringfügig überragen. Dadurch ist der Verschiebeweg stark begrenzt!

Wälzkette länger als Führungsschiene

Mittelstellung



rechte Endstellung



linke Endstellung



Auch hier ist der Verschiebeweg sehr begrenzt, da sonst die Wälzführung zu viel Bauraum in Anspruch nehmen würde!

Wälzführungen: Linear-Wälzführungen mit Wälzkörperrückführung

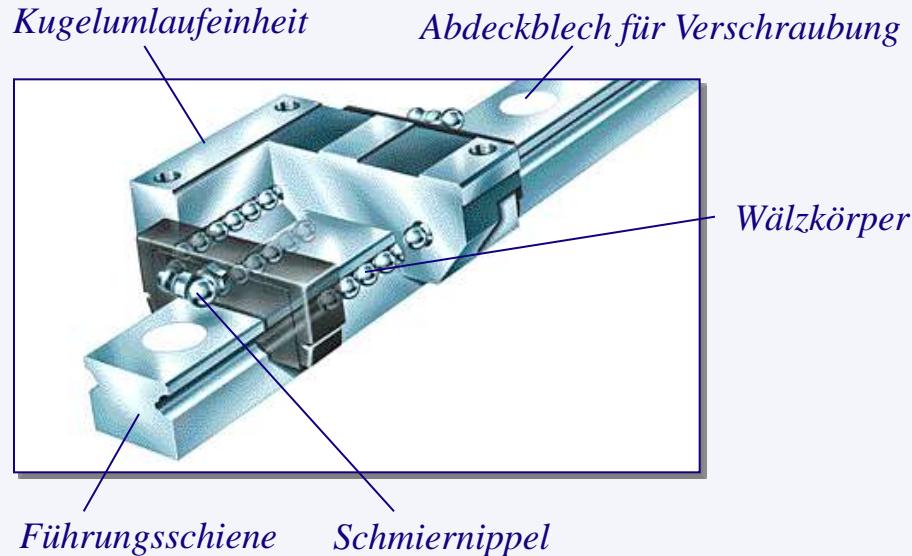
Zur Realisierung großer Verfahrwege werden Wälzführungen mit rückgeführten Wälzkörpern verwendet. Die Wälzkörper laufen in einer Endlosschleife, so dass der Verschiebweg nur von der Länge der Führungsschiene begrenzt wird.

Nachteile:

(gegenüber Wälzführungen ohne Wälzkörperrückführung)

- im Bereich der Umlenkung sind die Wälzkörper stoßartigen Belastungen ausgesetzt
- Geräuschenwicklung
- erhöhter Verschleiß
- zusätzliche Wärmequelle (Reibung = Wärme)

Kugelumlaufseinheit (Quelle: INA)



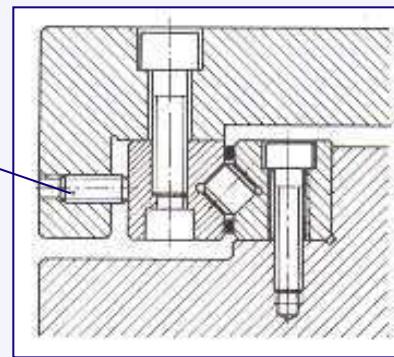
Wälzführungen: Einstellmöglichkeiten der Vorspannung

→ Zur Erhöhung der Steifigkeit und zum Ausschalten von Spiel werden Wälzführungen vorgespannt!

Spieleinstellung einer Kreuzrollenführung mit Rollenleiste

- a) Im Normalfall wirkt die Stellschraube auf die Schiene

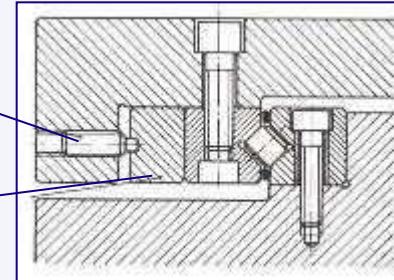
Stellschraube für Vorspannung



- b) Für höhere Genauigkeit und Steifigkeit wird eine Zwischenplatte verwendet

Stellschraube für Vorspannung

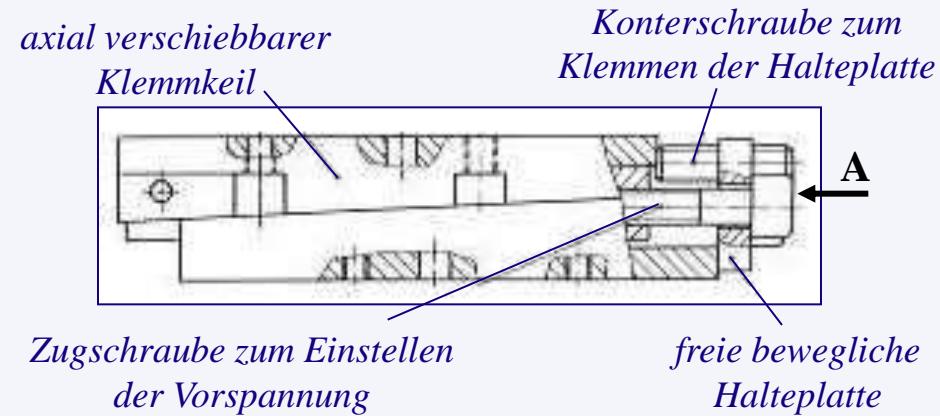
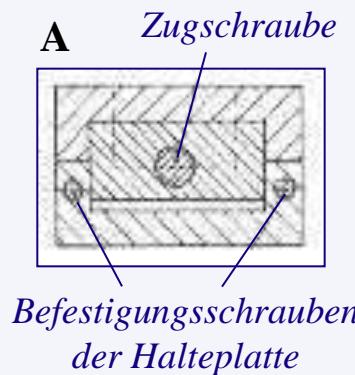
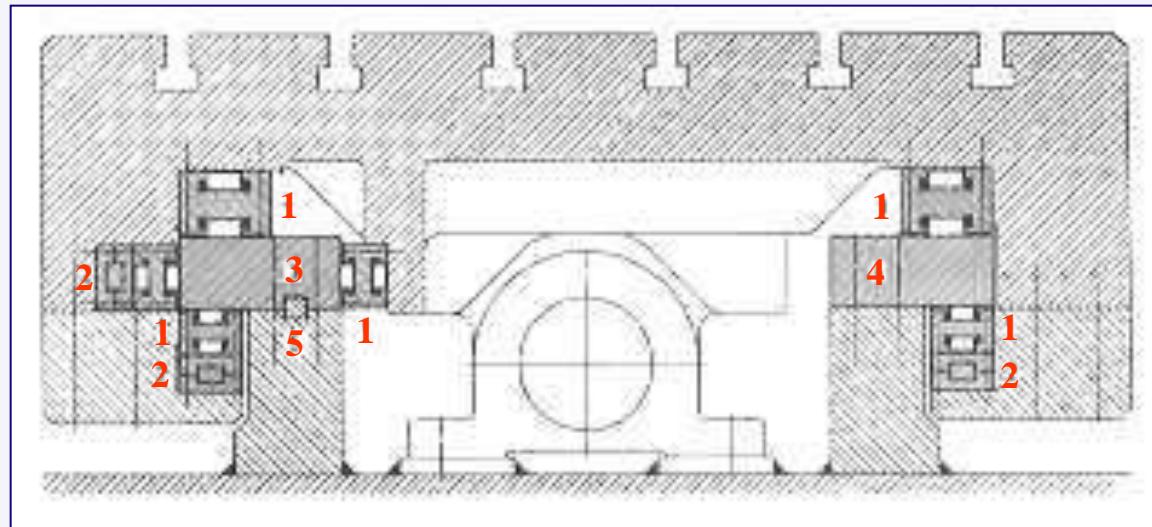
Zwischenplatte



Einstellmöglichkeiten der Vorspannung: Tischführung einer NC-Bohrmaschine

- 1: Rollenumlaufschuh
- 2: Vorspannvorrichtung
- 3, 4: Führungsschienen
- 5: Paßfeder eingepreßt

Bei Wälzkörperrückführungen wird die Vorspannung zwischen Führungsschiene, Wälzkörper und Umlaufschuh durch den Hersteller eingebracht!



Quelle: Weck, WZM

Führungen: Eigenschaften verschiedener Führungsprinzipien

Merkmale	hydrodynamisch	wälzend	hydrostatisch	aerostatisch
Steifigkeit	●	○	●	○
Dämpfung	●	○	●	●
Leichtgängigkeit	○	○	●	●
Verschleißfestigkeit	○	○	●	●
Stick-Slip-Effekt	○	●	●	●
Geschwindigkeitsbereich	○	●	●	●
Betriebssicherheit	●	●	○	○
Standardisierung	○	●	○	○
Kosten	○	○	●	●
Bauaufwand	○	○	●	●
Tragfähigkeit	●	●	●	○



hoch



mittel



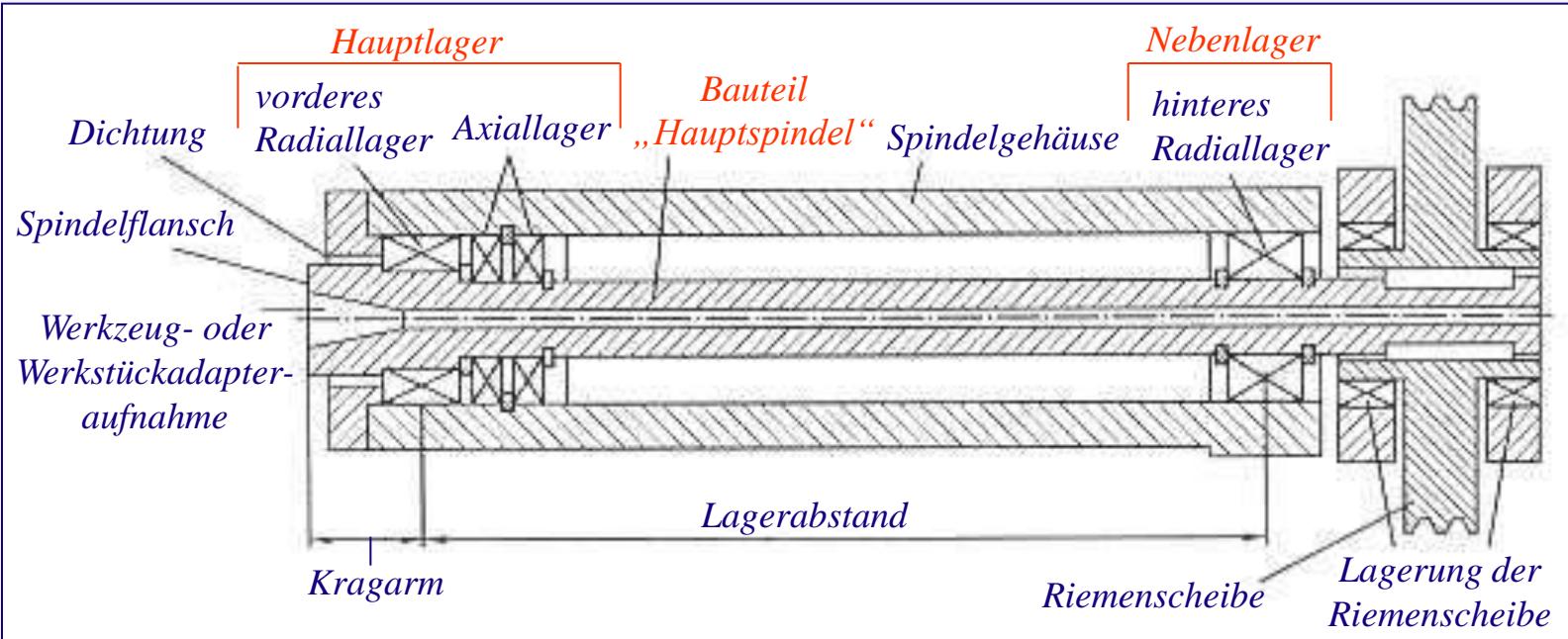
niedrig

Quelle: Prof. Reinhart, iwb

Baugruppe „Hauptspindel“

Baugruppe „Hauptspindel“

Prinzip des Aufbaus der Baugruppe „Hauptspindel“



Quelle: Hirsch, WZM

Baugruppe „Hauptspindel“



Aufgabe

- Aufnahme und geometrische Fixierung von Werkstücken bzw. Werkzeugen
- Aufnahme und Weiterleitung der für die Bearbeitung notwendigen Kräfte und Momente

Anforderungen

- große Steifigkeit an der Wirkstelle
- große dynamische Steifigkeit an der Wirkstelle
- große thermische Steifigkeit von Spindel und Spindelstock
- geringes axiales und radiales Lagerspiel
- hohe Rundlaufgenauigkeit der Lager



Als Hauptspindel wird bei spanenden Werkzeugmaschinen die letzte Welle des Hauptantriebs bezeichnet. Sie steht in direkter Verbindung zum Werkstück bzw. Werkzeug.

Wälzlager

Zirka 90 % aller Werkzeugmaschinen-Hauptspindeln sind wälzgelagert. Folgende Gründe sind dafür verantwortlich:

- die Eigenschaften der Wälzlager sind in vielen Fällen ausreichend
- einfache Einstellung des Lagerspiels
- Auswahl und Dimensionierung aus einer Vielzahl von Möglichkeiten, die zum Teil auf den Einsatzfall zugeschnitten sind
- Bereitstellung der Lager durch Zulieferer mit Übernahme von Gewährleistung
- Möglichkeit der Demontage und des Austauschs
- vertretbare Kosten



Zylinderrollenlager
(Quelle :FAG)

Nur wenn die geforderten Eigenschaften (z.B. Genauigkeit, Dämpfung, Laufruhe) nicht zu realisieren sind oder aus konstruktiven Gründen eine Wälzlagerung nicht möglich ist, wird auf hydrodynamische, hydrostatische, aerostatische oder auf Magnetlager zurückgegriffen



Wälzlager

- Vorteile:**
- *kleine und genormte Abmessungen*
 - *geeignet für Drehzahlen von $n = 0$ bis zur für die Lagertype und Lagerdurchmesser bestimmten maximalen Drehzahlen n_{max}*
 - *relativ ruhiger Lauf*

- Nachteile:**
- *hoher Montageaufwand*
 - *Schwingungs- und Stoßempfindlichkeit*
 - *schlechtes Dämpfungsverhalten*
 - *Schwingungen die von den Wälzlagern selbst angeregt werden*

Wälzlager: Radialwälzlager für Hauptspindeln (typische Beispiele)

Rillenkugellager



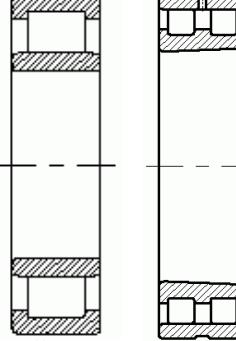
Quelle: FAG

Schrägkugellager



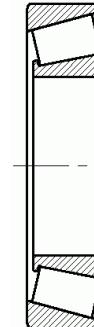
Quelle: FAG

Zylinderrollenlager



Quelle: FAG

Kegelrollenlager



Quelle: FAG

Eigenschaften:

- mittlere Radialkräfte
- kleine Axialkräfte
- hohe Drehzahlen
- keine Spieleinstellung

Eigenschaften:

- mittlere Radialkräfte
- kleine Axialkräfte
- sehr hohe Drehzahlen
- einfache Spieleinstellung

Eigenschaften:

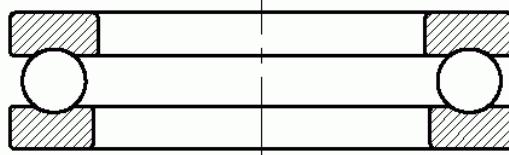
- [ein- oder zweireihig]
- große Radialkräfte
- mittlere Drehzahlen
- aufwendige Spieleinstellung

Eigenschaften:

- große Radialkräfte
- mittlere Axialkräfte
- mittlere Drehzahlen
- einfache Spieleinstellung

Wälzlager: Axialwälzlager für Hauptspindeln (typische Beispiele)

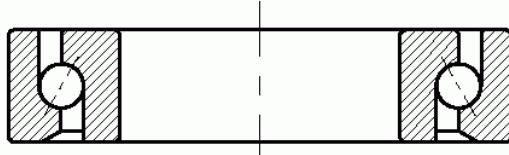
Rillenkugellager



Quelle: FAG

- Eigenschaften:*
- mittlere Axialkräfte
 - mittlere Drehzahlen
 - einfache Spieleinstellung

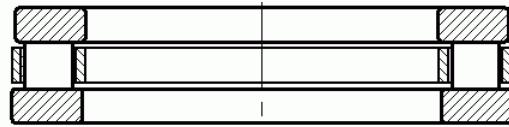
Schrägkugellager (einseitig wirkend)



Quelle: FAG

- Eigenschaften:*
- mittlere Axialkräfte
 - kleine Radialkräfte
 - hohe Drehzahlen
 - einfache Spieleinstellung

Zylinderrollenlager



Quelle: FAG

- Eigenschaften:*
- große Axialkräfte
 - niedrige Drehzahlen
 - einfache Spieleinstellung

Wälzlager: bevorzugte Spindellagerungen

radiale Lagerung: zweireihiges Zylinderrollenlager

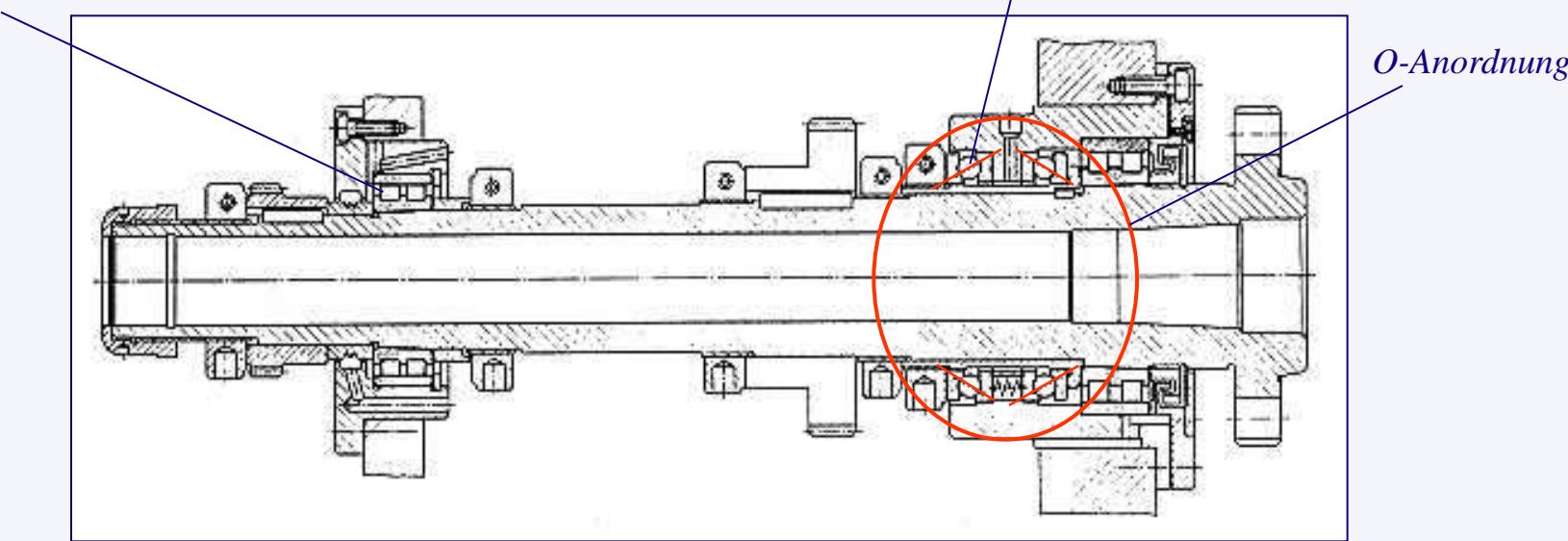
- hohe radiale Steifigkeit
- hohe Rundlaufgenauigkeit

zweireihiges
Zylinderrollenlager

axiale Lagerung: Axialrillenkugellager

- mittlere Drehzahlen

Axialrillenkugellager



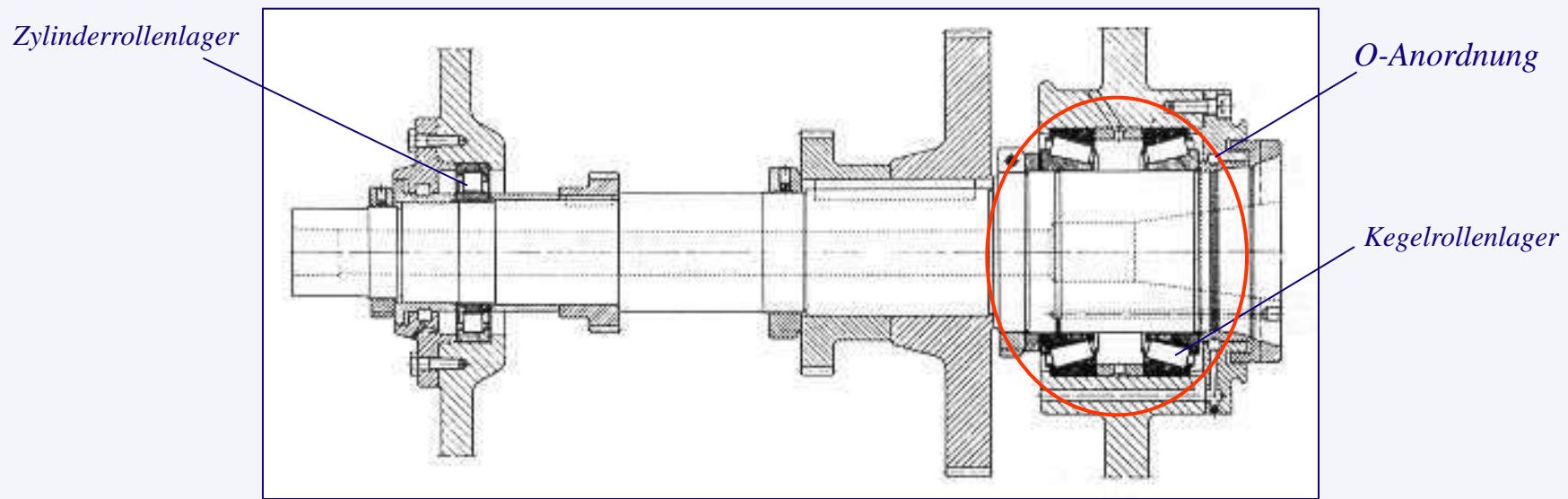
Belastungsprofil: • mittlere Drehzahlen
• mittlere Belastungen

Verwendungszweck: • Fräsmaschine
• Drehmaschine

Wälzlager: bevorzugte Spindellagerungen

radiale Lagerung: Kegelrollenlager,
↓
Zylinderrollenlager
• sehr hohe radiale Steifigkeit

axiale Lagerung: Kegelrollenlager
• sehr hohe *axiale* und *radiale* Steifigkeit
• geringe Rundlaufgenauigkeit
• starke Wärmeentwicklung, bei größeren Drehzahlen und Belastungen, die eine *Lagerspieländerung* bewirkt



Belastungsprofil: • geringe Drehzahlen
• hochbelastete Spindeln

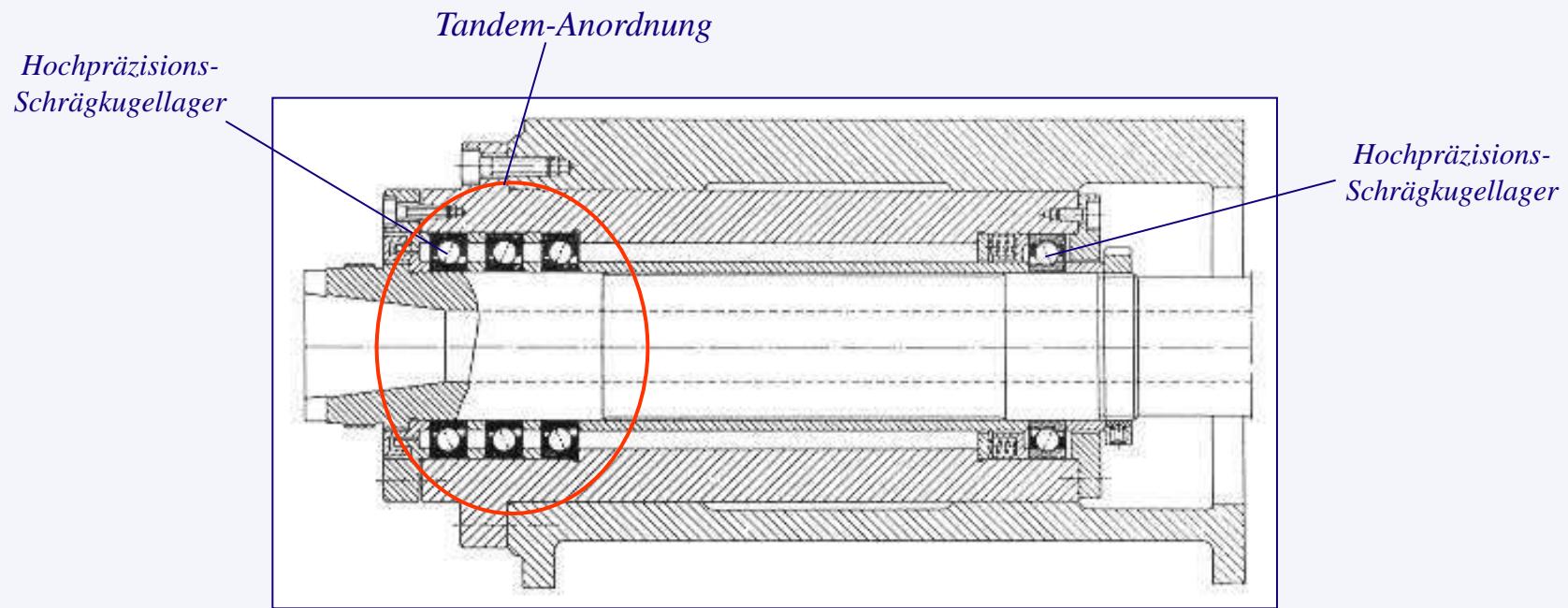
Verwendungszweck: • Schrubbfräsmaschinen
• Schrubbrehmaschinen

Wälzlager: bevorzugte Spindellagerungen

radiale Lagerung: Hochpräzisions-Schrägkugellager

axiale Lagerung: Hochpräzisions-Schrägkugellager

- höchste Rundlaufgenauigkeit
- geringe radiale und axiale Steifigkeit

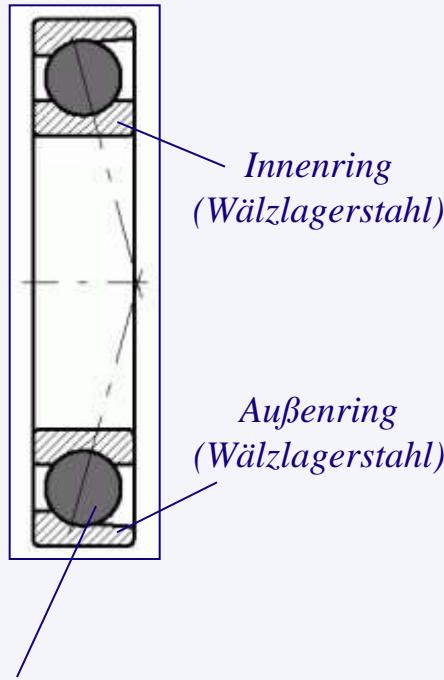


Belastungsprofil: • hohe Drehzahlen
• geringere Belastungen

Verwendungszweck: • Schleifmaschine
• Feinbohrmaschine
• Feindrehmaschine

Wälzlager: Keramik-Hybrid-Lager

Hybrid-Keramikspindellager
(Schrägkugellager)



Siliziumnitrid-Kugel

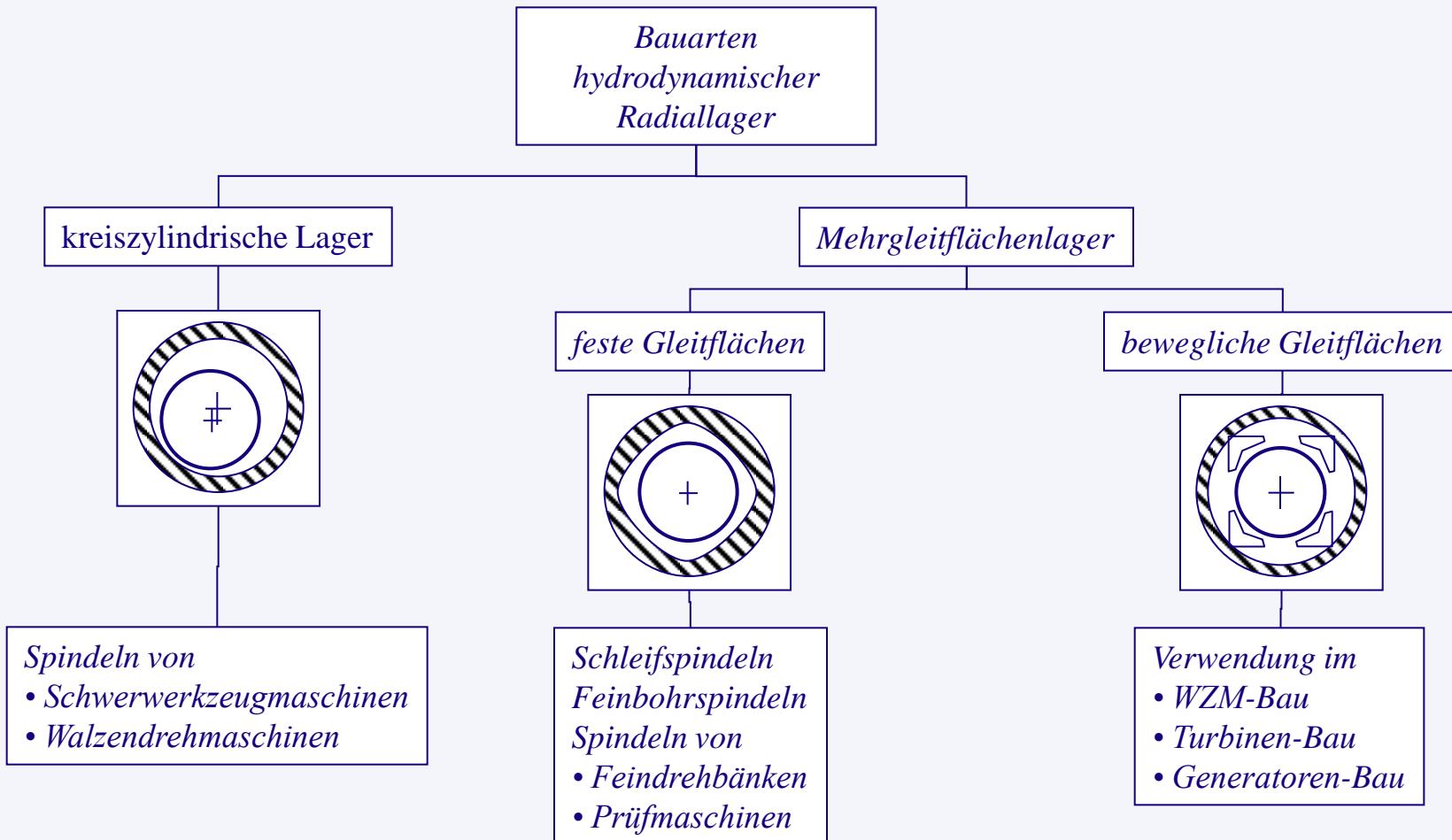
Keramik-Hybrid-Lager besitzen, gegenüber herkömmlichen Wälzlagern, Kugeln aus Keramik (Siliziumnitrid Si_3N_4). Damit erheben sich eine Reihe von Vorteilen:

- höhere Lagersteifigkeit
- geringe Fliehkräfte
- geringe Reibung
- geringe Betriebstemperatur
- höchste Drehzahlen
- abgedichtete Fettschmierung
- lange Gebrauchsdaue
- isolierend gegenüber Strom

Nachteil:

- höherer Preis (wegen Herstellung der Keramikkugeln)

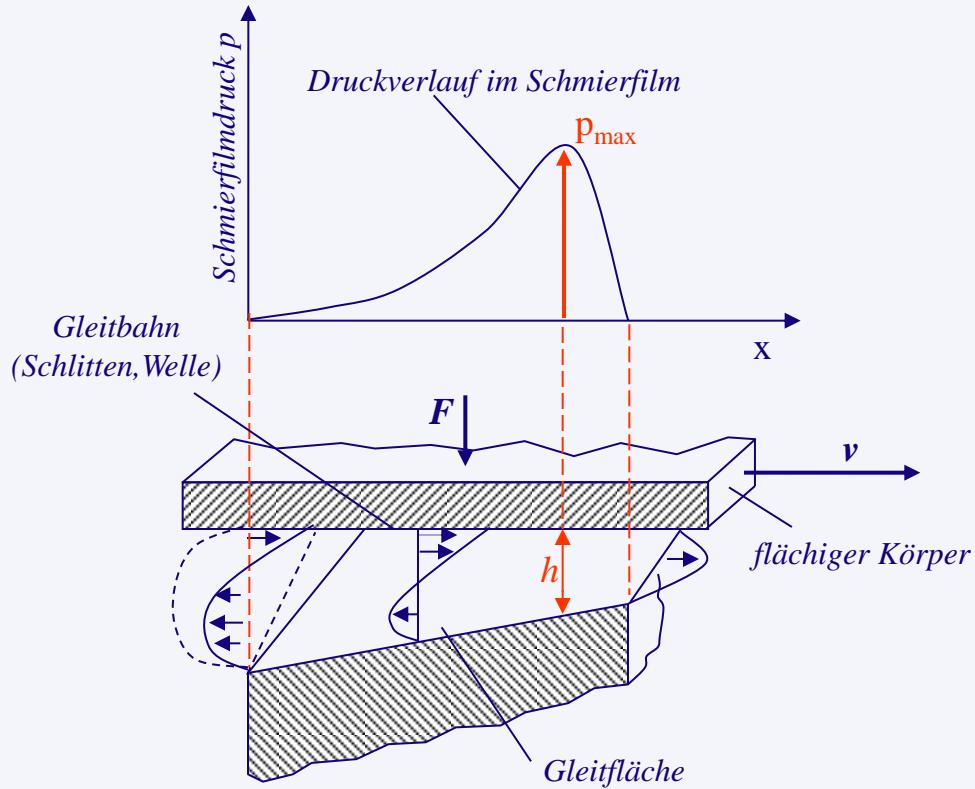
Hydrodynamische Gleitlager



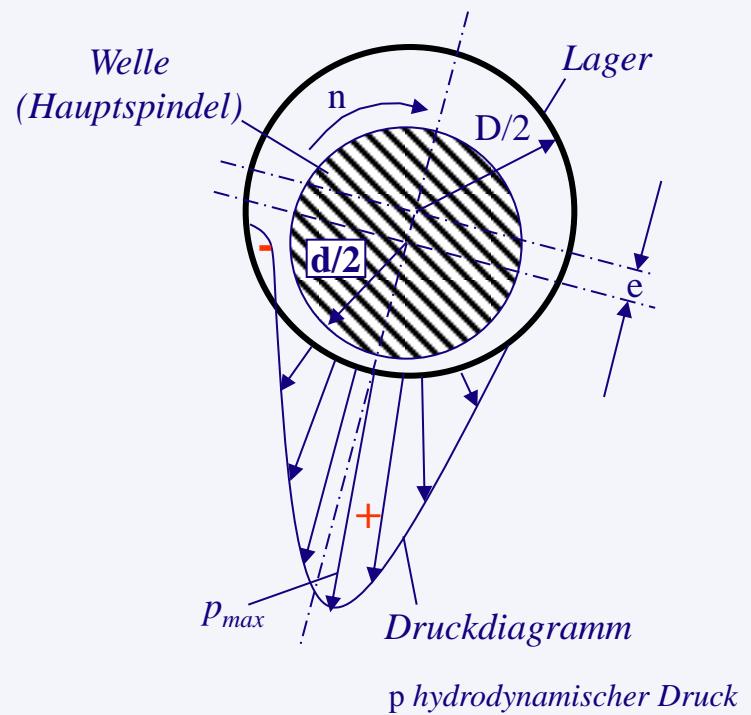
Quelle: Weck, WZM

Hydrodynamische Gleitlager

Druckaufbau und -verteilung in einer Gleitführung



Druckaufbau und -verteilung im Gleitlager

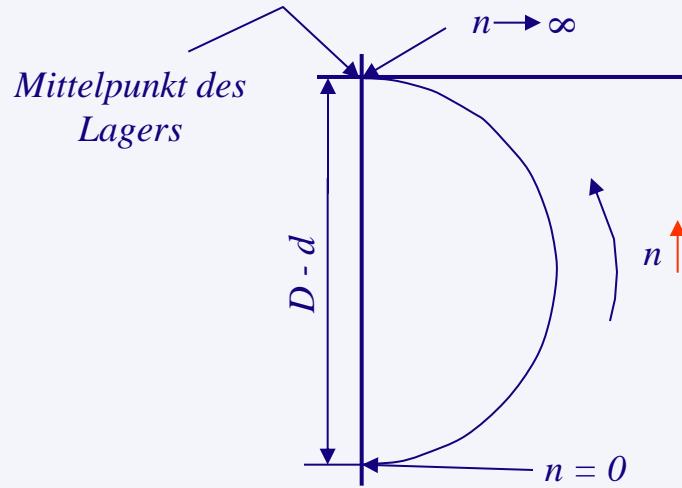


Wie bei der Gleitführung entsteht im Gleitlager kurz vor der engsten Stelle, zwischen Welle und Lager, das Druckmaximum. Danach fällt der Druck ab und es kann ein Unterdruck entstehen.

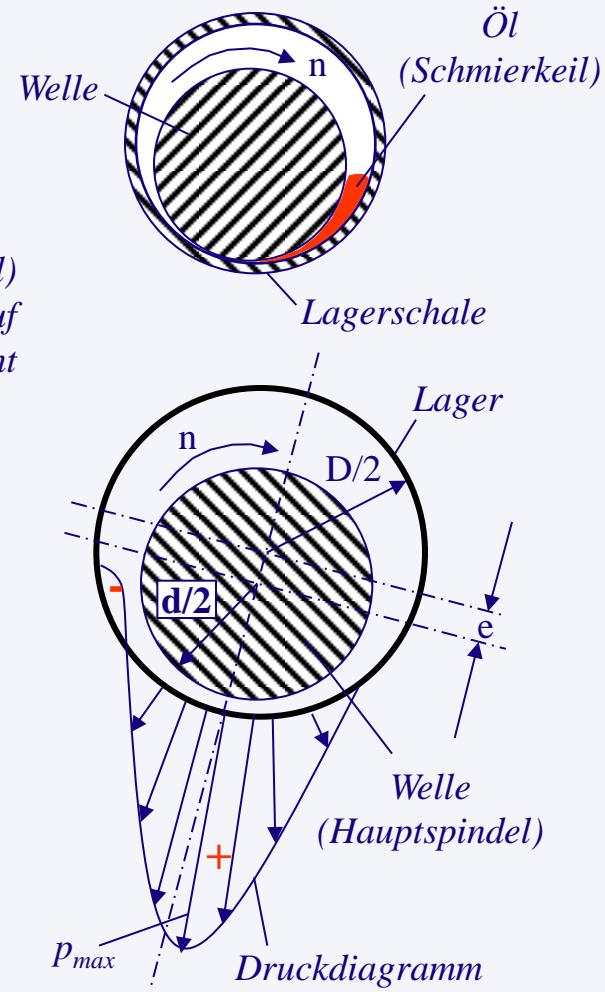
Hydrodynamische Gleitlager: Druckaufbau (kreiszylindrisches Gleitlager)

- zu Beginn der Bewegung berühren sich Welle und Gleitfläche. Die Exzentrizität e zwischen Welle und Lager, welche in diesem Zustand am größten ist, ergibt den Schmierkeil. Es herrscht Festkörperreibung!
- bei niedrigen Drehzahlen herrscht Mischreibung, da sich die Welle von der Lagerschale (Gleitfläche) noch nicht abgehoben hat.
- mit zunehmender Drehzahl schwimmt die Welle auf den Schmierkeil (Ölkeil) auf und die Exzentrizität e nimmt ab. Der Wellenmittelpunkt nähert sich auf einem Halbkreis (Gumbelscher Halbkreis) der Lagermitte. Es herrscht Flüssigkeitsreibung!

Gumbelscher Halbkreis



Druckaufbau und -verteilung



Hydrodynamische Gleitlager: Druckaufbau (kreiszylindrisches Gleitlager)

resultierende Eigenschaften des kreiszylindrischen Gleitlagers:

- schlechte Rundlaufgenauigkeit der Spindel, da auch im Bereich der Flüssigkeitsreibung nur **eine** Druckzone aufgebaut wird
- die Exzentrizität e ist erst bei unendlich großer Drehzahl gleich Null!
- jedes Stillsetzen der Spindel führt zu erhöhtem Verschleiß
- Wellenposition ist abhängig von Drehzahl und Belastung

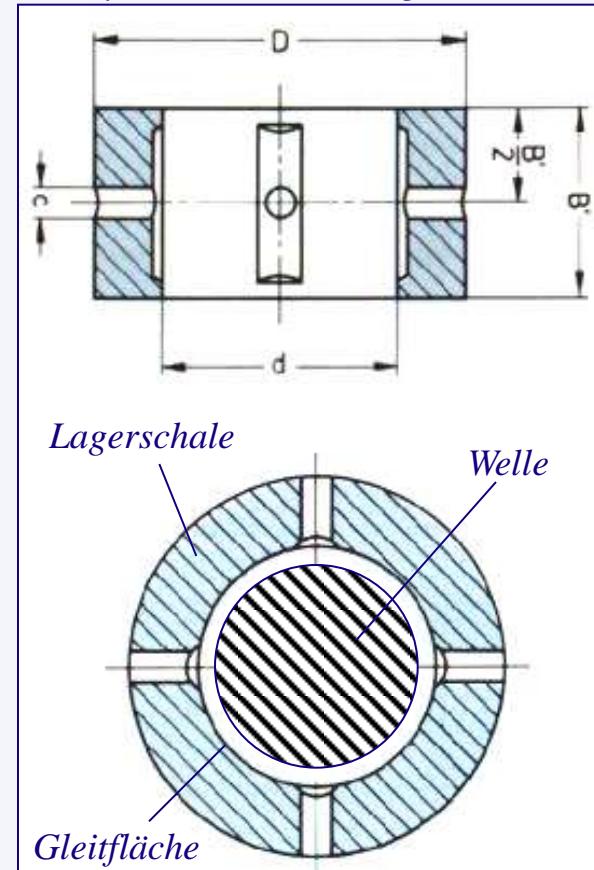
→ Die Tragkraft von hydrodynamischen Lagern ist von der Drehzahl abhängig!

$$F = K \cdot \eta \cdot v \cdot \left(\frac{l}{h} \right)^2$$

F Tragkraft des Lagers
 K Proportionalitätsfaktor
 η dynamische Viskosität des Öls
 v Umfangsgeschwindigkeit
 l Länge der Druckzone in Umfangsrichtung
 h Lagerspalthöhe

→ hydrodynamische Gleitlager zeichnen sich durch geringe Anschaffungs- und Betriebskosten aus!

kreiszylindrisches Gleitlager



Quelle: GMH-Herzberg

Hydrodynamische Gleitlager: Mehrgleitflächenlager (feste Gleitflächen)

Bei MGF-Lagern (Mehrgleitflächenlager) sind die Lagerschalen so gestaltete, dass am Umfang verteilt mehrere Schmierkeile bei entsprechender Drehzahl entstehen.

Das unten rechts dargestellte Mehrgleitflächenlager hat vier Gleitflächen und daher vier Druckzonen!

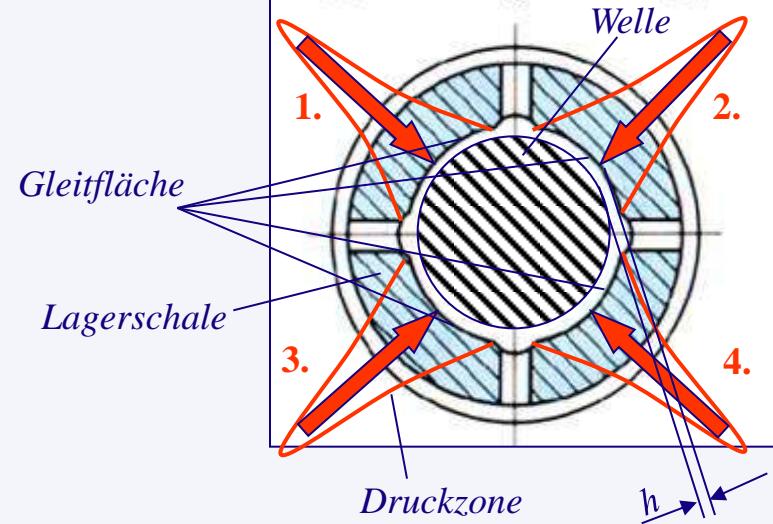
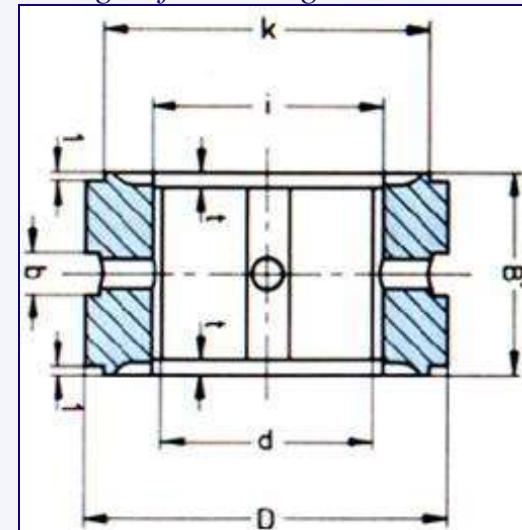
Vorteil:

- hohe Rundlaufgenauigkeit bedingt durch vier Druckzonen (Welle wird mittig eingespannt)
- kein Gumbelscher Halbkreis

Nachteil:

- nur für kleine Drehzahlbereiche geeignet
- jedes Stillsetzen der Spindel führt zu erhöhtem Verschleiß

Mehrgleitflächenlager



Quelle: GMH-Herzberg

Hydrodynamische Gleitlager: Mehrgleitflächenlager (bewegliche Gleitflächen)

Beispiel: Kippsegmentlager

Im Gegensatz zu den festen Gleitflächen, bei denen die Lagerspalthöhe h nicht verändert werden kann (kleiner Drehzahlbereich), ermöglichen Kippsegmente eine drehzahlabhängige Variation.

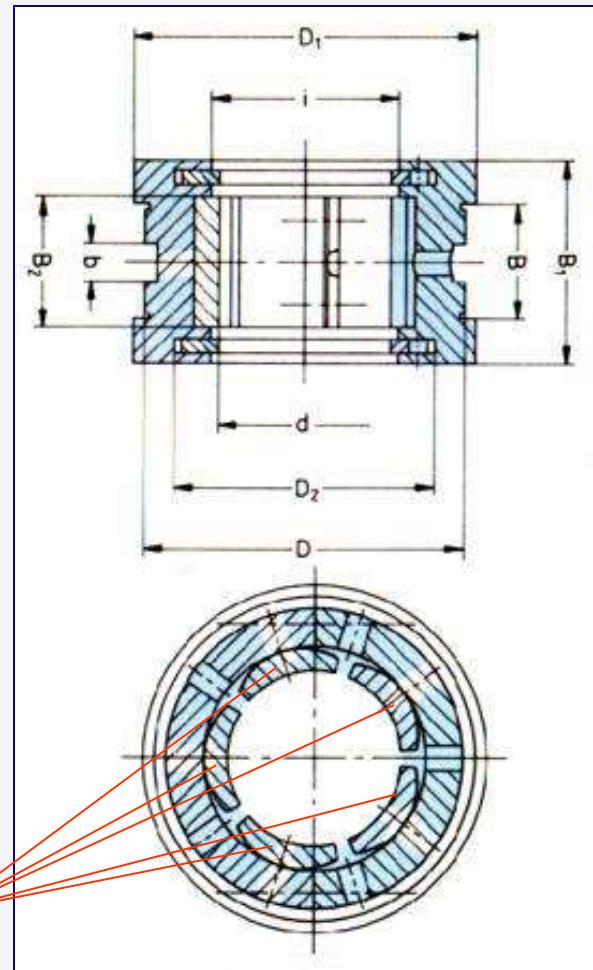
Vorteil:

- höhere Rundlaufgenauigkeit bedingt durch fünf anstatt vier Druckzonen (Welle wird mittig eingespannt)
- kein Gumbelscher Halbkreis
- optimale, selbstanpassende Schmierkeilbildung
- für große Drehzahlbereiche geeignet

Nachteil:

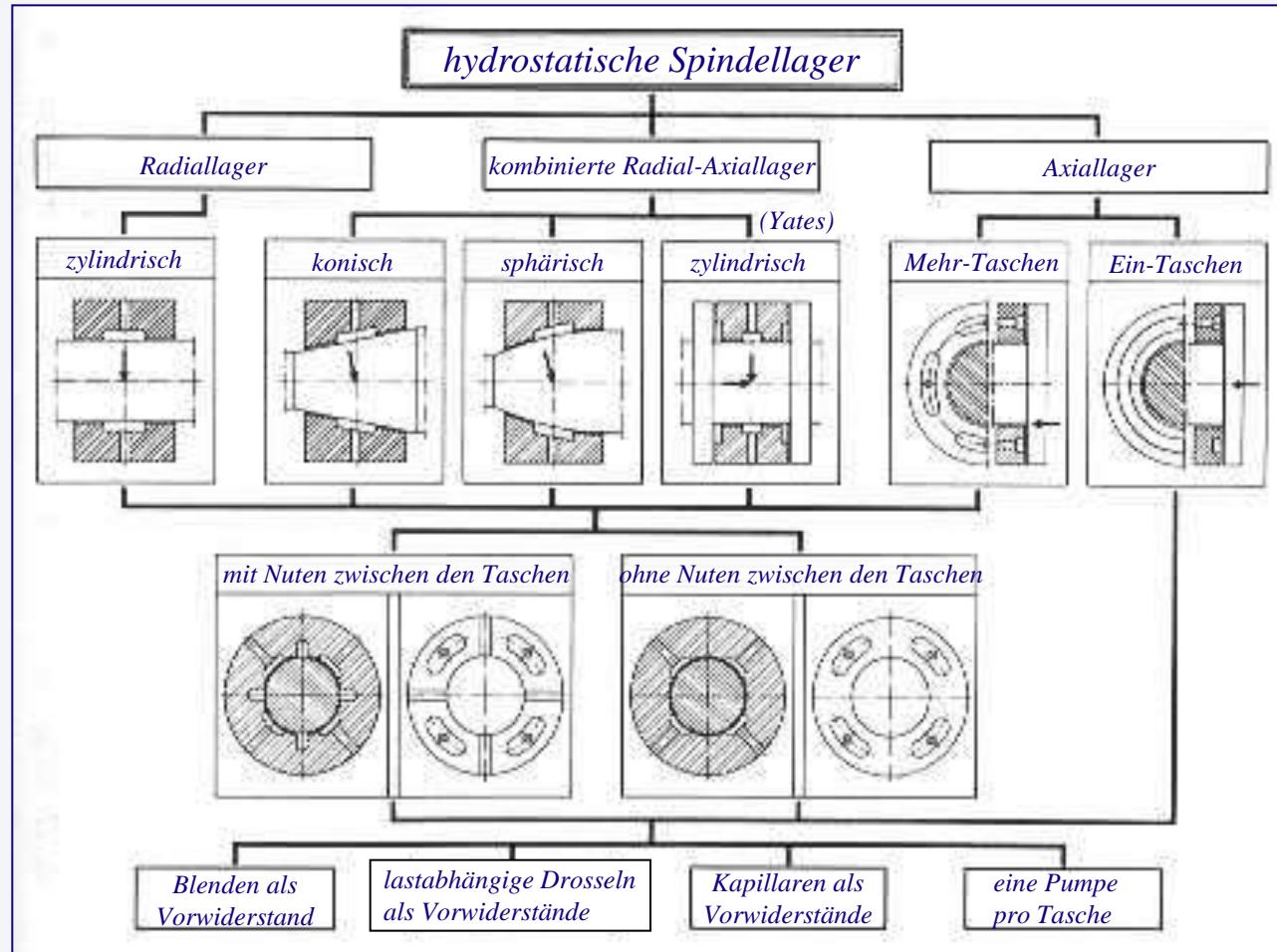
- jedes Stillsetzen der Spindel führt zu erhöhtem Verschleiß

Kippsegmentlager



Quelle: GMH-Herzberg

Hydrostatische Gleitlager: Bauformen



Quelle: Weck, WZM

Hydrostatische Gleitlager

→ *Eigenschaften hydrostatisch gelagerter Spindeln:*

- die Tragkraft des Lagers ist von der Drehzahl unabhängig

$$F = p_T \cdot A_W \quad \begin{array}{l} p_T \text{ Taschendruck} \\ A_W \text{ Taschenfläche} \end{array}$$

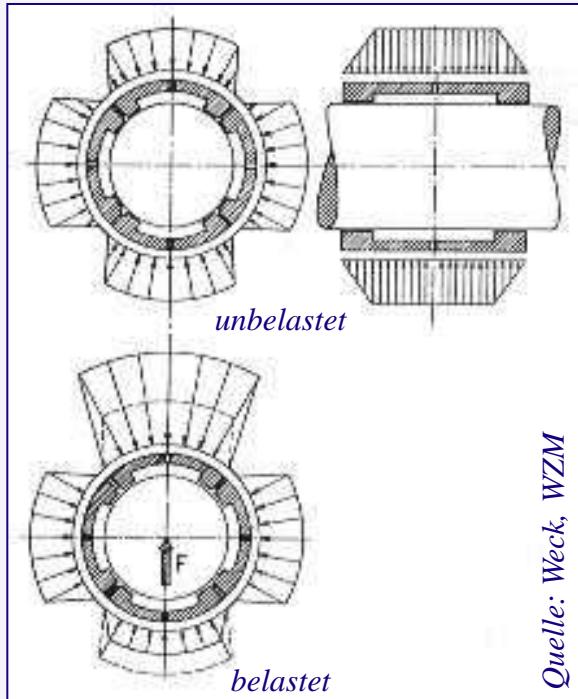
- hohe Rundlaufgenauigkeit
- es liegt bei allen Drehzahlen Flüssigkeitsreibung vor (kein Stick-Slip-Effekt)
- hohe Schwingungsdämpfung
- große Drehzahlbereiche möglich
- sehr hohe Lagersteifigkeit K möglich

$$K \approx \frac{p_P \cdot A_W}{h_0} \quad \begin{array}{l} \bullet \text{ Pumpendruck } p_p \\ \bullet \text{ Taschenfläche } A_w \\ \bullet \text{ Lagerspalthöhe } h_0 \end{array}$$

- ruhiger Lauf
- hoher Aufwand für das Ölversorgungs- und Sicherheitssystem

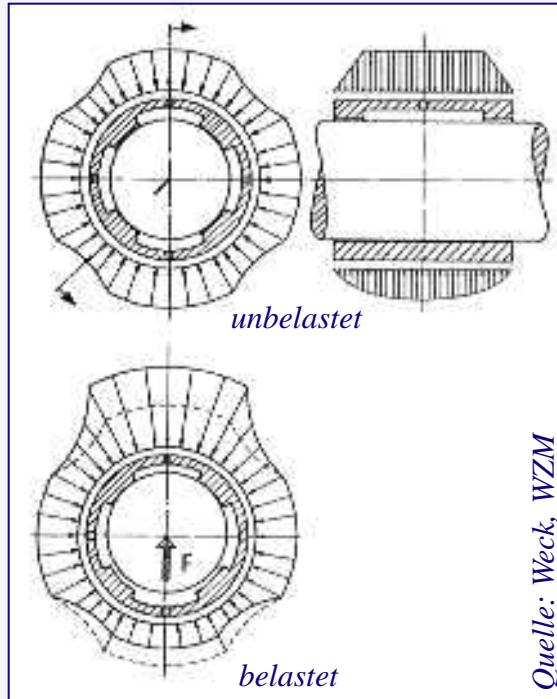
Hydrostatische Gleitlager: Druckverlauf in einem Radiallager

mit Ölrücklaufnuten zwischen den Lagern



Quelle: Weck, WZM

ohne Ölrücklaufnuten zwischen den Lagern



Quelle: Weck, WZM

- Öl kann in axialer und radialer Richtung abfließen
- Taschendrücke sind von einander unabhängig
- an den Außenseiten der Stege ist der Druck gleich Null

- *allgemein gebräuchliche Bauart*
- Öl kann nur in axialer Richtung abfließen
- Taschendrücke sind nicht von einander unabhängig

Statische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen



Die Arbeitsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine hängt unmittelbar von der **statischen und dynamischen Steifigkeit** des Spindel-Lager-Systems ab.

Folgende Parameter beeinflussen die statische und dynamische Steifigkeit des Spindel-Lager-Systems (Durchmesser der Spindel sei gegeben) und sind daher zu optimieren:

- Lagerabstand b
- Kraglänge a
- Lagersteifigkeit K
- Lageranzahl
- Elastizitätsmodul der Spindel (Werkstoffauswahl)

statische Steifigkeit [K]

wesentlicher Einfluss auf

geometrische Formgenauigkeit

dynamische Steifigkeit [K_{dyn}]

wesentlicher Einfluss auf

Oberflächengüte

Es gilt:

$$K = \frac{F}{y}$$

F statische Kraft

$$K_{dyn} = \frac{\tilde{F}}{\tilde{y}}$$

\tilde{F} dynamische Kraft

y statische Verlagerung

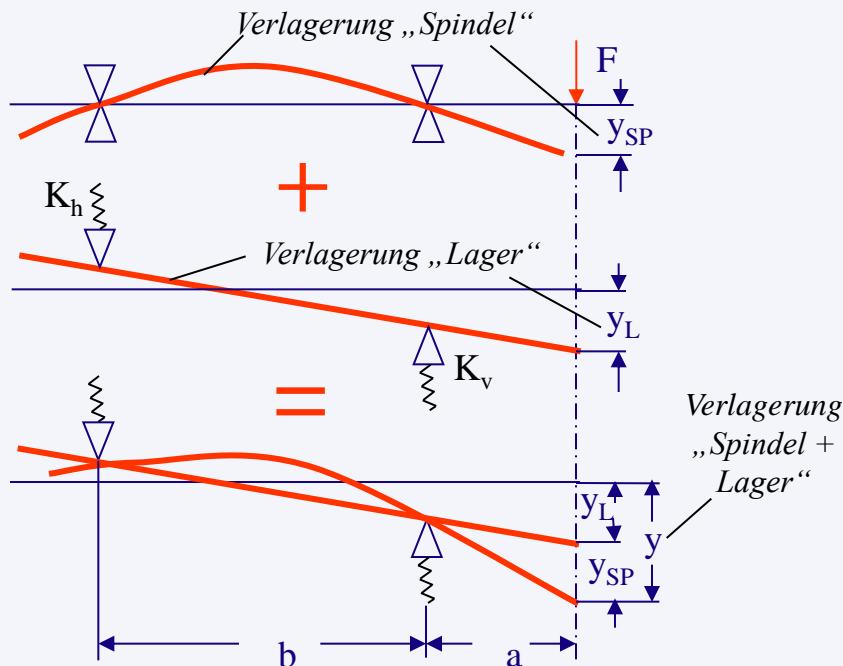
\tilde{y} dynamische Verlagerung

Statische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

Die Gesamtverlagerung des Spindel-Lager-Systems an der Kraftangriffsstelle erhält man durch Überlagerung von Grundlastfällen (siehe Festigkeitslehre „Biegebalken“)

$$y = y_{SP} + y_L = \frac{F \cdot b \cdot a^2}{3 \cdot J_{SP} \cdot E} \left(1 + \frac{a}{b} \right) + \frac{F}{b^2} \cdot \left[\frac{(a+b)^2}{K_v} + \frac{a^2}{K_h} \right]$$

a Kraglänge
 b Lagerabstand
 K_v radiale Steifigkeit des vorderen Lager
 K_h radiale Steifigkeit des hinteren Lagers
 E Elastizitätsmodul
 F statische Kraft
 J_{SP} axiales (äquatoriales Flächenträgheitsmoment der Spindel
 y_L Lageranteil an der Kraftangriffsstelle
 y_{SP} Spindelanteil an der Kraftangriffsstelle
 y Gesamtverlagerung



Statische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen: optimaler Lagerabstand b

Der optimale Lagerabstand b , bei welchem die Gesamtverlagerung am geringsten ist, kann rechnerisch mit Hilfe der Differentialrechnung ermittelt werden!

Gesamtverlagerung:

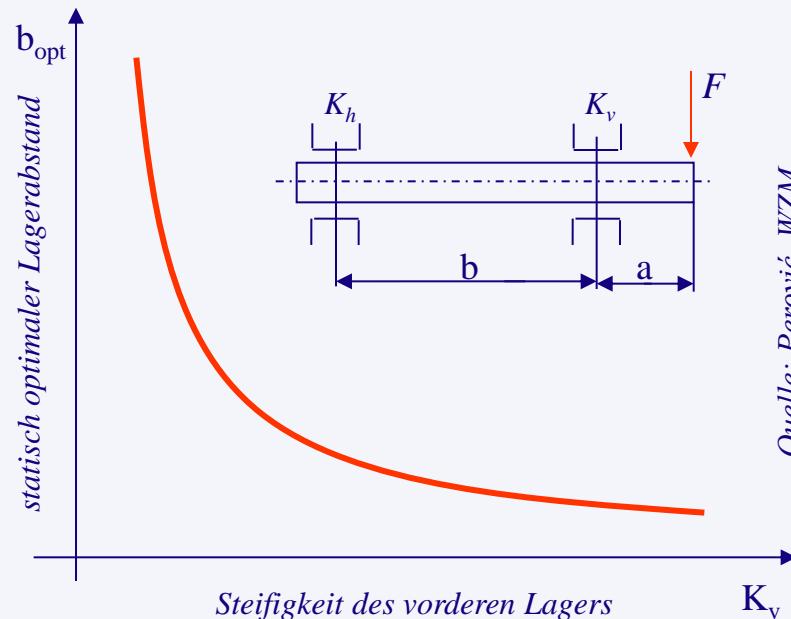
$$y = y_{SP} + y_L = \frac{F \cdot b \cdot a^2}{3 \cdot J_{SP} \cdot E} \left(1 + \frac{a}{b} \right) + \frac{F}{b^2} \cdot \left[\frac{(a+b)^2}{K_V} + \frac{a^2}{K_h} \right]$$

nach b (Lagerabstand) differenzieren und das Differential gleich Null setzen:

$$\frac{dy}{db} = b^3 - \frac{6 \cdot E \cdot J_{SP}}{a \cdot K_V} \cdot b - \frac{6 \cdot E \cdot J_{SP} (K_V + K_h)}{K_V \cdot K_h} = 0$$

Aus dem Differential der Gesamtverlagerung y kann nun der Einfluss der Steifigkeit des vorderen Lager K_V auf den optimalen Lagerabstand b ermittelt und graphisch dargestellt werden.

- Fazit:**
- bei hoher Steifigkeit des vorderen Lagers ist ein kleiner Lagerabstand b zu wählen, damit die Verlagerung an der Kraftangriffsstelle den kleinsten Wert erreicht
 - mit abnehmender Steifigkeit des vorderen Lagers, wird die exakte Berechnung des richtigen Lagerabstands b immer wichtiger

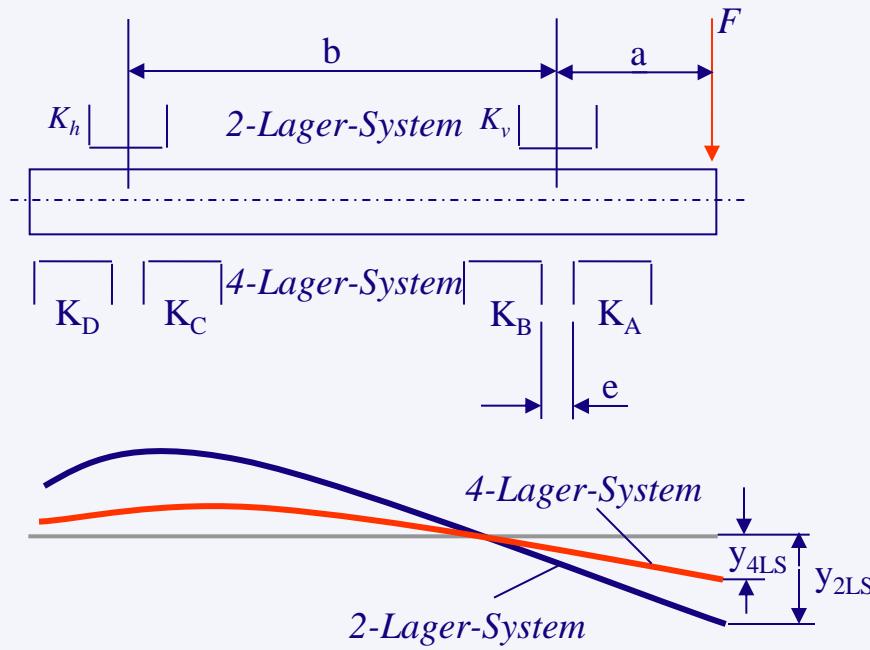


Quelle: Perović, WZM

Statische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen: Mehr-Lager-System

Die Gesamtverlagerung y eines Mehr-Lager-Systems ist deutlich geringer als die eines Zwei-Lager-Systems!

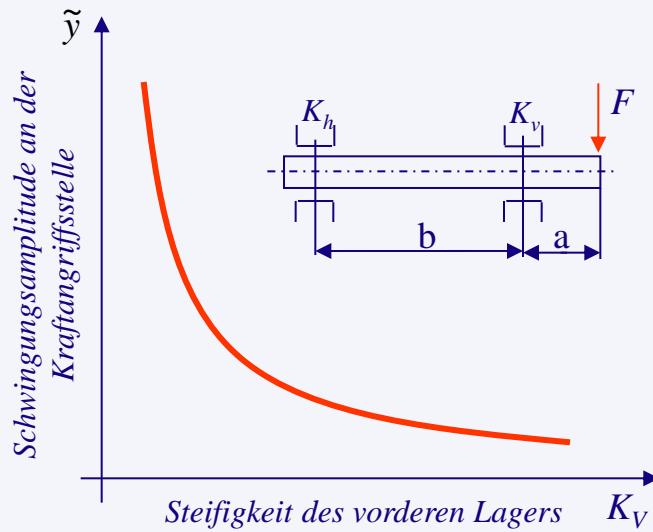
Durch das zweite vordere Lager ist die Welle in der Nähe der Kraftangriffsstelle so eingespannt, dass die Verlagerung y gegenüber dem Zwei-Lager-System wesentlich kleiner ist.



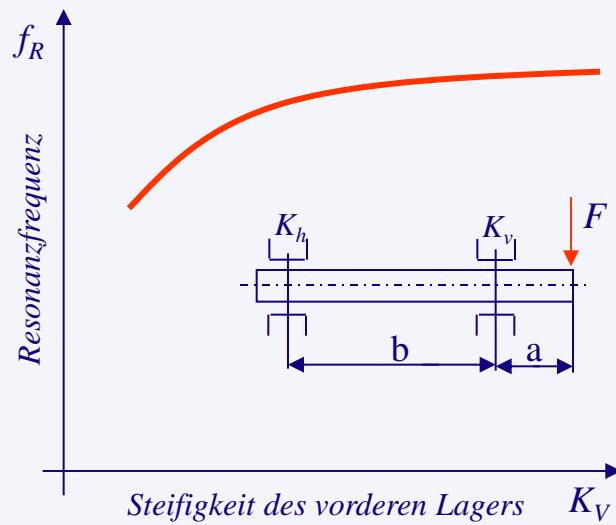
Mit Zunahme des Abstands e zwischen zwei vorderen Lagern verringert sich die Gesamtverlagerung y . Diesem Trend sind jedoch Grenzen gesetzt, da bei immer größer werdendem Abstand e das vordere Lager schließlich so nah an das hintere rückt, dass die Vorteile des zweiten vorderen Lagers aufgehoben werden.

Dynamische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

Einfluss der Steifigkeit des vorderen Lagers auf die Schwingungsamplitude an der Kraftangriffsstelle



Einfluss der Steifigkeit des vorderen Lagers auf die Resonanzfrequenz

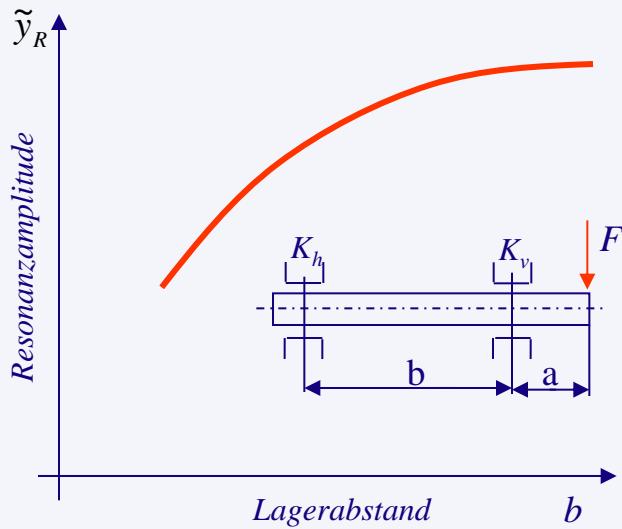


Mit zunehmender Steifigkeit des vorderen Lagers nimmt die Schwingungsamplitude an der Kraftangriffsstelle ab und die Resonanzfrequenz zu. Die Kurve der dynamischen Steifigkeit verläuft ähnlich wie die Kurve der statischen Steifigkeit!

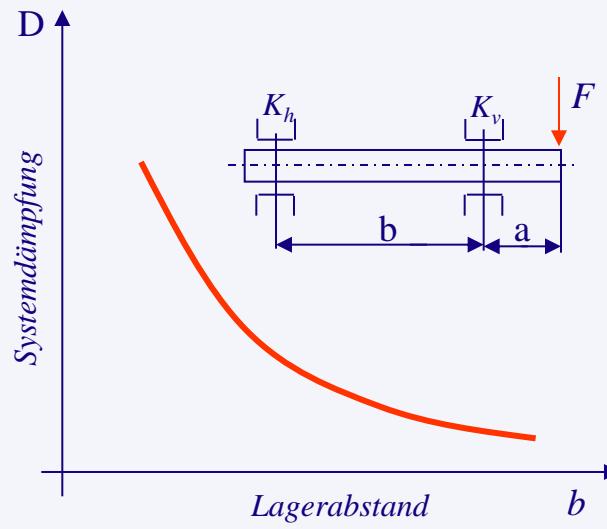
Quelle: Perović, WZM

Dynamische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

Einfluss des Lagerabstands auf die Resonanzamplitude



Einfluss des Lagerabstands auf die Systemdämpfung

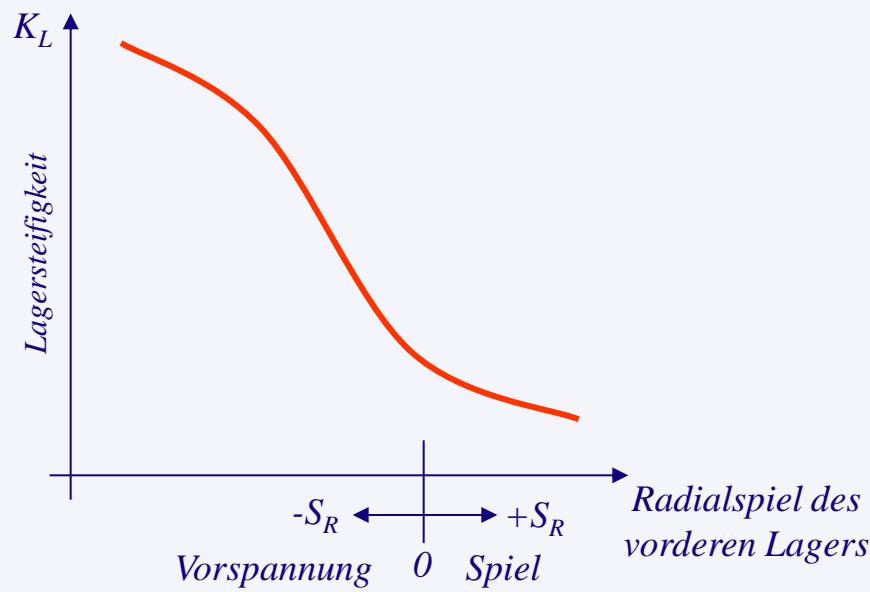


Mit abnehmendem Lagerabstand b verbessert sich das dynamische Verhalten des Spindel-Lager-Systems. Die Systemdämpfung D nimmt zu und die Resonanzamplitude ab. Dabei ist zu beachten, dass kleine Lagerabstände nur bei großen Lagersteifigkeiten zu wählen sind, damit die statische Verlagerung minimal wird.

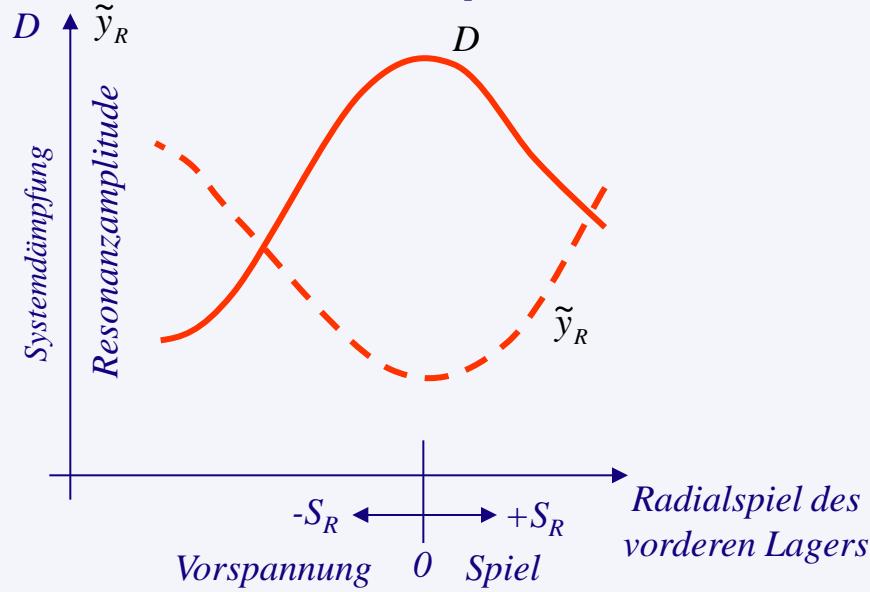
Quelle: Perović, WZM

Dynamische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

Einfluss des Lagerspiels
auf die Lagersteifigkeit



Einfluss des Lagerspiels auf
die Systemdämpfung und
Resonanzamplitude

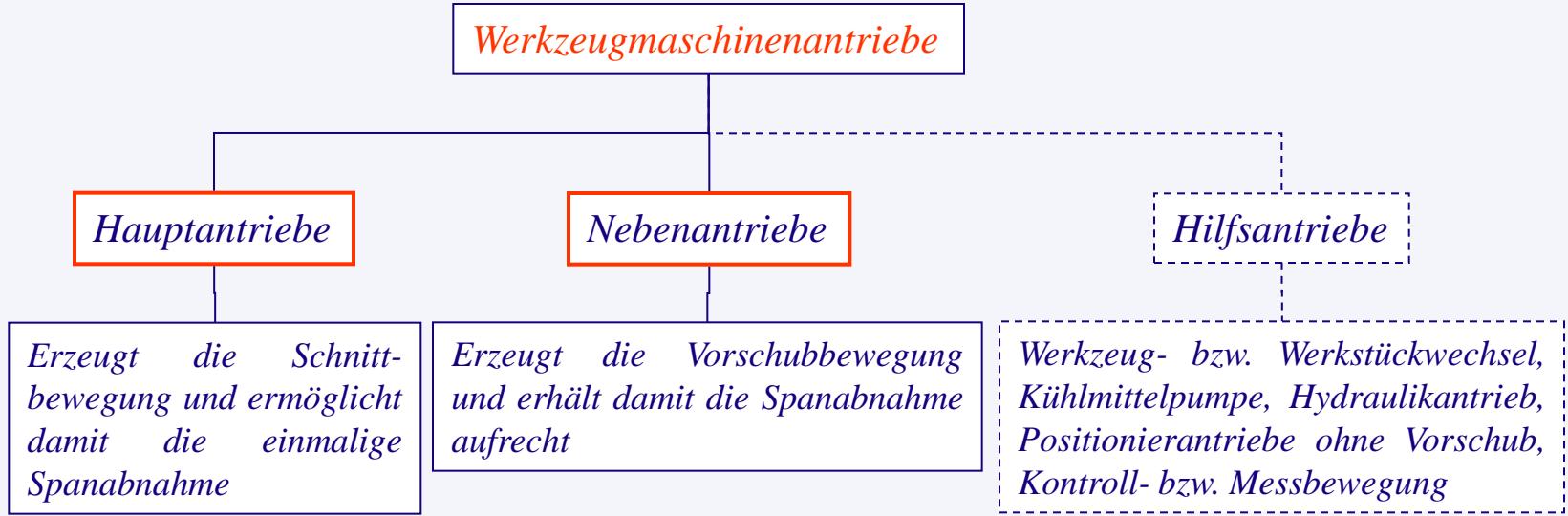


Mit Abnahme des Lagerspiels bzw. mit Zunahme der Lagervorspannung erhöht sich die Lagersteifigkeit K_L . Das günstigste dynamische Verhalten liegt im Bereich des spielfreien Zustands des Lagers ($S_R=0$), da die Systemdämpfung den maximalen und die Resonanzamplitude den minimalen Wert erreichen.

Quelle: Perović, WZM

Antriebe

Antriebe



Der Haupt- und Nebenantrieb sind die produktivitätsbestimmenden Baugruppen einer Werkzeugmaschine. Bei der Maschinenanwendung bzw. Maschinenentwicklung müssen deren Eigenschaften gut mit den fertigungstechnischen Anforderungen abgestimmt werden.

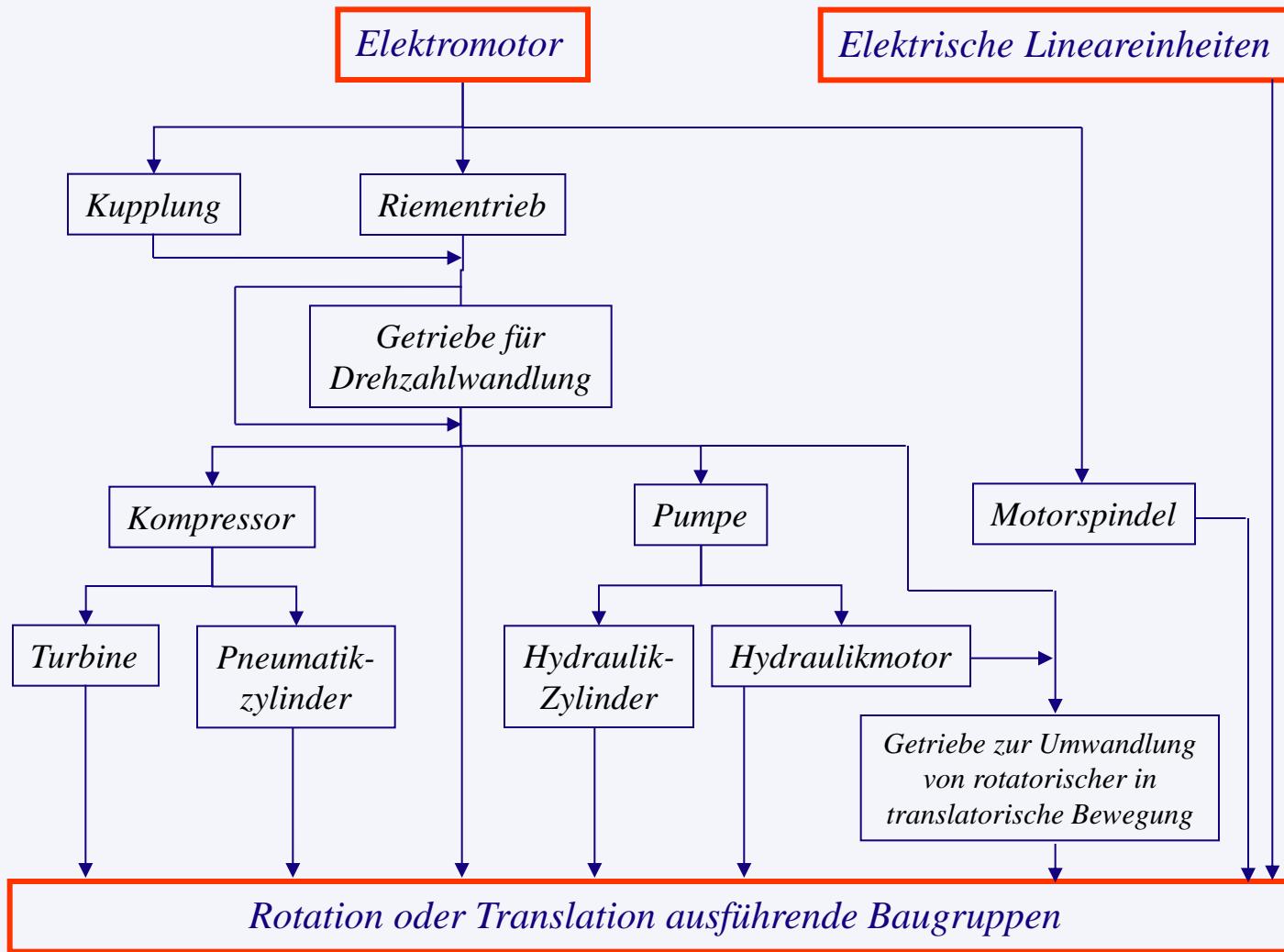


Antriebe

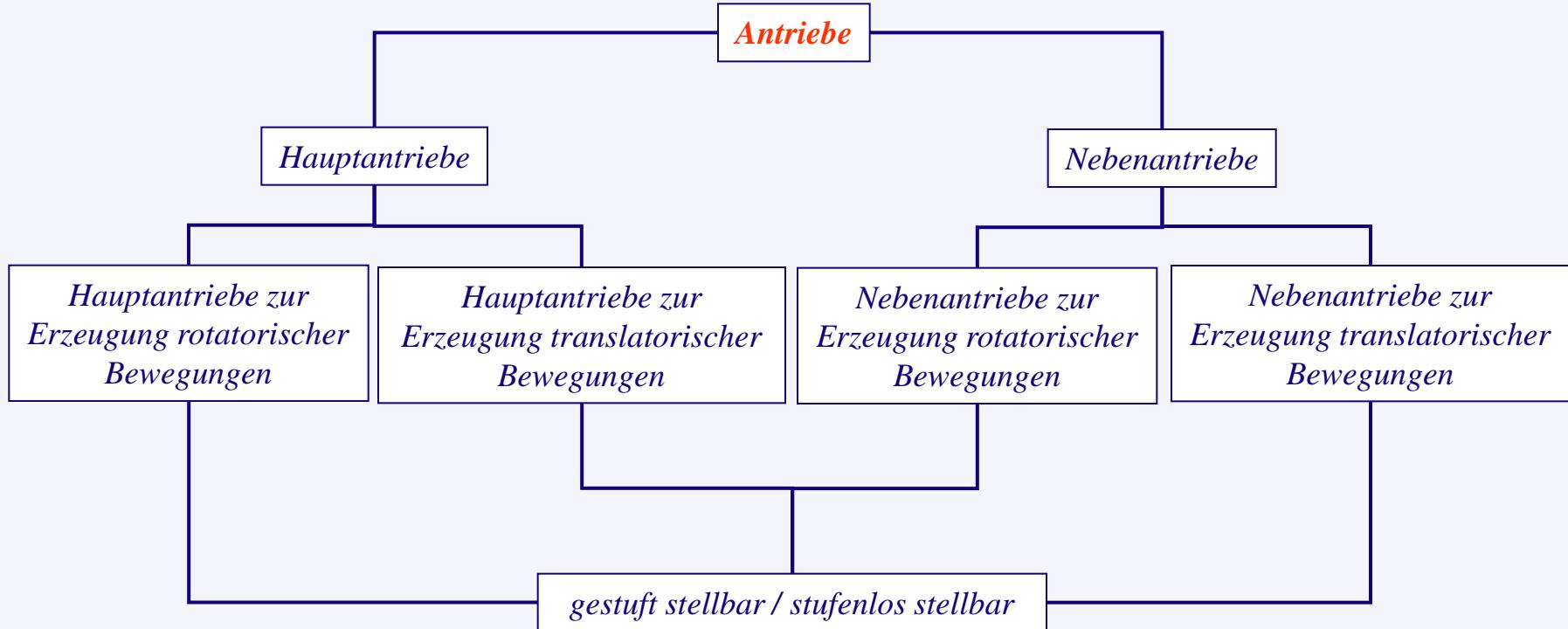
Anforderungen an Haupt- und Nebenantriebe:

- *Erzeugung von linearen Bewegungen oder Drehzahlen*
- *Abweichung von linearen Bewegungen und Drehzahlen müssen in einem zulässigen Rahmen bleiben*
- *sichere Übertragung geforderter Leistungen und Drehmomente*
- *hoher Wirkungsgrad*
- *gleichförmiger Bewegungsablauf*
- *geringe Geräuschemission*
- *kleine Abmessungen (Platzbedarf) und geringe Massenträgheitsmomente (energetische Verhältnisse)*
- *die Größe der Schnittbewegung und des Vorschubs sollten sich schnell und unkompliziert ändern lassen*
- *besonders bei Maschinen, die in Verbindung mit Automatisierungseinrichtungen stehen, ist ein Anfahren definierter Lagen sowohl im Vorschub- als auch im Hauptantrieb wichtig*
- *geringe Herstellkosten*

Antriebe



Antriebe: Übersicht



Hauptantriebe zur Erzeugung rotatorischer Bewegungen

→ *gestufte rotatorische Hauptantriebe
(Stufengetriebe)*

Durch einen Elektromotor werden eine oder mehrere separate Drehzahlen zur Verfügung gestellt. Diese können in einem gestuften Getriebe den geforderten Hauptspindeldrehzahlen angepasst werden. Das wechselweise Einschalten der gewünschten Übersetzungen erfolgt mittels Kupplungen. Bei der Abstufung ist zu beachten, dass für jede Fertigungsaufgabe eine passende Drehzahl zur Verfügung stehen muss. Die einzelnen Abtriebsdrehzahlen dürfen also nicht willkürlich gewählt werden.

→ *als besonders geeignet erweist sich die Auswahl der Abtriebsdrehzahlen nach einer **geometrischen Reihe***

*weitere Stufungsreihen: arithmetische Reihe (z.B. bei Vorschüben)
logarithmische Reihe (in der Praxis kaum im Einsatz)*

Gestufte rotatorische Hauptantriebe: Drehzahlbereich s

Der Drehzahlbereich s wird bei Werkzeugmaschinen (z.B. Drehmaschine) durch folgende Einflussgrößen begrenzt:

- zu bearbeitender Werkstückdurchmesser
- erforderliche Schnittgeschwindigkeit

Der Drehzahlbereich s ist definiert als der Quotient aus größter zu kleinster Abtriebsdrehzahl:

$$s = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_z}{n_1}$$

*s Drehzahlbereich
n_z größte Drehzahl der Werkzeugmaschine
n₁ kleinste Drehzahl der Werkzeugmaschine*

Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit einer Werkzeugmaschine:

- Drehzahlbereich
- Anzahl der einstellbaren Drehzahlen (Stufungszahl z)

Gestufte rotatorische Hauptantriebe: arithmetische Drehzahlstufung

Bei der arithmetischen Drehzahlstufung entsteht die nächst größere Drehzahl durch Addition eines gleichbleibenden Summanden „ a “

$$n_1$$

$$n_2 = n_1 + a$$

$$n_3 = n_2 + a = n_1 + 2 \cdot a$$

...

allgemein

$$n_z = n_{z-1} + a = n_1 + (z-1) \cdot a$$

$$n_z = n_1 + (z-1) \cdot a$$

Berechnung des (Summanden) arithmetischen Stufensprungs a

$$a = \frac{n_z - n_1}{z-1}$$

*a arithmetischer Stufensprung
n_z [min⁻¹] größte Drehzahl
n₁ [min⁻¹] kleinste Drehzahl
z Anzahl der Drehzahlstufen*

Berechnung des Drehzahlabfalls p zur nächst kleineren Drehzahl

$$p = \frac{n_x - n_{x-1}}{n_x} \cdot 100 \%$$

*p in % Drehzahlabfall zur nächst kleineren Drehzahl
n_x betrachtete Drehzahl
n_{x-1} die um eine Stufe kleinere Drehzahl*

Gestufte rotatorische Hauptantriebe: arithmetische Drehzahlstufung

Beispielrechnung

gegeben: $n_1 = 45 \text{ min}^{-1}$, $n_6 = 120 \text{ min}^{-1}$, $z = 6$

gesucht: a , $n_2 - n_5$, $p_{6/5}$ und $p_{2/1}$

$$a = \frac{120 - 45}{6 - 1} = 15$$

Errechnete Drehzahlreihe

45, 60, 75, 90, 105, 120

Drehzahlabfall p

$$n_6 / n_5 : p_{6/5} = \frac{n_6 - n_5}{n_6} \cdot 100 \% = \frac{120 - 105}{120} \cdot 100 \% = 12,5 \%$$

$$n_2 / n_1 : p_{2/1} = \frac{n_2 - n_1}{n_2} \cdot 100 \% = \frac{60 - 45}{60} \cdot 100 \% = 25 \%$$

→ Der Drehzahlabfall p ist bei kleinen Drehzahlen höher (25%) als bei größeren (12,5%).

- Im Bereich der kleinen Drehzahlen (große Werkstück- bzw. Werkzeugdurchmesser) sind die Drehzahlunterschiede sehr groß. In diesem Bereich müssten mehr Drehzahlen zur Verfügung stehen
- Im Bereich der großen Drehzahlen (kleine Werkstück- bzw. Werkzeugdurchmesser) sind die Drehzahlunterschiede sehr gering. In diesem Bereich werden die vielen Drehzahlen jedoch nicht genutzt
- arithmetische Stufungen werden bei Hauptantrieben nicht eingesetzt!

Gestufte rotatorische Hauptantriebe: geometrische Drehzahlstufung

Bei der geometrischen Drehzahlstufung entsteht die nächst größere Drehzahl durch Multiplikation mit einem Stufungsfaktor φ . Der Stufungsfaktor φ wird auch als Stufensprung bezeichnet.

$$\begin{aligned} n_1 & \\ n_2 &= n_1 \cdot \varphi \\ n_3 &= n_2 \cdot \varphi = n_1 \cdot \varphi^2 \end{aligned} \quad \xrightarrow{\text{allgemein}} \quad n_z = n_{(z-1)} \cdot \varphi = n_1 \cdot \varphi^{(z-1)}$$

...

Berechnung des Stufensprungs φ

$$\varphi = \sqrt[z-1]{\frac{n_z}{n_1}} \quad \begin{aligned} &\varphi \text{ Stufensprung} \\ &n_z [\text{min}^{-1}] \text{ größte Drehzahl} \\ &n_1 [\text{min}^{-1}] \text{ kleinste Drehzahl} \\ &z \text{ Anzahl der Drehzahlstufen} \end{aligned}$$

Drehzahlabfall p

$$p = \frac{n_x - n_{(x-1)}}{n_x} \cdot 100\% = \frac{n_{(x-1)} \cdot \varphi - n_{(x-1)}}{n_{(x-1)} \cdot \varphi} \cdot 100\% \quad \begin{aligned} &P [\%] \text{ Drehzahlabfall} \\ &\varphi \text{ Stufensprung} \end{aligned}$$

$$p = \frac{\varphi - 1}{\varphi} \cdot 100\%$$

Gestufte rotatorische Hauptantriebe: geometrische Drehzahlstufung

Beispielrechnung

gegeben: $n_1 = 45 \text{ min}^{-1}$, $n_6 = 250 \text{ min}^{-1}$, $z = 6$

gesucht: φ , $n_2 - n_5$, p

$$\varphi = \sqrt[5]{\frac{250}{45}} = 1,4$$

errechnete Drehzahlreihe (gerundet)

45, 63, 90, 125, 180, 250

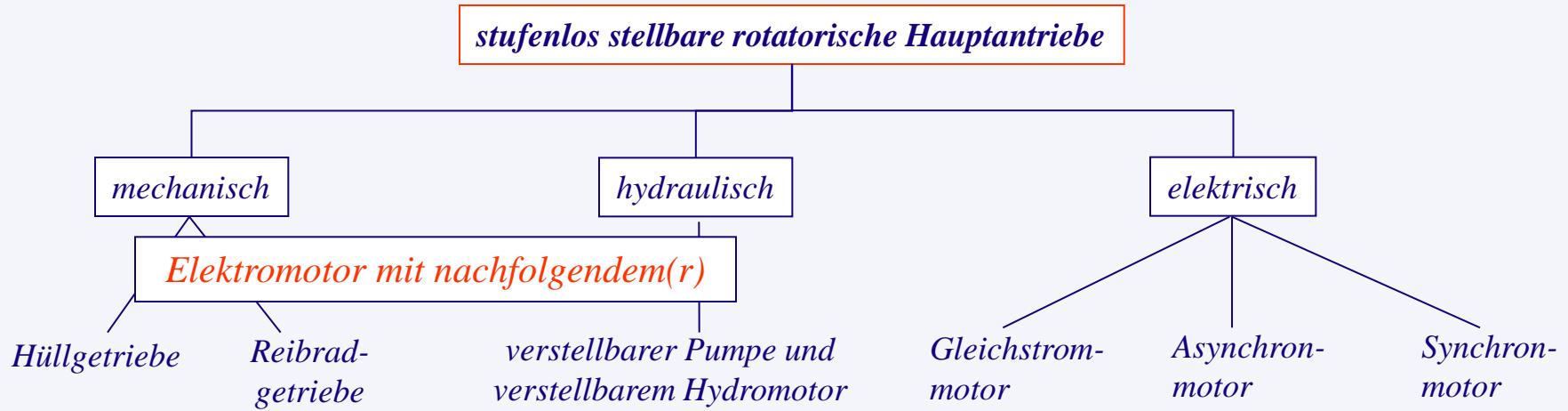
Drehzahlabfall p

$$p = \frac{\varphi - 1}{\varphi} \cdot 100\% = \frac{1,4 - 1}{1,4} \cdot 100\% = 28,57\%$$

Vorteile der geometrischen Drehzahlstufung:

- gleichmäßig aufgeteilter Drehzahlbereich, d.h. der Geschwindigkeitszuwachs von Drehzahl zu Drehzahl ist gleichbleibend
- die geometrische Reihe ist vervielfachungsfähig, d.h. die Anzahl der Antriebsdrehzahlen eines mehrstufigen Getriebes kann durch den Anbau einer weiteren Zahnradübersetzung (Vorgelege) verdoppelt werden. Die Stufung bleibt dabei unverändert
- polumschaltbare E-Motoren fügen sich in die geometrische Drehzahlfolge ein
- Entwurf und Berechnung geometrisch gestufter Getriebe ist einfach

Hauptantriebe zur Erzeugung rotatorischer Bewegungen



Stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Vorteile:

- *Einstellung optimaler Schnittbedingungen (Drehzahlen)*
- *Verkürzung von Nebenzeiten, da stufenlose Getriebe unter Last geschaltet werden können*
- *stoßdämpfend*
- *hohe Laufruhe*
- *Drehmoment und Leistung lässt sich in Abhängigkeit von der Drehzahl sehr gut den technologischen Erfordernissen anpassen*

Nachteile:

- *höherer Preis*
- *geringerer Wirkungsgrad (mech. Getrieben)*
- *geringere Lebensdauer (mech. Getrieben)*
- *vielfach keine schlupffreie Bewegungsübertragung (mech. Getrieben)*

Stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

→ mechanisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Im wesentlichen werden folgende Getriebe zur stufenlosen Drehzahlstellung eingesetzt:

1. Hüllgetriebe

2. Reibradgetriebe

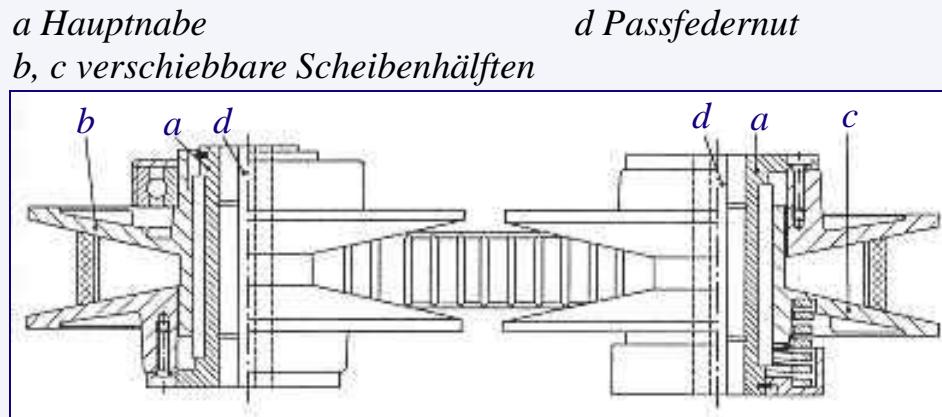
Funktionsprinzip: Hüllgetriebe

Durch axiales Verschieben der kegelförmig gestalteten Riemenscheibenhälften wird der wirksame Durchmesser einer Scheibe vergrößert bzw. verkleinert, während der andere verkleinert bzw. vergrößert wird.

Dadurch ist es möglich die Übersetzung im Bereich von

$$\frac{d_{An,\min}}{d_{Ab,\max}} \leq i \leq \frac{d_{An,\max}}{d_{Ab,\min}} \quad \text{stufenlos einzustellen!}$$

Der Drehzahlbereich s_n liegt in der Größenordnung → bis ca. 10 und berechnet sich nach



$$s_{nn} = \frac{n_{Ab,\max}}{n_{Ab,\min}} = \frac{n_{An} \cdot \frac{d_{An,\max}}{d_{Ab,\min}}}{n_{An} \cdot \frac{d_{An,\min}}{d_{Ab,\max}}} = \frac{d_{An,\max}}{d_{Ab,\min}} \cdot \frac{d_{Ab,\max}}{d_{Ab,\min}}$$

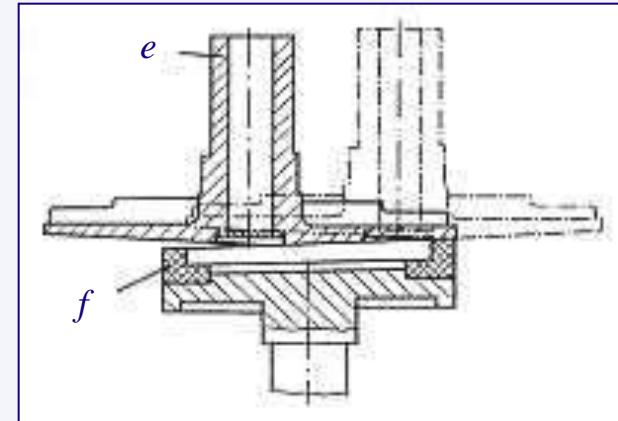
Mechanisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Funktionsprinzip: Reibradgetriebe

Bei Reibradgetrieben wird der wirksame Durchmesser bei zylindrischen Scheiben durch radiales Verschieben einer Scheibe zur anderen oder bei kegelförmigen Scheiben durch Verschieben eines Übertragungselementes erreicht.

Die Berechnung von Übersetzung i und Stellbereich s_n erfolgt analog zu den Berechnungen des Hüllgetriebes.

Reibradgetriebe (Quelle: Hirsch, WZM)



e Treibende Scheibe mit hochglanzpolierter Reibfläche

f Reiring der Abtriebsscheibe aus verschleißarmen Material

Stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

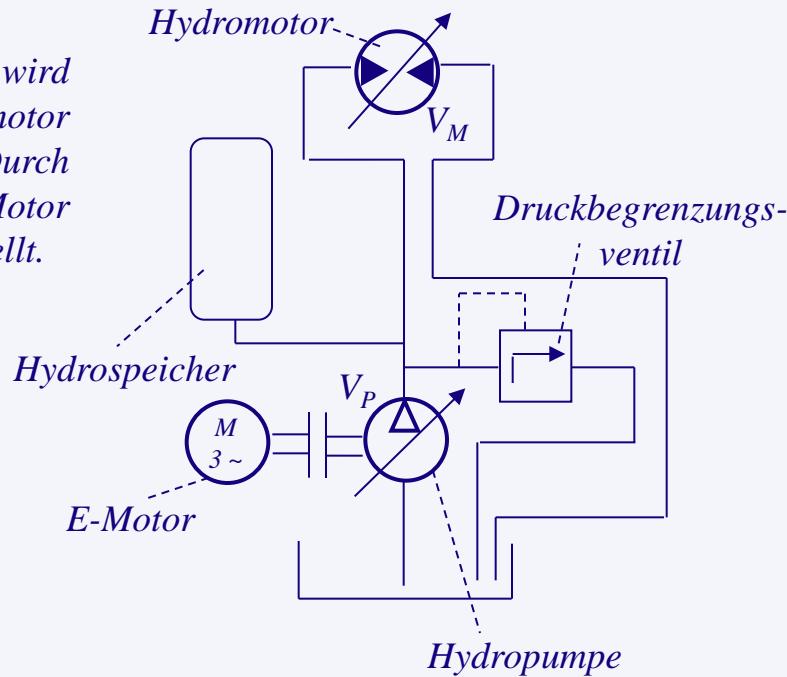
→ hydraulisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Funktionsprinzip:

Mit Hilfe einer elektrisch angetriebenen, verstellbaren Pumpe wird ein einstellbarer Ölstrom erzeugt. Dieser wird dem Hydromotor zugeführt, dessen Schluckvolumen ebenfalls einstellbar ist. Durch Veränderung, des von der Pumpe zugeführten und des im Motor benötigten Ölstroms pro Umdrehung, wird dessen Drehzahl gestellt.

Der Drehzahlstellbereich solcher Anlagen liegen zwischen 20 ... 100 und berechnet sich nach:

$$S_{nn} = S_{Förder, Pumpe} \cdot S_{Schluck, Motor}$$



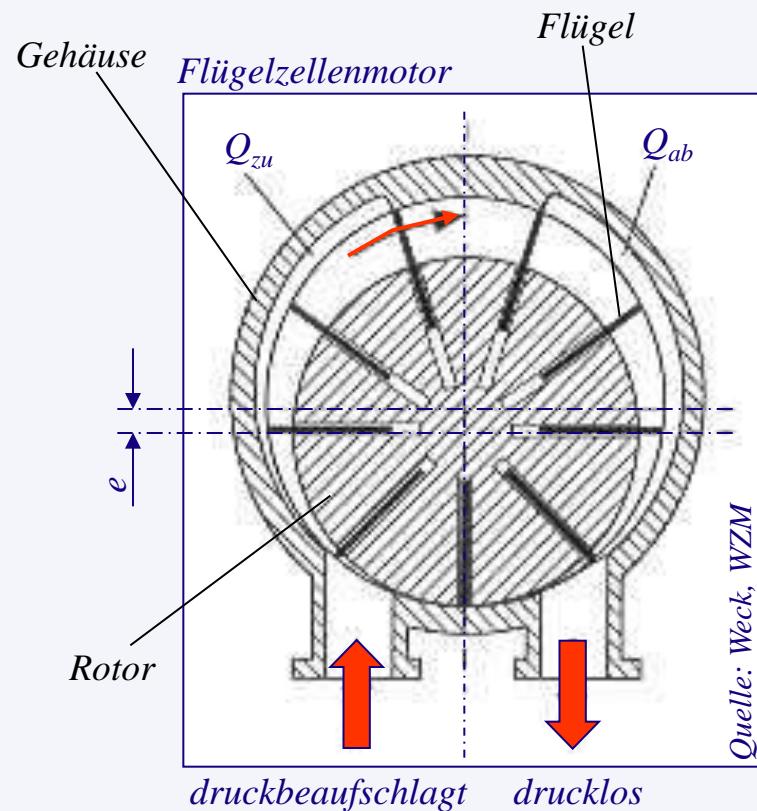
Quelle: Weck, WZM

Hydraulisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Beispiel: Flügelzellenmotor (Hydromotor)

Funktionsprinzip:

Die Flügel, die radial in den Schlitzten des Rotors sitzen, bilden zusammen mit Rotor und Gehäuse die Verdrängungsräume. Durch die Exzentrizität e des Rotors zum Pumpengehäuse werden die Flügel gezwungen auf einer zur Gehäuseachse konzentrischen Kreisbahn zu laufen. Die dabei entstehenden zwei Druckzonen ermöglichen große Leistungen auf sehr kleinem Raum. Die Variation der Drehzahl und des maximal möglichen Belastungsmoments wird durch Änderung der Exzentrizität e erreicht.



Stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

→ elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Elektrisch stufenlos stellbare Antriebe haben sich als Hauptantriebe im Bereich spanender Werkzeugmaschinen durchgesetzt. Grund dafür ist die fortschreitende Entwicklung in der Antriebs- und Steuerungstechnik.

Im wesentlichen werden folgende elektrische Antriebe eingesetzt:

1. Gleichstrommotor

- *große Drehmomente und Leistungen*
- *Drehzahlen unter 4500 min^{-1}*

2. Asynchronmotor

- *mittlere Drehmomente und Leistungen*
- *hohe Drehzahlen*

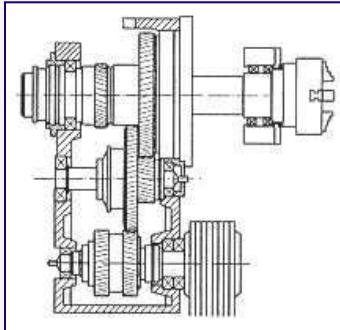
Der Asynchronmotor bietet folgende Vorteile gegenüber dem Gleichstrommotor:

- *sehr großer Drehzahlbereich, z.B. Drehzahl (0,0001 bis 9000) min^{-1}*
- *sehr großer Bereich konstanter Leistung*
- *ausgezeichnete Dynamik und Rundlaufgenauigkeit*
- *extreme Überlastbarkeit bei allen Motordrehzahlen*
- *Netzrückspeisung*
- *wartungs- und verschleißfrei*
- *preiswert*

Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

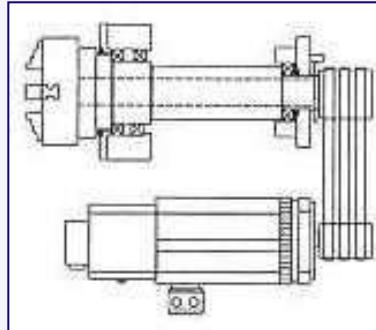
Folgende Aufbauprinzipien haben sich für Hauptantriebe durchgesetzt:

Variante 1



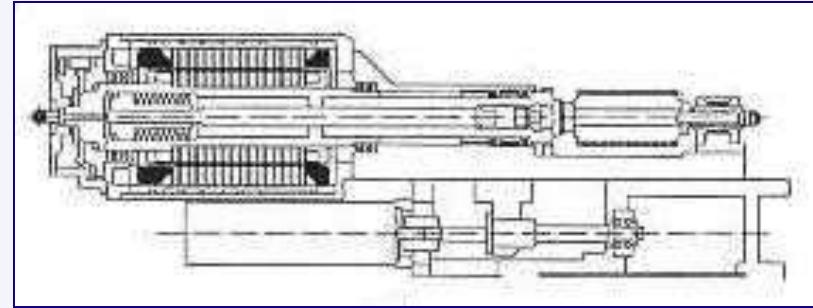
mit Schaltgetriebe

Variante 2



mit konstanter Übersetzung

Variante 3



Motorspindel

Variante 1: Elektromotor mit nachgeschaltetem Vervielfältigungsgetriebe sowie mit oder ohne konstante Übersetzung auf die Hauptspindel (Einsatzbereich: z.B. Drehmaschine)

Variante 2: Elektromotor mit nachgeschalteter konstanter Übersetzung auf die Hauptspindel (Einsatzbereich: z.B. Drehmaschine)

Variante 3: Elektromotor als Motorspindel (Rotor des Motors ist gleichzeitig Hauptspindel); die Hauptspindeldrehung ist als NC-Achse nutzbar (Einsatzbereich: z.B. Wälzfräsmaschine)

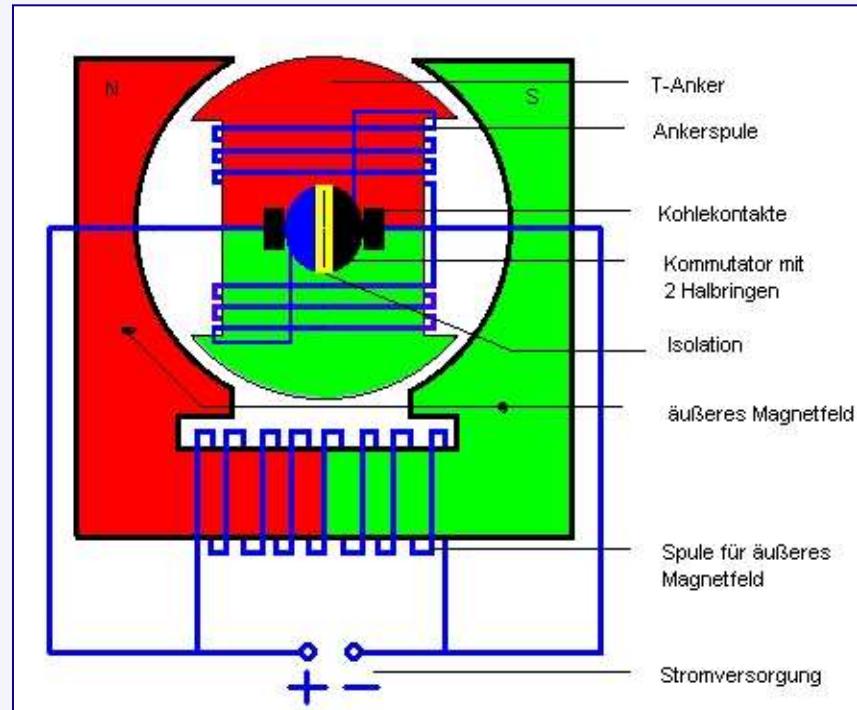
Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Funktionsprinzip: Gleichstrommotor

Bei einem Gleichstrommotor benötigt man ein feststehendes Magnetfeld. Dies wird entweder durch einen Permanentmagneten oder durch einen Elektromagneten erzeugt. Die Polschuhe dieses Magnetfelds sind so gebaut, dass sich in ihrem Zwischenraum ein weiterer Elektromagnet drehen kann.

Der Doppel-T-Anker bildet den zweiten Magneten des Elektromotors. Über den blauen und schwarzen Halbring führt man der Spule Strom zu. Der aus Eisen bestehende Anker wird dadurch zum Elektromagneten.

Die Stromquelle versorgt die äußeren Feldmagneten sowie die innere Ankerwicklung mit Strom. Dadurch entstehen 2 Magnetfelder, die sich gegenseitig beeinflussen. Da der Anker drehbar gelagert ist, dreht er sich solange, bis sein Nordpol am Südpol des äußeren Magneten angekommen ist und umgekehrt. Die Bewegung wäre jetzt zu Ende, wenn nicht genau in diesem Moment die Stromrichtung und somit die Orientierung des Magnetfelds im Anker umgekehrt werden würde. Die Bewegung geht somit weiter.



Gleichstrommotor (Quelle: FH-Frankfurt)

Die Drehzahlstellung erfolgt durch Veränderung der Ankerspannung und/oder Veränderung des magnetischen Flusses.

Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe: Gleichstrommotor

- Betrieb in verschiedenen Drehzahlbereichen möglich (Ankerstellbereich, Feldstellbereich)
- Im Bereich zwischen n_{min} und n_{max} können Drehzahleinstellungen stufenlos bei konstantem Drehmoment vorgenommen werden. Dieser Bereich wird als Ankerstellbereich $S_{nn,A}$ bezeichnet
- Im Bereich zwischen Nenndrehzahl n_{nenn} und Maximaldrehzahl n_{max} (Feldstellbereich $S_{nn,F}$) ist die Motordrehzahl bei konstanter Leistung wählbar

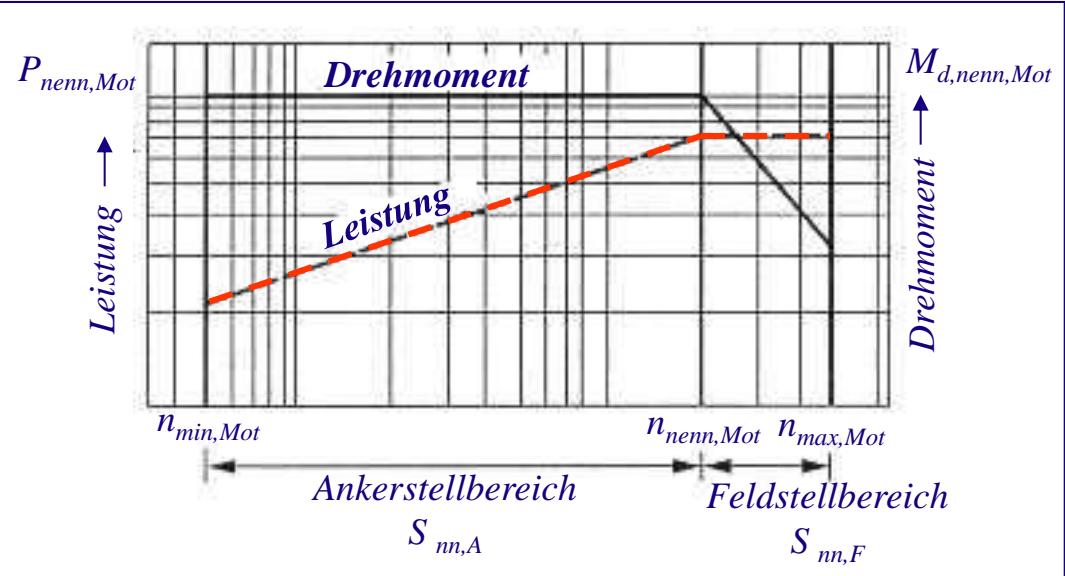
Feldstellbereich $S_{nn,F}$:

$$S_{nn,F} = \frac{n_{max,Mot}}{n_{nenn,Mot}}$$

- Bei Nenndrehzahl kann dem Motor das Nenndrehmoment und die Nennleistung abverlangt werden.

$$P_{nenn,Mot} = M_{d,nenn,Mot} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{nenn,Mot}$$

- Für andere Drehzahlen kann bei Beachtung der konstanten Nennleistung im Feldstellbereich bzw. des konstanten Nenndrehmoments im Ankerstellbereich die jeweils unbekannte Größe berechnet werden.



Kenngrößen eines stufenlos stellbaren Gleichstrommotors
(Quelle: Hirsch, WZM)

→

$$M_{d,Mot} = \frac{P_{nenn,Mot}}{2 \cdot \pi \cdot n_{Mot}}$$

$$P_{Mot} = M_{d,nenn,Mot} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{Mot}$$

Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Funktionsprinzip: Asynchronmotor

Werden drei Spulen um 120° ($3 \times 120^\circ = 360^\circ$) versetzt zueinander angeordnet und diese mit Drehstrom beaufschlagt, entsteht ein magnetisches Drehfeld. Eine in das Drehfeld gesetzte Kompassnadel dreht sich synchron mit dem Drehfeld, weil sie sich nach den Polen ausrichtet. Die Pole wechseln stetig in gleicher Reihenfolge.

Der Läufer kann niemals die Drehfelddrehzahl erreichen. Er bleibt hinter der Drehfelddrehzahl zurück. Das hinterher eilen des Läufers wird als asynchron bezeichnet. Die Differenz zwischen Läuferdrehzahl n_2 und Drehfelddrehzahl n_1 wird als Schlupfdrehzahl n_s bezeichnet.

$$n_s = n_1 - n_2$$

n_s Schlupfdrehzahl
 n_1 Drehfelddrehzahl
 n_2 Läuferdrehzahl

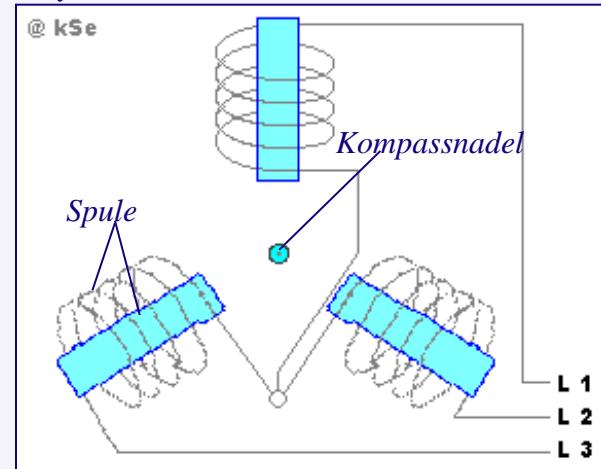
Der Schlupf s wird in Prozent, bezogen auf die Drehfelddrehzahl, angegeben.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \%$$

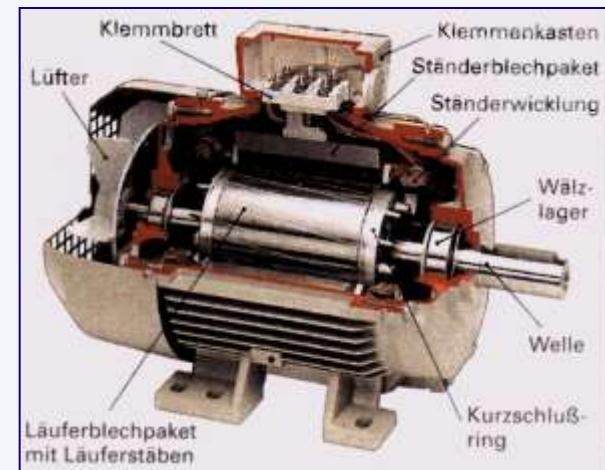
s Schlupf
 bei großen Motoren $s \approx 5 \%$

Die Drehzahlstellung erfolgt durch Veränderung der Netzfrequenz (Netzfrequenzwandler).

Asynchronmotor



Quelle: www.mechatronik-neuwied.de

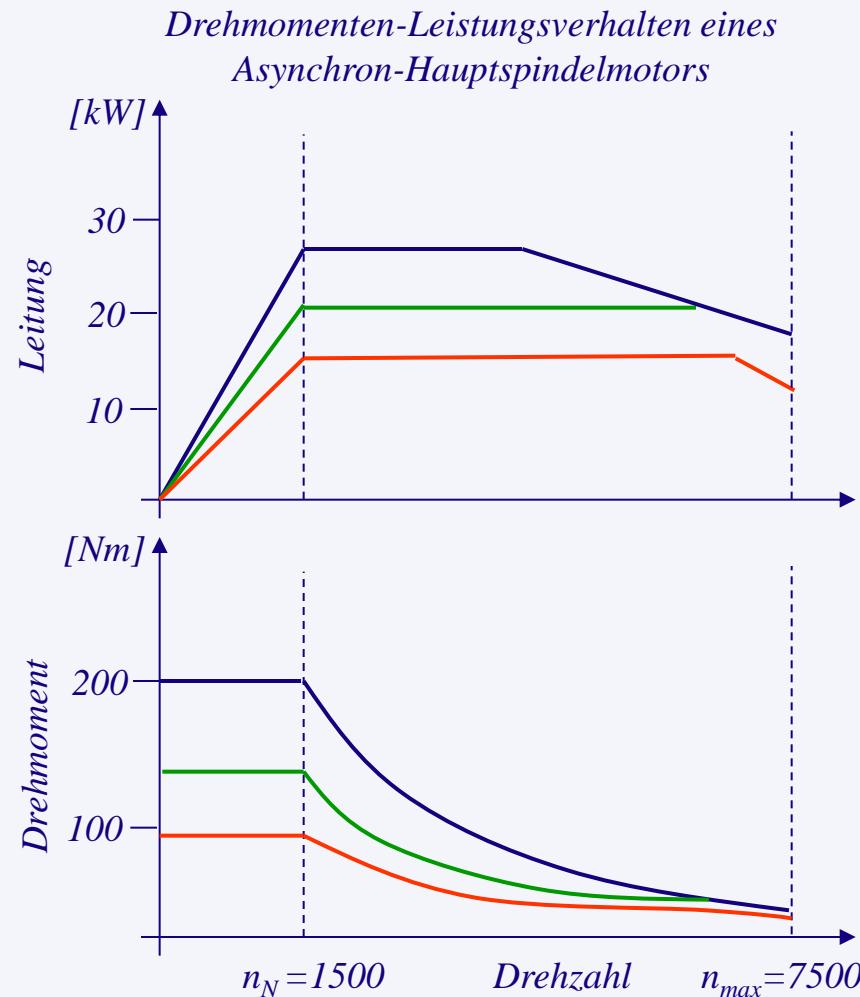


Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe: Asynchronmotor

- prinzipielles Verhalten ähnelt dem des Gleichstrommotors
- Bereich konstanter Leistung zwischen Nenn- und Maximaldrehzahl
- Drehzahl kann bis zur Drehzahl „Null“ eingestellt werden
- halten des Rotors bei Stillstand ist möglich
- unendlich großer Stellbereich zwischen minimaler und maximaler Drehzahl

$$s_{nn,M} = \frac{n_{nenn,Mot}}{n_{min,Mot}} = \frac{n_{nenn,Mot}}{0} = \infty$$

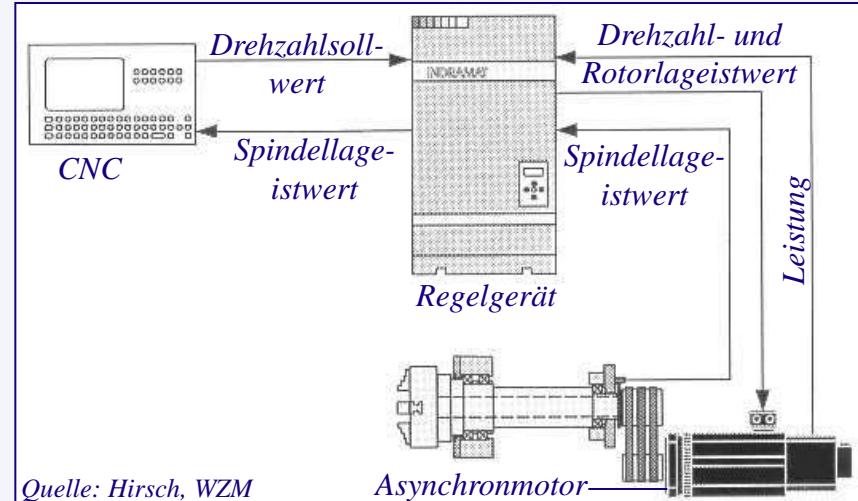
- Dauerbetrieb (S1)
- 30 min. Kurzzeitbetrieb (S2) oder Aussetzbetrieb (S6) mit Spieldauer 10 min. bei 40 % Einschaltdauer
- Aussetzbetrieb (S6) mit Spieldauer 10 min. bei 23 % Einschaltdauer



Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe: Asynchronmotor

Mit einer entsprechenden Steuerungstechnik sind folgende Eigenschaften erreichbar:

- großer Drehzahlstellbereich mit hoher Drehzahlgenauigkeit
- großer Drehzahlstellbereich mit konstanter Leistung und deutlich höheren Drehmomenten
- hohe Dynamik
- sehr guter Rundlauf
- hohe kurzzeitige Überlastbarkeit bei allen Drehzahlen
- hochauflösende Messung der Rotorlage (Auflösung von bis zu 2 Millionen Teilen pro Umdrehung)
- Netzdirektanschluß und Netzrückspeisung



Quelle: Hirsch, WZM

Der digital angesteuerte Asynchronmotor bietet durch die Messung von Winkellage, Strom und Spannung über der Zeit die Möglichkeit den Betriebszustand zu überwachen.

Ohne zusätzliche Komponenten sind messbar:

- Lage, Winkelgeschwindigkeit (Drehzahl), Winkelbeschleunigung der Motorwelle
- Momentanes Drehmoment und momentane Leistung sowie ihr Verhalten über der Zeit

Hauptantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

Einsatzbereich:

- Hobeln
- Stoßen
- Ziehen
- Räumen

Ausführungsformen:

- mechanisch
- hydraulisch  translatorische Bewegung durch:
 - Hydraulikzylinder
 - Hydromotor mit Umwandlungsgetriebe

Profil:

- hohe Kräfte bei geringem Platzbedarf
 - Geschwindigkeit und Kräfte sind unabhängig vom Weg einstellbar
 - hohe Anschaffungs- und Betriebskosten
-
- pneumatisch (keine Anwendung wegen Kompressibilität der Luft)

Anforderungen:

- gleichmäßige Oberflächenqualität durch konstante Schnittgeschwindigkeit über den Arbeitshub
- Verkürzung der Nebenzeiten, d.h. Rückhub schneller als Arbeitshub
- keine zu großen Beschleunigungen und Stöße in den Umkehrpunkten des Bewegungsablaufs

Hauptantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

→ elektromechanische translatorische Hauptantriebe



Umwandlungsgetriebe:

- **Schraubengetriebe (m – Modul, g – Gangzahl)**
 - Wälzschraubgetriebe mit Gewindesteigung h_{Gew}
 - Trapez- oder Flachgewindespindel/Mutter-System mit Gewindesteigung h_{Gew}
 - Schnecken/Zahnstangen-System mit Schneckensteigung $h_{\text{Sch}} = \pi \cdot m \cdot g$
 - Schnecke/Schneckenzahnstangen-System mit Schneckensteigung $h_{\text{Sch}} = \pi \cdot m \cdot g$

Berechnung der Hubgeschwindigkeit:

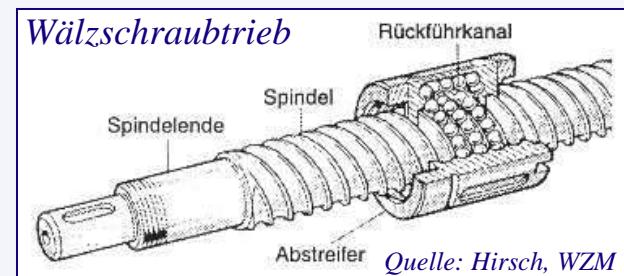
$$v_{Hub} = n \cdot h_{Gew/Sch}$$

n = Antriebsdrehzahl

h_{Gew} = Gewindesteigung

h_{Sch} = Schneckensteigung

Profil: • *variable Hublänge*
• *gleichförmige Bewegungen*
• *beliebige Beschleunigungs-Weg-Verläufe*
• *Aufwand hinsichtlich Spieldausgleich und Verschleiß*



Elektromechanische translatorische Hauptantriebe

● Zahnstangengetriebe

- Ritzel/Zahnstangen-System (z.B. Hobelmaschine)

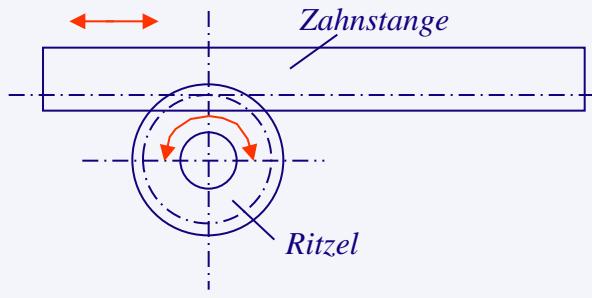
Berechnung der Hubgeschwindigkeit:

$$v_{Hub} = n \cdot d_0 \cdot \pi$$

n Antriebsdrehzahl
 d_0 Teilkreisdurchmesser

Profil: • Eigenschaften ähnlich denen von Schraubengetrieben
• niedrigere Bewegungsgleichförmigkeit
• niedrigere Bewegungsgenauigkeit
• Zahneingriffsstöße

Ritzel/Zahnstangensystem



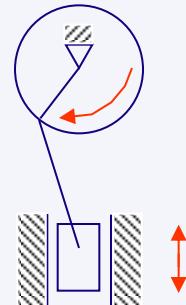
Elektromechanische translatorische Hauptantriebe

● Kurbelgetriebe

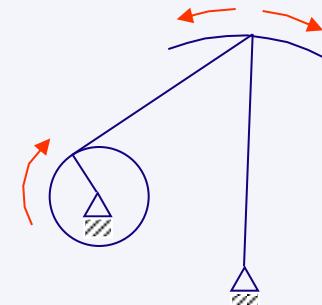
- Schubkurbel
- schwingende Kurbelschleife
- Kurbelschwinge

Profil: • *keine konstante Geschwindigkeit über den Hub*
• *beliebiges Verhalten über den Hub lässt sich mit stufenlos stellbaren Antrieben und entsprechender Steuerung erzeugen*

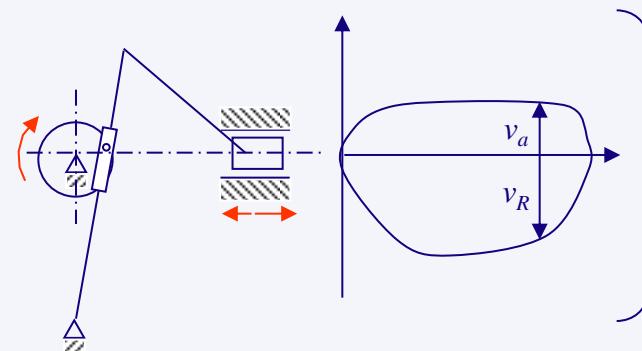
Schubkurbel



Kurbelschwinge

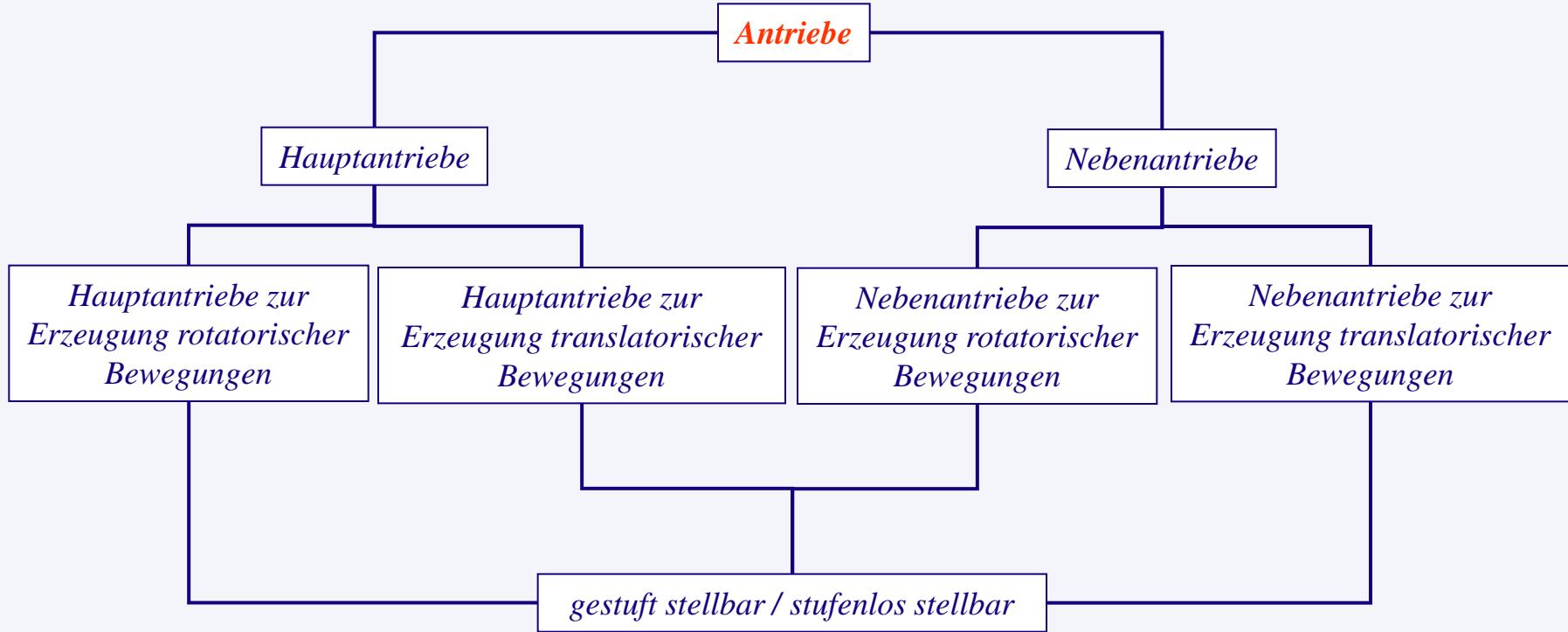


schwingende Kurbelschleife



- *annähernd gleiche Geschwindigkeit im Arbeitshub*
- *größere Geschwindigkeit im Rückhub (Verkürzung der Nebenzeiten)*

Antriebe: Übersicht



Nebenantriebe (Vorschubantrieb)

*feinfühlige Einstellung
der Bewegung*

große Stellbereiche

*hohe geometrische und
kinematische Genauigkeit*

*ruckfreier Geschwindigkeitsverlauf
(auch bei Schleichgang)*

*hohe statische und
dynamische
Antriebssteifigkeit*

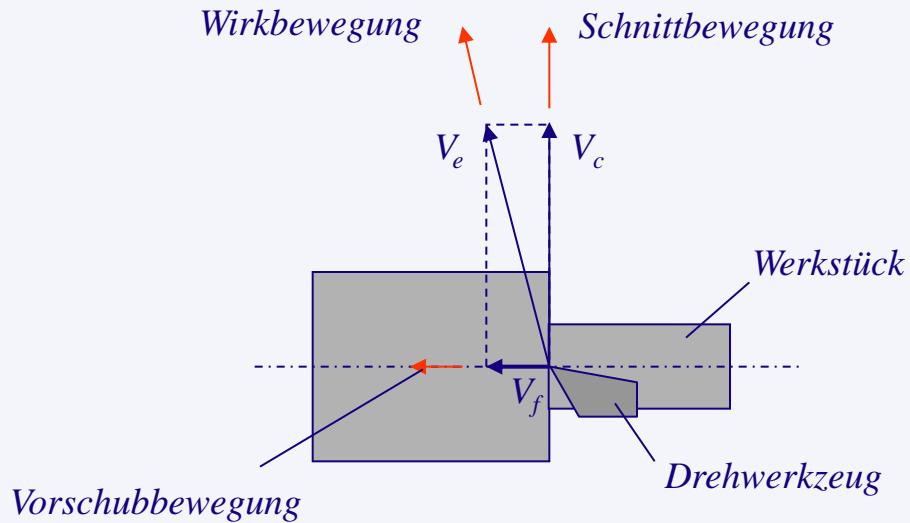
*günstiges Beschleunigungsverhalten
im gesamten Stellbereich (geringe
Trägheitsmomente der zu bewegenden
Bauteile)*



Nebenantriebe (Vorschubantrieb)

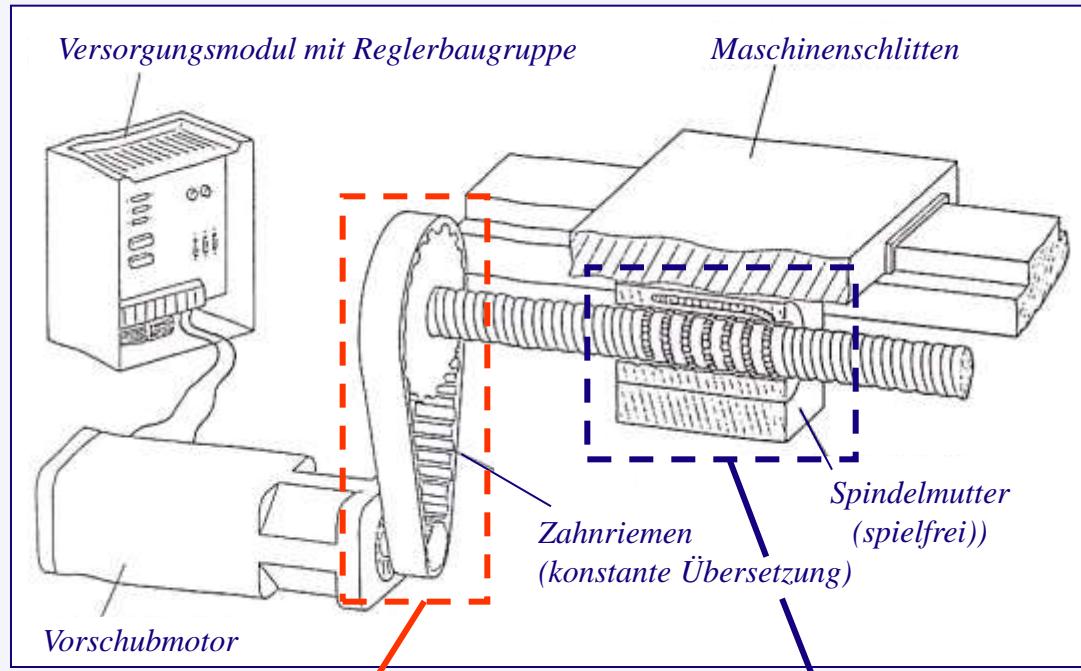
Definition der Vorschubbewegung nach DIN 6580

Die Vorschubbewegung ist diejenige Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die zusammen mit der Schnittbewegung eine mehrmalige oder stetige Spanabnahme während mehrerer Umdrehungen oder Hübe ermöglicht. Sie kann schrittweise oder stetig vor sich gehen.



Nebenantriebe (Vorschubantrieb)

Nebenantrieb mit rotatorische Motor (typischer Aufbau)



Anpassungsgetriebe
(Drehzahlanpassung)

Umwandlungsgetriebe
(Rotation – Translation)

Quelle: FHD

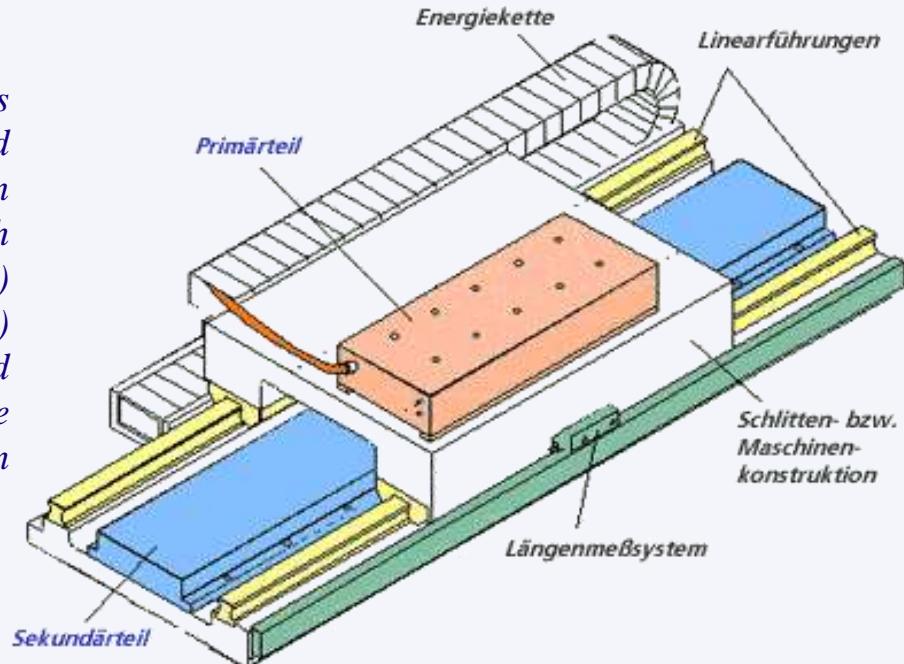
Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

Funktionsprinzip: Linearmotor

Ein Linearmotor entsteht durch Abwicklung eines rotativen Motors und besteht aus einem Primär- und Sekundärteil. Das Primärteil trägt die Wicklungen und das Sekundärteil (Reaktionsteil) ist je nach Ausführung mit Kurzschlussstäben (Asynchronmotor) oder mit Permanentmagneten (Synchronmotor) ausgestattet. Anstelle des elektrischen Drehfelds wird ein lineares Wanderfeld erzeugt. Durch die Aneinanderreihung von Sekundärteilsegmenten kann eine beliebige Verfahrstrecke erzielt werden.

Vorteile: (gegenüber Antrieben mit Umwandlungsgetriebe)

- *kein Anpassungsgetriebe*
- *kein Umwandlungsgetriebe*
- *hohe Beschleunigungswerte (bis 450 m/s²)*
- *sehr hohe Verfahrgeschwindigkeiten (bis 300 m/s)*
- *hohe Positioniergenauigkeit*

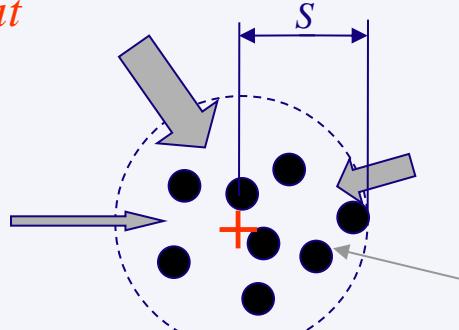


Nachteil: Schlechter Wirkungsgrad durch Erwärmung der Reaktionsschiene bei Linear-Asynchronmotoren. Dieser Effekt tritt bei Verwendung von Linear-Synchronmotoren nicht auf!

Quelle: Rexroth

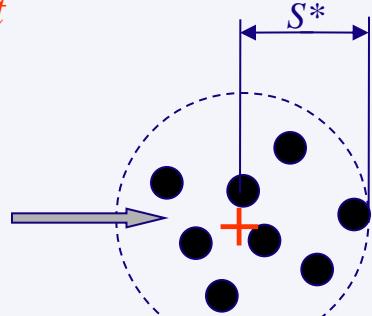
Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

Positioniergenauigkeit



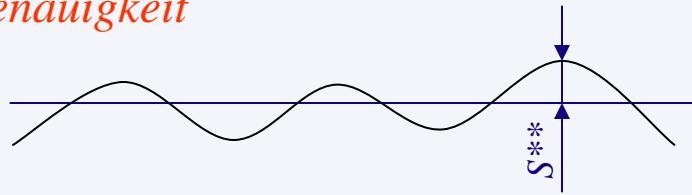
S ist die größte Abweichung der Ist-Position vom programmierten Sollwert bei unterschiedlichen Anfahrtrichtungen und Geschwindigkeiten.

Wiederholgenauigkeit



S^* ist die größte Abweichung der Ist-Position vom programmierten Sollwert bei stets gleicher Anfahrtrichtung und Geschwindigkeit

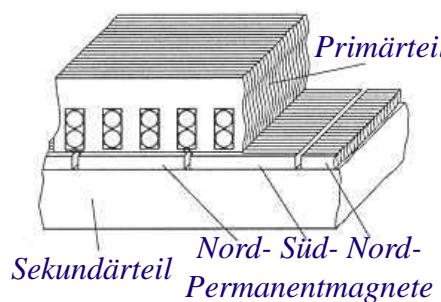
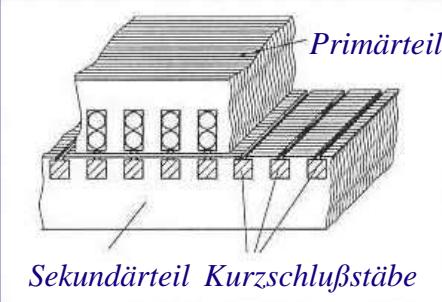
Bahngenauigkeit



S^{**} ist die größte Abweichung der tatsächlichen Bahn von der programmierten Bahn

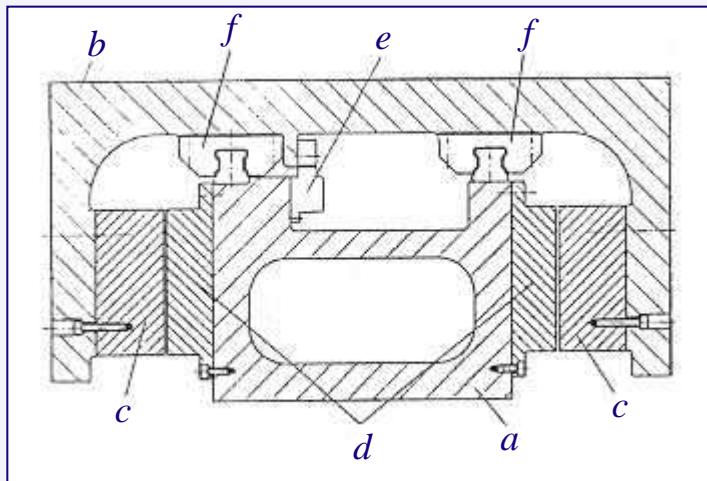
Quelle: FHD

Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen: Vergleich

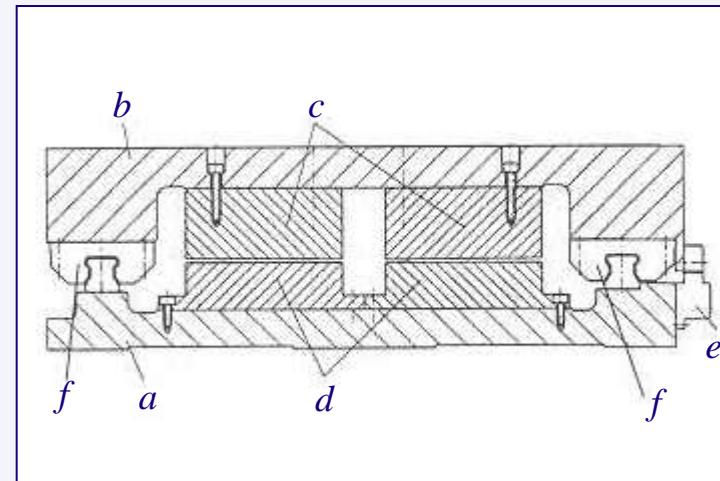
		Synchronmotor	Asynchronmotor
<i>Aufbau</i>		 <p>Primärteil Sekundärteil Nord- Süd- Nord- Permanentmagnete</p>	 <p>Primärteil Sekundärteil Kurzschlußstäbe</p>
<i>Kraft</i>		<i>Kraft-Masse-Verhältnis 50-100% höher im Vergleich zum Asynchronmotor</i>	<i>mehr Strom/Kraft benötigt wegen zusätzlicher Magnetisierung</i>
<i>Erwärmung</i>		<i>geringe Erwärmung des Sekundärteils</i>	<i>Erwärmung des Sekundärteils durch Magnetisierungsstrom</i>
<i>Messsystem</i>		<i>absolute Pollage wird beim Einschalten benötigt</i>	<i>inkrementelles Messsystem ausreichend</i>
<i>Anziehungskräfte</i>		<i>Anziehungskräfte sind permanent vorhanden</i>	<i>Anziehungskräfte nur während des Betriebs</i>
<i>Regelung</i>		<i>einfachere Regelstrukturen, kürzere Abtastintervalle im Vergleich zum Asynchronmotor</i>	<i>aufwendige Regelung (Feldorientierung mit Flussmodell des Motors)</i>
<i>Störeffekte</i>		<i>positionsabhängige Kraftwelligkeit, einfach zu kompensieren</i>	<i>lastabhängige Kraftwelligkeit, reduzierte Kräfte bei höheren Geschwindigkeiten</i>
<i>Kosten</i>		<i>teuere Magneten im Sekundärteil; im Vergleich zum Asynchronmotor kleinere Motor- und Umrichterbaugröße</i>	<i>billigeres Sekundärteil ergibt Preisvorteil bei langen Verfahrwegen</i>

Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

Beispiele: konstruktive Gestaltung von Linearachsen mit Linearmotor



- a) Maschinenbett
- b) Schlitten
- c) Primärteil
- d) Sekundärteil
- e) Messsystem
- f) Kompaktführung



Quelle: Hirsch, WZM

Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren

 Analog zu den Hauptantrieben unterscheidet man auch bei den Nebenantrieben zwischen gestuften und stufenlosen Antrieben. Die Vorgehensweise zur Auswahl von Motoren und Getrieben ist identisch mit der der Hauptantriebe.

Motoren für Nebenantriebe

Die in der Praxis eingesetzten Motoren sind meist spezielle Ausführungen, die an die besonderen Anforderungen des Vorschubs der Werkzeugmaschine angepasst sind.

● **Gleichstromservomotor** (Funktionsprinzip siehe Gleichstrommotor bzw. Hauptantriebe)

Für Nebenantriebe werden so genannte Langsamläufer verwendet.
Sie besitzen gute dynamische Eigenschaften durch

- geringes Trägheitsmoment und hohes Beschleunigungsmoment,
- hohe Drehmomente auch bei niedrigen Drehzahlen,
- ruhigen Lauf auch bei kleinen Drehzahlen,
- gute Aufnahme der Verlustwärme mit Hilfe der Wärmespeicherkapazität des Läufers,
- sehr hohen Wirkungsgrad bedingt durch Dauermagneten.

Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren: Motoren für Nebenantriebe

● Schrittmotor

Funktionsprinzip:

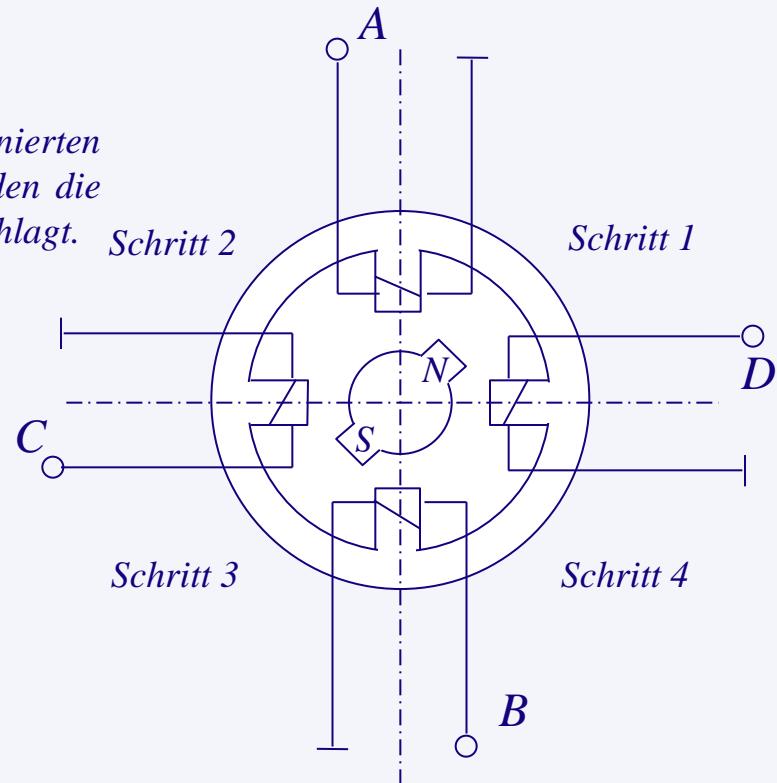
Die Drehung der Motorwelle setzt sich aus genau definierten Winkelschritten zusammen. Zur Drehung der Motorwelle werden die Wicklungen in festgelegter Reihenfolge mit Gleichstrom beaufschlagt.

Winkelansteuerung eines einfachen Schrittmotors

Rotorstellung auf Schritt	Spannung an den Wicklungen			
	A	B	C	D
1	0	+	+	0
2	0	+	0	+
3	+	0	0	+
4	+	0	+	0

Vorteile:

- können ohne Rückmeldung als offene Steuerkette betrieben werden
- es besteht ein fester Zusammenhang zwischen Ansteuerimpulse und dem Drehwinkel
- Drehzahlen bis 3200 min^{-1}



Nachteile:

- Störeinflüsse durch thermische oder elastische Verformung werden nicht erkannt (fehlendes Lagemesssystem)
- Schrittfehler bei zu hohen Lastmomenten
- beschränktes Beschleunigungsvermögen

Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren: Motoren für Nebenantriebe

● Drehstrommotoren (Funktionsprinzip siehe Hauptantriebe)

Digital gesteuerte Asynchron-Servoantriebe bestehen aus einem Versorgungs- und Regelmodul sowie dem Servomotor.

Komponenten eines Antriebssystems (Quelle: Rexroth)

Versorgungssystem



Versorgungsgeräte dienen zur Leistungs- und Steuerspannungsversorgung des kompletten Antriebssystems.

Profil:

- Netzdirektanschluss ohne Transformator an 3 x AC 380 V - 480 V
- hohe Maximalleistung
- umfangreiche Diagnosemöglichkeiten

Regelgerät



Zur Regelung der Antriebe

Profil:

- geregeltes Stillsetzen des Antriebs im Störungsfall
- umfassende Diagnose
- einfacher Datenaustausch im Störungsfall

Asynchronmotor



Profil:

- luft- oder flüssigkeitsgekühlt
- relative Positionserfassung (Singleturmggeber) oder Multiturn-Absolutwertgeber
- Drehzahlstellbereich von 0 min⁻¹ bis ca. 6000 min⁻¹

- hohes Drehmoment über den gesamten Stellbereich
- gute Dynamik durch hohe Verdrehsteifigkeit und günstiges Drehmomenten-Trägheitsmomenten-Verhältnis
- Überlastbarkeit besonders in den Beschleunigungsphasen (bedingt durch gute Wärmeabstrahlung)

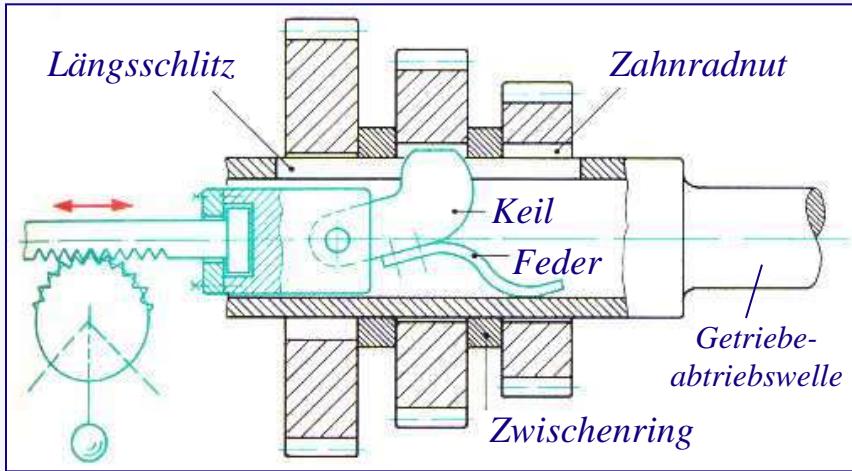
Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren

Anpassungsgetriebe

- Zahnradgetriebe mit konstanter Übersetzung oder als gestuftes Schaltgetriebe
- Zahnriemengetriebe für konstante Übersetzung
 - kostengünstig
 - Überwindung großer Achsabstände
 - gute Dämpfung
 - Kontrolle der Zahnriemenspannung
- Sondergetriebe (z.B. Wechselräder-, Mäander-, Norton- und Ziehkeilgetriebe)
 - Einsatz nur noch dort, wo sie gegenüber stufenlosstellaren Lösungen die Anforderungen kostengünstiger erfüllen
 - geringerer Wirkungsgrad
- Planetengetriebe zur Erzeugung einer konstanten Übersetzung

Umwandlungsgetriebe → siehe Hauptantriebe zur Erzeugung translatorischer Bewegungen

Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren: Anpassungsgetriebe (Beispiele)



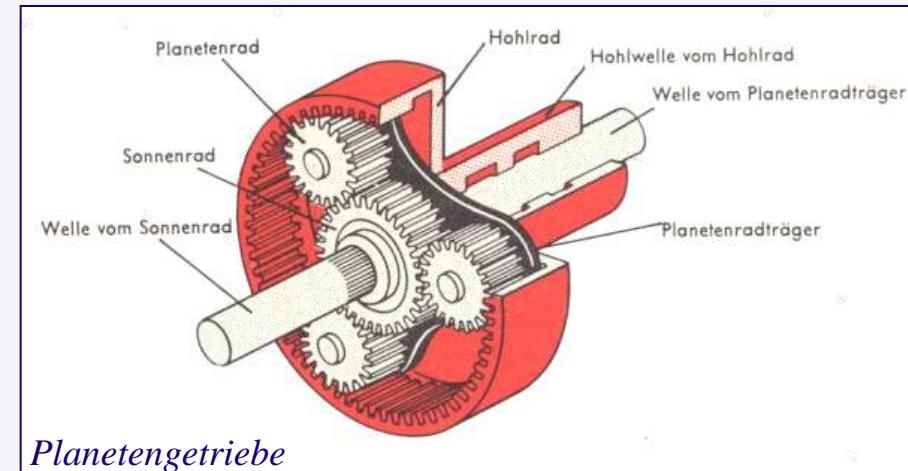
Ziehkeilgetriebe (Quelle: Witte, WZM)

Funktionsprinzip: Ziehkeilgetriebe

Mit diesem Ziehkeilgetriebe können drei verschiedene Übersetzungsverhältnisse über einen Ziehkeil gewählt werden. Auf der Antriebswelle sind drei Zahnräder mit dieser fest verbunden. Auf der Abtriebsseite laufen die Zahnräder auf der Welle lose. Die Getriebeabtriebswelle ist als Hohlwelle ausgebildet. In der Hohlwelle befindet sich ein Ziehkeil, der beim Schalten der einzelnen Gänge in axialer Richtung bewegt werden kann.

Funktionsprinzip: Planetengetriebe

Wird zum Beispiel das **Hohlrad** festgehalten, und die Kraft kommt von der Welle des Sonnenrades, so werden die Planetenräder zwischen Sonnenrad und Hohlrad abgewälzt. Die Planetenräder sind am Planetenradträger gelagert. Beim abrollen der Planetenräder beschreibt die Lagerstelle jedes Planetenrades eine kreisförmige Bahn. Dadurch wird der Planetenträger in Drehbewegung versetzt. Die **Drehzahl** der Planetenträgerwelle ist nun im Vergleich zur Welle des Sonnenrades verringert. Das **Drehmoment** ist hingegen gestiegen.



Planetengetriebe

Werkzeuge und Schneidstoffe

Zerspanwerkzeug

An jedem Zerspanwerkzeug können folgende drei Teile unterschieden werden:



Einstechdrehmeißel (Quelle: Dümmel GmbH)

Einspannteil (Schaft),
dient zur Verbindung
des Werkzeugs mit
dem Werkzeugträger.

3.

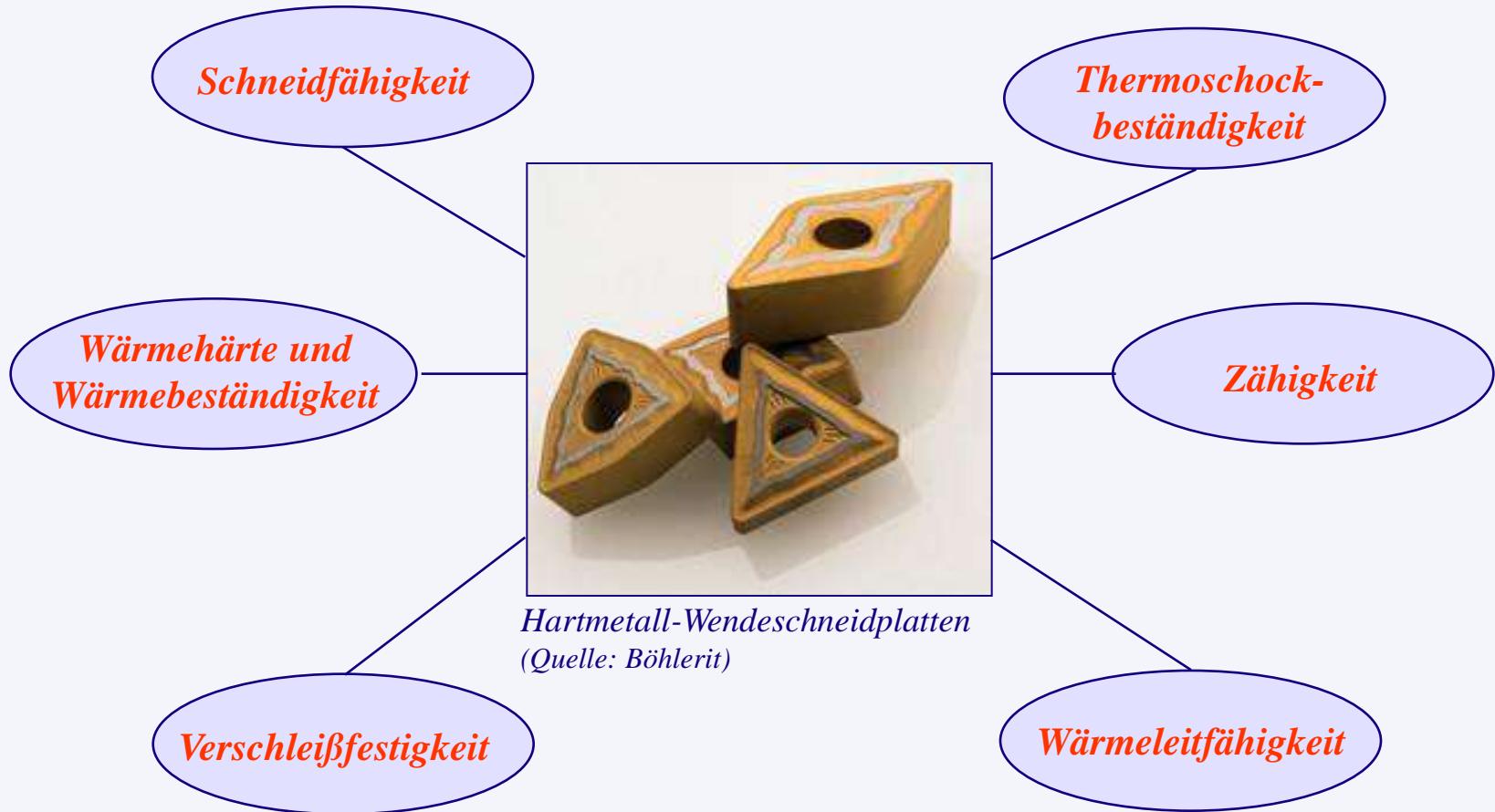
Werkzeugkörper,
verbinden Einspannteil mit
dem Schneidenteil und besitzt
die Befestigungselemente für
die Schneiden.

1.

Schneidenteil,
führt das Zerspanen des
Werkstoffs durch.

Das Schneidenteil, welches für die Zerspanung des Werkstoffs verantwortlich ist, wird durch die dabei entstehende hohe Temperatur, Reibung und Zerspankraft stark belastet. An den Schneidstoff sind daher besondere Anforderungen gestellt.

Anforderungen an Schneidstoffe



Grundbegriffe der Zerspanetechnik

→ Für die weitere Behandlung des Stoffes ist es erforderlich, die Grundbegriffe der Zerspanetechnik kennenzulernen.

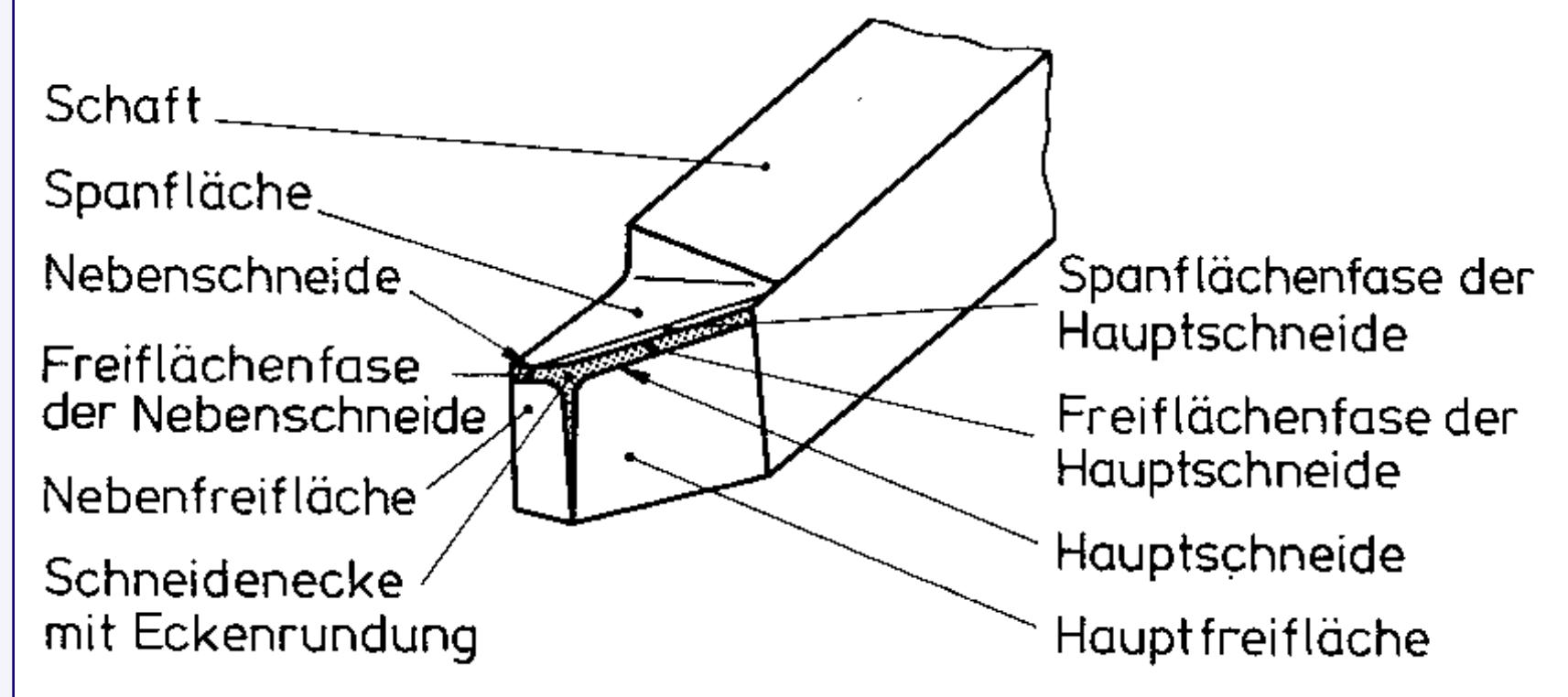
So ist z.B. die Kenntnis über auftretende Zerspanungskräfte und deren Größe wichtig für

- die Bemessung der Bauteile der Werkzeugmaschine,
- die Bemessung von Vorrichtungs- und Werkzeugkonstruktionen,
- die richtige leistungsmässige Verteilung der Arbeitsaufgaben auf vorhandene Werkzeugmaschinen durch die Arbeitsvorbereitung,
- die Wahl des richtigen Werkzeugs hinsichtlich einer optimalen Standzeit.

Die Grundbegriffe der Zerspanetechnik werden am Beispiel eines Drehvorganges vorgestellt!

Grundbegriffe der Zerspantechnik: Drehmeißel (Beispiel)

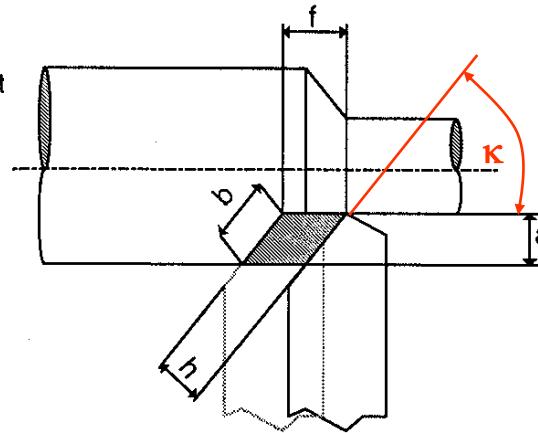
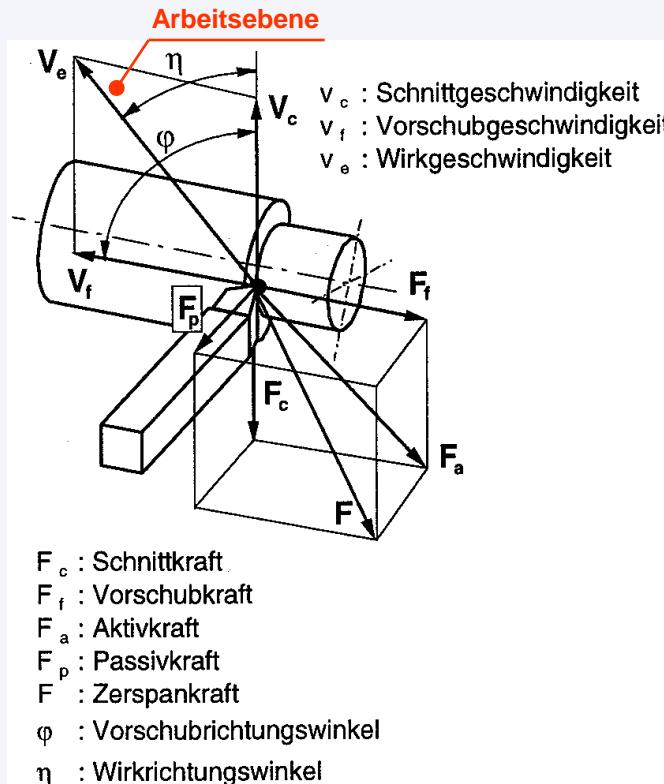
nach DIN 6581:



Quelle: Fritz /Schulze: Fertigungstechnik, VDI-Verlag

Grundbegriffe der Zerspantechnik: Drehvorgang (Beispiel)

- Werkzeug und Werkstück bilden ein Wirkpaar
- Die zu erzeugende Werkstückform ergibt sich durch die Geometrie des Werkzeugs oder die Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug
- **Vorschub:** Ortsveränderung der Schneide bzw. des Werkzeugs in Richtung der Vorschubbewegung je Umdrehung, gemessen in der Arbeitsebene
- Vorschub und Eingriffsgrößen sind Maschineneinstellgrößen



- F_c : Schnittkraft
 a : Schnitttiefe
 b : Spanungsbreite
 f : Vorschub
 h : Spanungsdicke
 k_c : auf den Querschnitt $b * h$ bezogene spezifische Schnittkraft
 $k_{c1,1}$: Auf den Spanungsquerschnitt $b * h = 1\text{mm} * 1\text{mm}$ bezogene spezifische Schnittkraft
 m_c : Spanungsdickenexponent (aus Tabelle)
 κ : Einstellwinkel

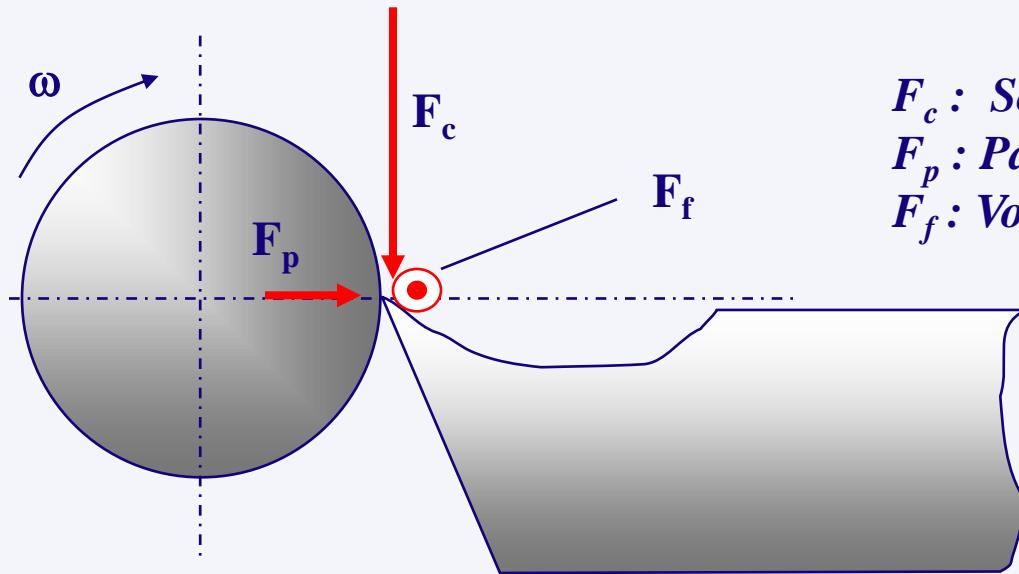
$$F_c = b * h * k_c = a * f * k_c$$

$$b = \frac{a}{\sin \kappa}$$

$$h = f * \sin \kappa$$

$$k_c = \frac{k_{c1,1}}{h^{m_c}} \quad (\text{in N/mm}^2)$$

Grundbegriffe der Zerspanetechnik: Kräfte am Drehmeißel



F_c : Schnittkraft
 F_p : Passivkraft
 F_f : Vorschubkraft

Aktivkraft F_a :
 $\vec{F}_a = \vec{F}_c + \vec{F}_f$

Die Schnittkraft F_c ist die leistungsführende Kraft

Einflußgrößen der Schnittkraft F_c :

- Werkstoff des Werkstücks
 - Vorschub (Spanungsdicke)
 - Schnitttiefe (Spanungsbreite)
- Haupteinflußfaktoren

- Spanungsverhältnis a/f
- Spanwinkel
- Werkzeugverschleiß
- Schnittgeschwindigkeit
- Schneidstoff
- Kühlung / Schmierung
- Einstellwinkel

Grundbegriffe der Zerspantechnik: Schnittkraftgesetz von Kienzle

- empirisch ermitteltes Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Schnittkraft:

$$F_c = k_c * A$$

A: Spanungsquerschnitt

k_c : spezifische Schnittkraft [N/mm²]

$$F_c = k_c * a_p * f = k_c * b * h$$

k_c ist werkstoffabhängig und hauptsächlich abhängig von der Spanungsdicke h:

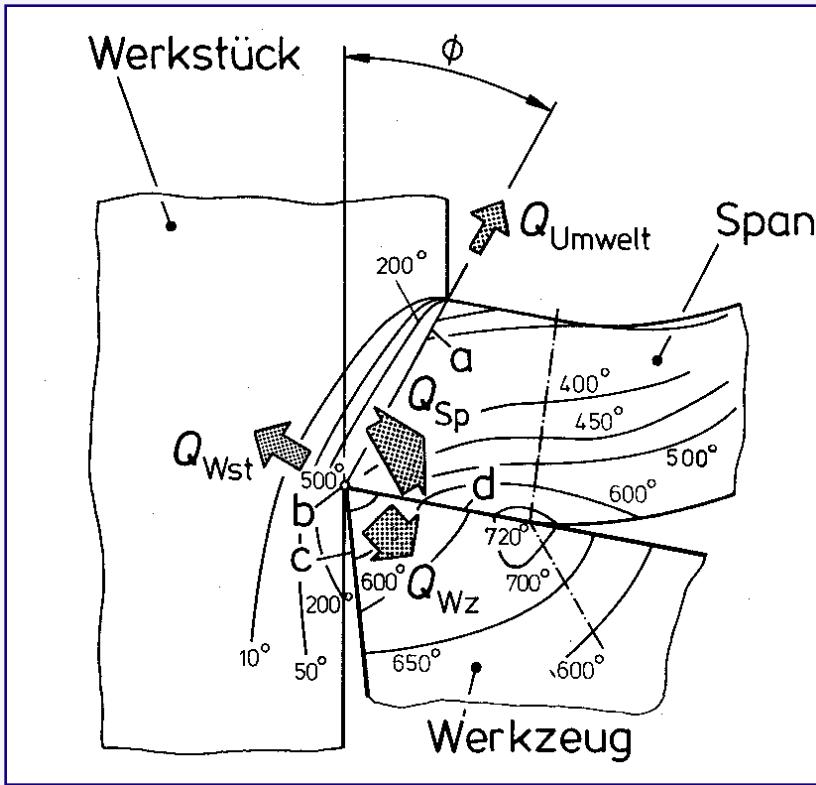
$$k_c = k_{c1.1} * h^{-m}$$

m: werkstoffabhängig

**$k_{c1.1}$: spezifische Schnittkraft
bezogen auf einen Querschnitt
mit $b = 1$ mm und $h = 1$ mm**

einsetzen: $F_c = b * h * k_{c1.1} * h^{-m} = b * h^{(1-m)} * k_{c1.1}$

Grundbegriffe der Zerspantechnik: Spanbildung



Bei der Spanbildung wird der Werkstoff vor der Spanfläche gestaucht, getrennt und fließt dann als Span ab. Dabei muß die Zerspankraft zwei Aufgaben erfüllen:

- Überwinden des Scherwiderstandes des Werkstoffs entsprechend der Scherfestigkeit τ_B
- Überwindung verschiedener Reibungswiderstände, die bei den Verformungen im Werkstoff selbst sowie zwischen Werkstoff und Schneidenflächen entstehen. Die Reibung tritt an folgenden Stellen auf:
 - in der Scherebene beim Scheren
 - auf der Spanfläche beim Ablaufen des Spans
 - auf der Werkstückschnittfläche beim Entlanggleiten an der Freifläche

Quelle: Fritz / Schulze: Fertigungstechnik, VDI-Verlag

Grundbegriffe der Zerspantechnik: Drehmoment und Leistung

spezifische Schnittkraft: $k_c = F_c/A$

Drehmoment: $M_d = F_c * r$

Leistung an der Wirkstelle: $P_c = M_d * \omega$
(Schnittleistung) $= F_c * V_c$
 $= k_c * A * V_c$
 $= k_c * a * f * V_c$

Maschinenleistung $P_a = P_c / \eta$

(η = Wirkungsgrad der Maschine $\sim 0,6$ - die Vorschubleistung ist in der Wirkungsgradangabe enthalten)

Schneidstoffe

Werkzeugstahl WS

- *Unlegierte WS*
Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit 0,6 ... 1,3% C
- *Niedriglegierte WS*
durch Zusatz von Chrom, Wolfram, Molybdän, Vanadium erhöhte Verschleißfestigkeit

Anwendung:

Wegen der geringen Wärmehärte von etwa 250 ... 300 °C wird dieser Schneidstoff für das Zerspanen von Metall nicht mehr verwendet. Werkzeugstähle werden im Bereich der Werkzeuge zum Zerteilen und Umformen (Schneid- und Stanzwerkzeuge) eingesetzt.

Schneidstoffe

Schnellarbeitsstahl SS

Hauptlegierungselemente:

- *Wolfram, Molybdän, Vanadium, Kobalt und Chrom*

Diese Elemente, ausgenommen Kobalt, bilden mit Kohlenstoff sehr harte Karbide, die im Grundgefüge feinverteilt ein hartes verschleißfestes Gerippe bilden.

Eigenschaften:

- *Wärmehärte bis 600 °C (beeinflußt durch Kobalt-Gehalt)*
- *Schnittgeschwindigkeiten zwischen 50 – 70 m/min (bei Drehbearbeitung von Stahl)*

Man unterscheidet Schnellarbeitsstähle mit kleinerem Kobaltgehalt ($Co < 4,5 \%$) als HSS und solche mit größerem Kobaltgehalt ($Co > 4,5 \%$) als HSS-E-Stähle. Heute werden ausschließlich HSS-E-Sorten benutzt.

Anwendung:

- *Dreh- und Hobelmeißel*
- *Räumwerkzeuge*
- *Spiral- und Gewindebohrer*
- *Fräser*
- *Reibahlen*

Schneidstoffe

Hartmetall HM

Hartmetalle sind eisenfreie harte und verschleißfeste Sinterwerkstoffe.

Wesentliche Bestandteile der Hartmetalle:

- *Wolframkarbid: erhöht Abrieb- und Kantenfestigkeit. Bei höheren Anteilen steigt die Diffusionsneigung.*
- *Titankarbid: Geringe Diffusionsneigung, dadurch hohe Warmfestigkeit. Abrieb- und Kantenfestigkeit sowie Zähigkeit sinken bei höheren Anteilen von Titankarbid.*
- *Tantalkarbid: kornverfeinernd, verbessert Kantenfestigkeit und Zähigkeit*
- *Kobalt: beeinflußt Zähigkeit*

Eigenschaften:

Schneidfähigkeit, Wärmehärte und Anlaßbeständigkeit sind bedeutend besser als die von Schnellarbeitsstahl. Die Zähigkeit von Hartmetall ist jedoch geringer.

- *Wärmehärte bis 1000 °C*
- *Schnittgeschwindigkeiten bis ca. 300 m/min (bei Dreh- und Fräsbearbeitung von Stahl)*

Schneidstoffe: Hartmetalle

Hartmetalle werden nach DIN 4990 in drei Zerspanungshauptgruppen

- **P** : hohe Warmfestigkeit
Anwendung: für langspanende Werkstoffe
- **M** : gute Warmfestigkeit und Abriebfestigkeit
Anwendung: rost-, säure- und hitzebeständige Stähle sowie Grauguss
- **K** : geringere Warmfestigkeit, hohe Abriebfestigkeit
Anwendung: für kurzspanende Werkstoffe, Nichtmetalle
eingeteilt.

Hartmetall, beschichtet:

- Beschichtungsverfahren: **Chemical Vapor Deposition** = Chemische Abscheidung aus der Gasphase
- Dicke der aufgebrachten Hartstoffschicht: 3 ... 15 μm
- Hartstoffschicht: z.B. **Titankarbid, Titankarbonnitrid, Titanaluminiumnitrid, Aluminiumoxid, Mehrlagenbeschichtungen**

Die Beschichtung ergibt höhere chemische Beständigkeit und höheren Abriebwiderstand. Die Kombination eines relativ zähen Hartmetallkernes mit extrem abriebfester Beschichtung führt zu größeren Anwendungsbereichen.

Schneidstoffe

Cermets

- *Kunstwort aus Ceramic + Metals*
- *gehören ihrem Aufbau nach zu den Hartmetallen*
- *bestehen aus Hartstoffen (z.B. Titankarbid und Titanitrid), die in einem Bindemittel, vorzugsweise Nickel, eingebettet sind.*
- *Eigenschaften: große Härte, hohe Warmverschleißfestigkeit, geringe Diffusions- und Adhäsionsneigung, hohe Oxidationsbeständigkeit, hohe Kantenfestigkeit, geringe Klebneigung, geringe Biegebruchfestigkeit*
- *Anwendung: vorwiegend die Schlichtbearbeitung beim Drehen mit Schnittgeschwindigkeiten bis 500 m/min*

Cermets gibt es inzwischen auch beschichtet. Die sehr dünne Beschichtung verbessert die Verschleißeigenschaften und erlaubt größere Schnittgeschwindigkeiten.

Schneidstoffe

Keramik

Alle Schneidkeramiken sind härter als Hartmetalle und behalten diese Eigenschaft auch bei Temperaturen über 1000 °C bei. Es können dabei Schnittgeschwindigkeiten von bis zu 1100 m/min erreicht werden (Drehen von Stahl). Die Zähigkeit ist jedoch schlecht, so daß nur durch spezielle Anschnittechniken Schneidenausbrüche vermieden werden können.

Schneidkeramik wird nach DIN ISO 513 in vier Gruppen mit folgenden Kennbuchstaben unterteilt:

- CA = überwiegend aus Aluminiumoxid bestehende Oxidkeramik,
- CN = überwiegend aus Siliziumnitrid bestehende Nitridkeramik,
- CM = Mischkeramik auf Aluminiumoxidbasis mit anderen Bestandteilen,
- CC = beschichtete Schneidkeramik der ersten drei Sorten.

Eigenschaften keramischer Schneidstoffe:

- Druckfestigkeit
- hohe chemische Beständigkeit
- hohe Schmelztemperatur
- geringe Dichte bei hoher Härte und Druckfestigkeit
- geringe Diffusionsneigung
- hohe Oxidationsbeständigkeit
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- geringe Biegebruchfestigkeit
- höherer Wärmeausdehnungskoeffizient (Thermoschockempfindlichkeit)

Schneidstoffe: Keramik

Oxidkeramik

- *Eigenschaften: hohe Wärmehärte, hohe chemische Beständigkeit, hervorragendes Verschleißverhalten, empfindlich gegen Biege-, Zug-, Schlag- und thermische Schockbeanspruchung*
- *Anwendung: bedingt durch Sprödigkeit und Thermoschockempfindlichkeit, kann Oxidkeramik nur bei gleichmäßigen Schnittbedingungen ohne Kühlung eingesetzt werden. Das Anwendungsgebiet ist vor allem das Zerspanen von Grauguß mit einer Schnittgeschwindigkeit von bis zu 1000 m/min.*

Mischkeramik

Enthält neben der Basiskomponente Aluminiumoxid Al_2O_3 noch 5 bis 40 % nichtoxidische Bestandteile großer Härte wie z.B. TiC, TiN oder WC

- *Eigenschaften: verbesserte Zähigkeitseigenschaften, hohe Kanten- und Verschleißfestigkeit, höhere Härte und bessere Thermoschockeigenschaften als Oxidkeramik*
- *Anwendung: neben Grauguß kann auch gehärteter Stahl bis 65 HRC und Hartguß bearbeitet werden. Mischkeramik ist auch für die Feinbearbeitung einsetzbar.*

Schneidstoffe: Keramik

Nitridkeramik (Nichtoxidkeramik)

- besteht hauptsächlich aus Siliziumnitrid Si_3N_4
- Eigenschaften im Vergleich zu Oxid- und Mischkeramik:
 - bessere Thermoschockbeständigkeit
 - höhere Biegebruchfestigkeit
 - höhere Zähigkeit
 - hohe Wärmehärte
 - hohe Sicherheit gegen Schneidenbruch
- Anwendung: verträgt große Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe und eignet sich besonders für die grobe Bearbeitung von Grauguss durch Drehen und Fräsen.

Schneidstoffe

Diamant und kubisches Bornitrid (CBN)

Diamant:

- *Eigenschaften:*
 - höchste Härte
 - Verschleißfestigkeit
 - beste Oberflächengüte
 - bis 900 °C thermisch beständig
 - geringe Biegebruchfestigkeit

Zum Zerspanen von normalem Stahl ist Diamant ungeeignet, da er bei den entstehenden Schnittemperaturen dazu neigt, durch Diffusion Kohlenstoffatome an das Eisen abzugeben und dabei stark verschleißt.

Zum Einsatz kommt monokristalliner Naturdiamant für die Feinbearbeitung und polykristalliner Diamant für die Fein- und Schrubbearbeitung.

- *monokristalliner Naturdiamant*
 - *Anwendung: Zerspanung von Nichteisenmetalle wie Aluminium-, Kupfer und Zinklegierungen und Nichtmetalle wie faserverstärkte Kunststoffe, Hartgummi, Keramik und Holzfaserprodukte. (Feinbearbeitung)*

Schneidstoffe: Diamant und Bornitrid

- *polykristalliner synthetischer Diamant (PKD)*

Durch polykristallines Versintern von Diamantpulver zu festen Schneidplatten, entsteht ein Schneidstoff, der die Vorzüge des Naturdiamanten, große Härte und Standzeit, in nichts nachsteht.

Die Diamantschichtdicke beträgt ca. 0,5 mm und wird bei 1700 K und einem Druck von 7 GPa entweder direkt auf eine vorgesinterte Hartmetallunterlage aufgebracht oder über eine dünne Zwischenschicht, die Spannungen zwischen der Diamantschicht und Hartmetallunterlage ausgleicht.

- Anwendung: neben den gleichen Anwendungsbereichen wie die des Naturdiamanten, wurden gute Erfahrungen bei der Zerspanung von siliziumhaltigen Aluminiumlegierung in der Automobilindustrie gemacht.(Fein- und Schruppbearbeitung)

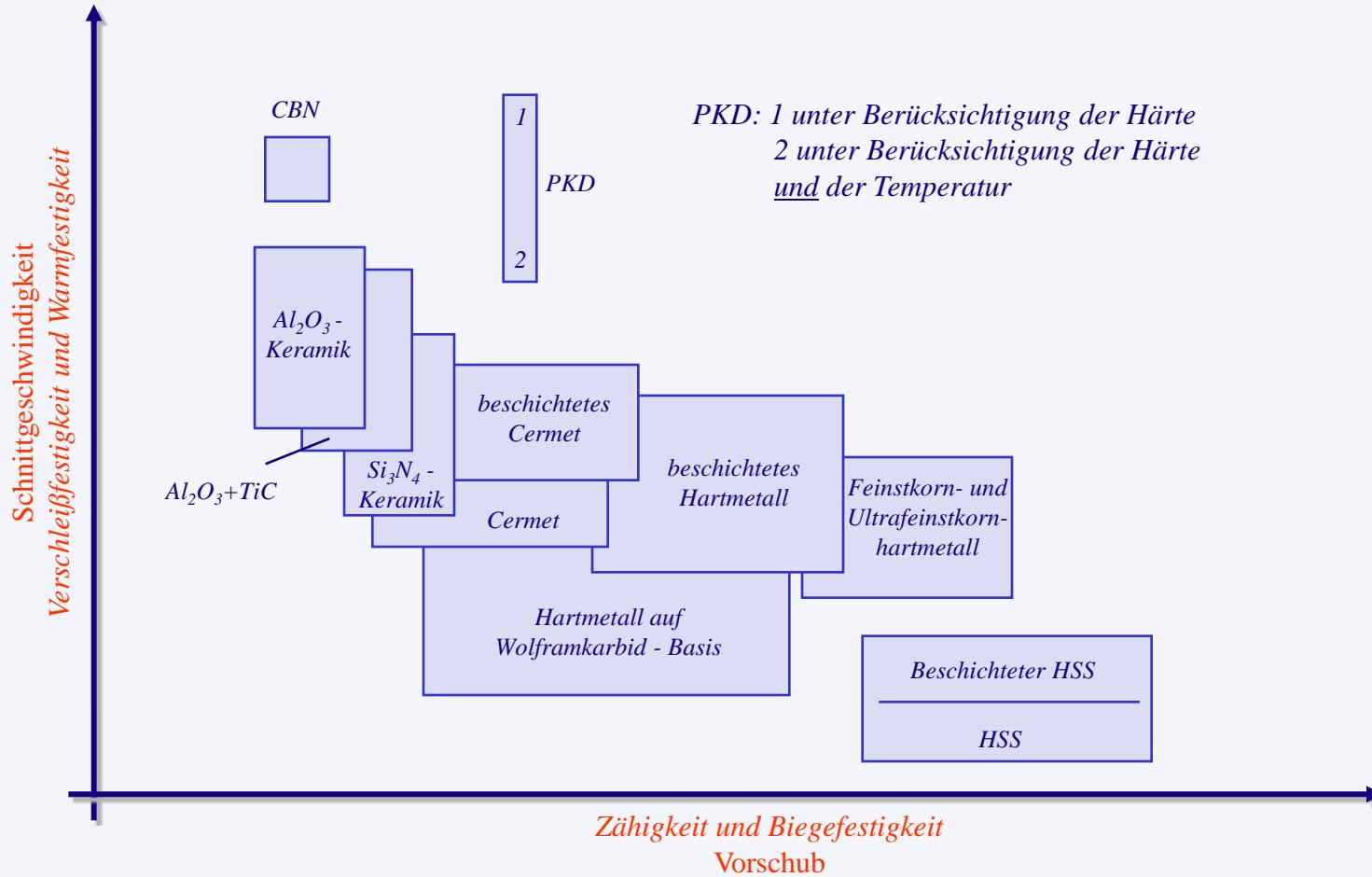
- *kubisch-kristallines Bornitrid (CBN)*

- polykristalliner Sinterwerkstoff mit einer Härte, die zwischen der von Keramik und Diamant liegt

- im Vergleich zu Diamant: bessere Zähigkeit, höhere thermische Belastung, höhere Oxidationsbeständigkeit

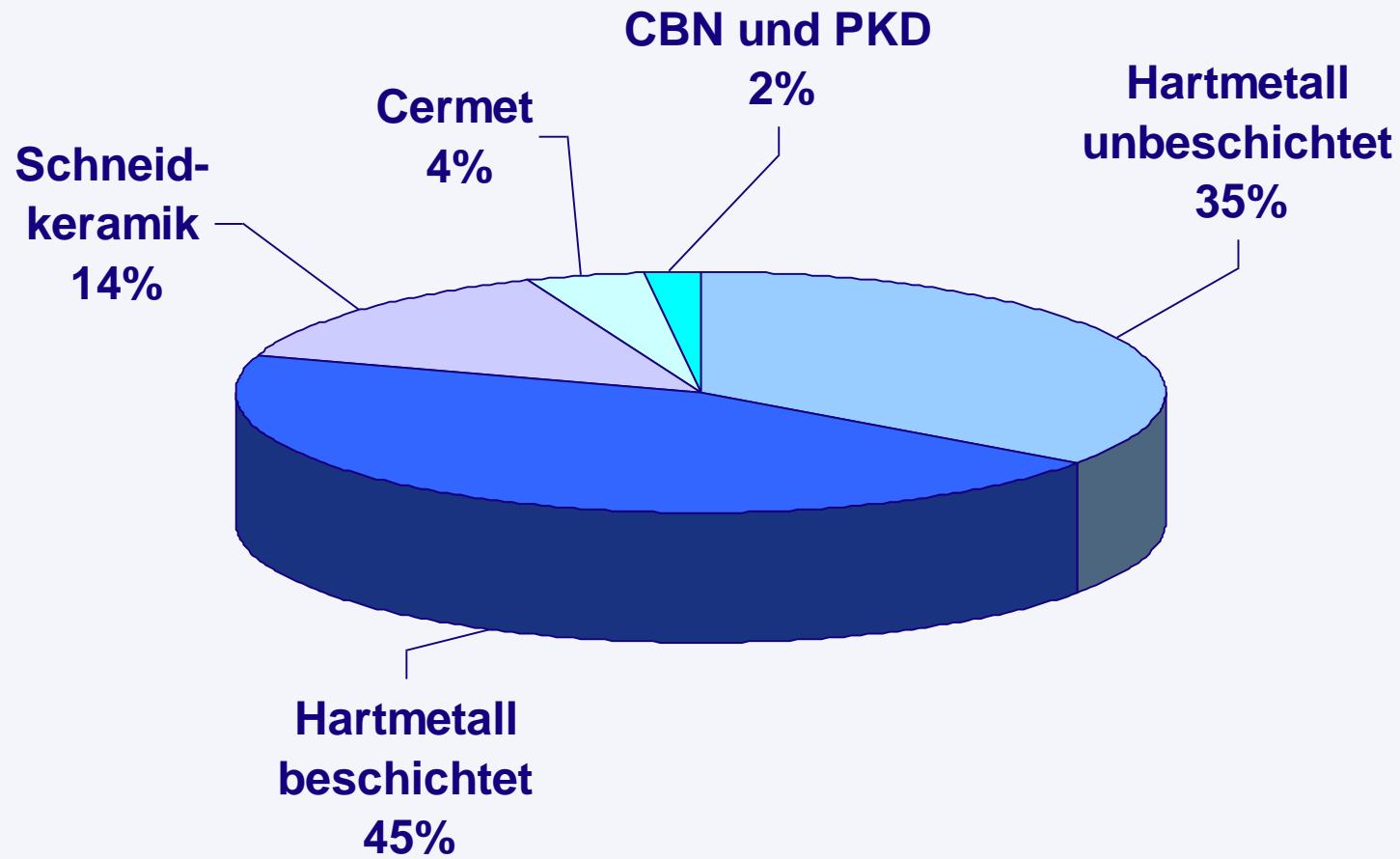
- Anwendung: CBN eignet sich vor allem bei der Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffen (z.B. gehärtete Stähle, Hartguß). Bei der Zerpspanung von gehärtetem Stahl werden Schnittgeschwindigkeiten von 120 m/min, bei Grauguß bis 800 m/min erreicht.

Einteilung der Schneidstoffe



Quelle: König

Verwendung von Schneidstoffen bei einem Automobilhersteller



Quelle: Koether, Fertigungstechnik

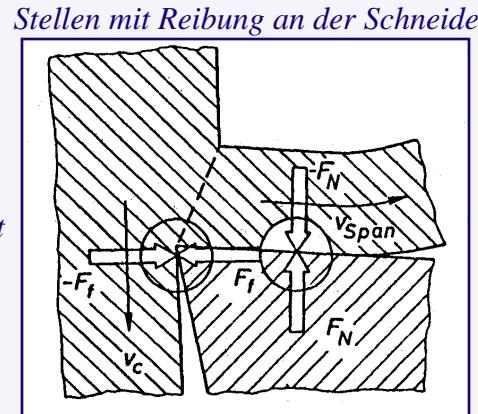
Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels

Reibungsverschleiß

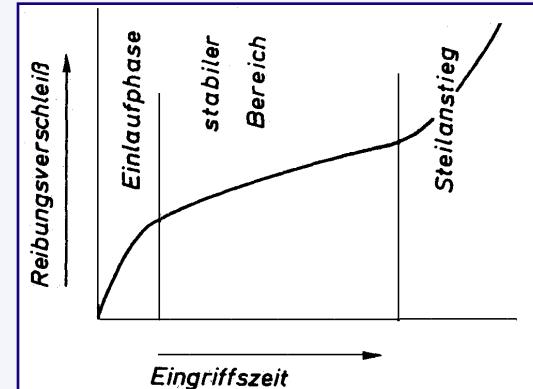
Reibungsverschleiß ist die Folge der Berührung unter Druck und gleitender Bewegung.

- Die ungünstige Berührung entsteht an zwei Stellen:
 1. auf der Spanfläche, wo der Span unter der Normalkraft F_N abläuft
 2. an den Freiflächen unterhalb der Schneidkante, hier wirken Vorschubkraft F_f , Passivkraft F_p und Werkstückgeschwindigkeit v_c zusammen
- Verschleißfördernd wirkt die erhöhte Temperatur im Bereich der Zerspanungszone, die den Verschleißwiderstand des Schneidstoffs herabsetzt.

F_f Vorschubkraft
 F_N Normalkraft
 v_c Schnittgeschwindigkeit
 v_{Span} Spangeschwindigkeit



Zunahme des Reibungsverschleißes mit der Zeitdauer des Eingriffs

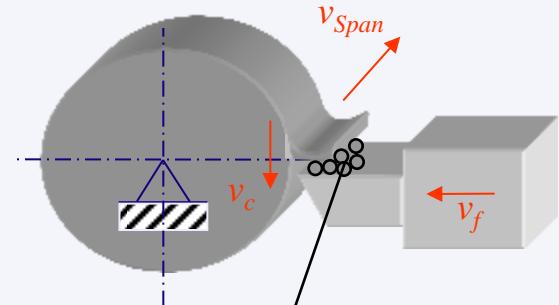


Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels

→ Aufbauschneidenbildung

- Bildungsmechanismus:

- durch Einwirken von Druck und Temperatur im Erweichungsbereich des Werkstoffs lagern sich Werkstoffteilchen fest auf der Spanfläche ab
- der abfließende Span reißt die Aufschweißungen auf der Spanfläche wieder ab
- dabei werden Teile des Schneidstoffs mitgerissen
- periodischer Ablauf dieses Vorganges



Aufbauschneidenbildung an einem Drehmeißel

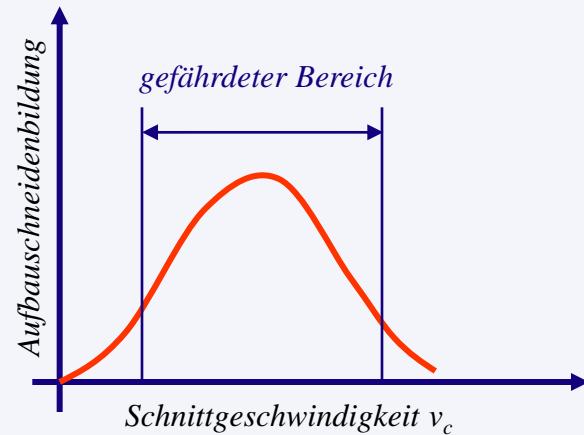
Die verschlissene Schneidenoberfläche ist rauh aber ohne Riefen!

- Bestimmte Werkstoffpaarungen begünstigen die Aufbauschneidenbildung, andere wiederum nicht.
 - Drehen von Stahl mit Schnellarbeitsstahl – große Aufbauschneidenbildung
 - Drehen Stahl mit Hartmetall – geringere Aufbauschneidenbildung
 - Drehen von Stahl mit Keramik – keine Aufbauschneidenbildung

Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels: Aufbauschneidenbildung

- Neben der Werkstoffpaarung spielt auch die Schnittgeschwindigkeit und die dabei erzielte Temperatur eine wesentliche Rolle.
 - bei kleinen Schnittgeschwindigkeiten ist die Temperatur noch so niedrig, dass der Werkstoff nicht erweicht.
 - bei hohen Schnittgeschwindigkeiten ist die Temperatur so hoch, dass der aufgeschweißte Werkstoff infolge seiner geringen Festigkeit leicht vom Span mitgenommen werden kann, ohne den Schneidstoff anzugreifen.

Nur in einem abgegrenzten Schnittgeschwindigkeitsbereich zwischen kleiner und hoher Schnittgeschwindigkeit besteht die Gefahr der Aufbauschneidenbildung.



Quelle: Pauksch, Zerspanetechnik

Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels

Diffusionsverschleiß

Bei hohen Temperaturen können Atome bestimmter Elemente ihre festen Gitterplätze im Werkstoff oder Schneidstoff verlassen. Sie beginnen zu wandern.

Bei Schnellarbeitsstahl ist der Verschleiß durch Diffusion uninteressant, da die Erweichung des Schneidstoffs dem viel früher eine Grenze setzt

Bei Hartmetallen sind drei Diffusionsarten zu beobachten:

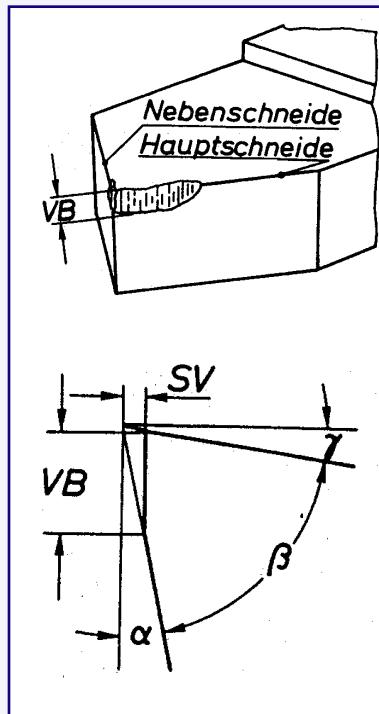
- Kobalt-Diffusion: Kobalt wandert aus der Schneidenoberfläche in den Stahl, dadurch werden die Karbide im Hartmetall freigelegt und der Reibung des Spanes ausgesetzt.
- Bei kleineren Spangeschwindigkeiten kann der Werkstoff Stahl derart auf die Karbide einwirken, dass diese sich auflösen und vom Span mitgerissen werden.
- Bearbeitung von Gußeisen mit hoher Schnittgeschwindigkeit, bewirkt eine Eisen-Kohlenstoffdiffusion vom Werkstoff in das Hartmetall. Dadurch werden Karbide aufgelöst.

Der Diffusionsverschleiß an Hartmetallen ist an der Auskohlung der Spanfläche zu erkennen. Ferner ist die Zersetzung von Diamantschneiden bei der Bearbeitung von Eisenwerkstoffen ebenfalls auf Diffusionsvorgänge zurückzuführen.

Verschleißformen am Beispiel eines Drehmeißels

→ Freiflächenverschleiß

Der Freiflächenverschleiß wird hauptsächlich durch Reibung an der Kante der Haupt- und Nebenschneide verursacht.



VB: Verschleißmarkenbreite
SV: Schneidkantenversatz

Die entstandene sichtbare Marke des Verschleißes kann mit einer Meßlupe an der Werkzeugschneide ausgemessen werden und mit einer Tabelle für zulässige Richtwerte VB verglichen werden.

Der Schneidenversatz ist der Betrag, um den ein Werkzeug nachgestellt werden muß, wenn es mit Verschleiß das gleiche Maß erreichen soll wie vorher mit unbenutzter Schneide.

$$SV = \frac{VB \cdot \tan \alpha}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \gamma}$$

Richtwerte für Verschleißmarkenbreite VB

Bearbeitungsweise	Zulässige Verschleißmarkenbreite VB [mm]
Schruppdrehen großer Werkstücke	1,0 – 1,5
Schruppdrehen kleiner Werkstücke	0,8 – 1,0
Übliches Kopierdrehen	0,8
Feinbearbeitung	0,1 – 0,2
Schlichtdrehen	0,1 – 0,2

Verschleißformen am Beispiel eines Drehmeißels

→ Kolkverschleiß

Als Kolkverschleiß bezeichnet man den muldenförmigen Abtrag von Schneidstoff an der Spanfläche. Es bildet sich der s.g. „KOLK“.

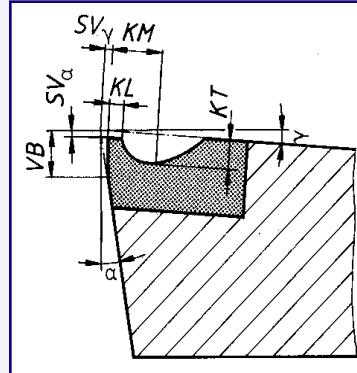
Ursache für den Kolkverschleiß ist das Zusammenwirken von Reibung und Diffusion. Er verändert wie eine Änderung des Spanwinkels γ die Spanablaufrichtung und somit den Scherwinkel Φ .

Zur Beurteilung der Verschleißgröße wird das Kolkverhältnis gebildet:

$$K = \frac{KT}{KM} \leq 0,4$$

Die Schneidkante kann plötzlich ausbrechen und dies führt zum abrupten, endgültigen Standzeitende des Werkzeugs.

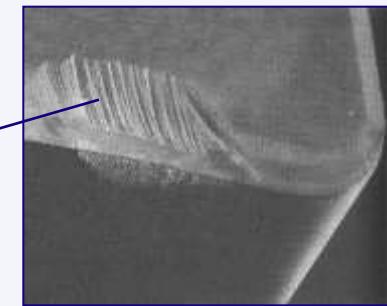
Verschleißgrößen am Schneidteil eines Drehmeißels



γ Spanwinkel
 α Freiwinkel
 SV_a Schneidenversatz, in Richtung der Freifläche gemessen
 SV_γ Schneidenversatz, in Richtung der Spanfläche gemessen
 VB Verschleißmarkenbreite an der Freifläche
 KM Kolkmittenabstand
 KT Kolktiefe
 KL Kolklippenbreite

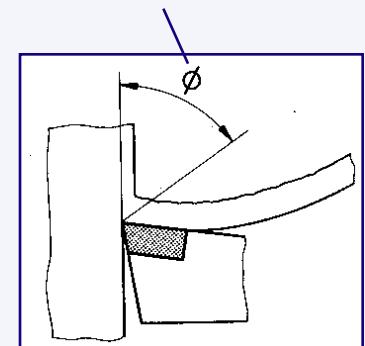
Quelle: Fritz / Schulze:
Fertigungstechnik, VDI-Verlag

REM-Aufnahme einer Wendeschneidplatte



Quelle: Warnecke / Westkämper:
Einf. in die Fertigungst., Teubner-Verlag

Scherwinkel Φ

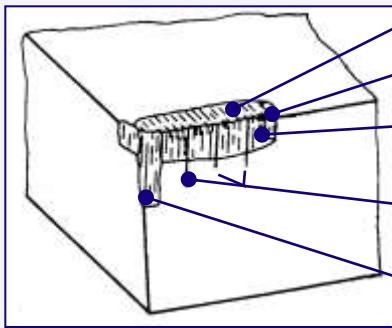


Quelle: Fritz / Schulze:
Fertigungstechnik, VDI-Verlag

Verschleißformen am Beispiel eines Drehmeißels

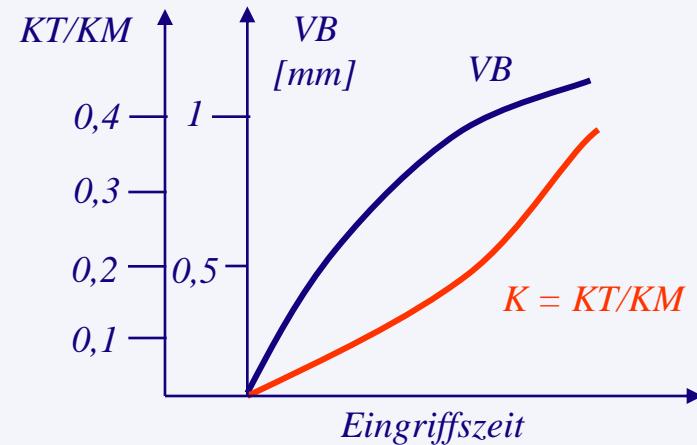
→ weitere Verschleißformen

Verschiedene Verschleißformen
an einer Drehmeißelschneide



Spanflächenverschleiß
Kantenabrundung
Freiflächenverschleiß
Kammrisse
Eckenverschleiß

Verlauf von Kolkverhältnis und
Verschleißmarkenbreite beim Drehen
von unlegiertem Stahl mit Hartmetall



- Spanflächenverschleiß: beginnt an der Schneidekante und erzeugt eine ähnliche Verschleißmarke wie der Freiflächenverschleiß
- Kantenabrundung: wenn bei langsam arbeitenden Schneiden Spanflächen- und Freiflächenverschleiß gleichzeitig einsetzen
- Eckenverschleiß: Freiflächenverschleiß von Haupt- und Nebenschneide überlagern und verstärken sich
- Kammrisse: sind beim Drehen seltener zu beobachten – es handelt es sich um Thermospannungsrisse, Zahl und Länge sind auch ein Standzeitkriterium

Ausblicke

Entwicklungstrends

Ziele

Qualität erhöhen

**Fertigungssystem
Werkzeugmaschine**

Mengenleistung
erhöhen

Fertigungskosten
senken

Wege

Flexibilität erhöhen

Geschwindigkeiten
erhöhen

Genauigkeiten
erhöhen

Werkstoffspektrum erweitern

Ressourcenverbrauch
minimieren

Flexible Fertigungssysteme

High Speed Cutting
(HSC)

Ultra- und Hoch-
präzisionsbearbeitung

Hartbearbeitung

Trockenbearbeitung,
Mikrobearbeitung

Flexibilität erhöhen: Flexible Fertigungssysteme (FFS)

Was ist ein Flexibles Fertigungssystem?

Ein flexibles Fertigungssystem besteht aus mehreren flexiblen Fertigungszellen (Bearbeitungszentren mit Werkstückwechselsystemen und Werkstückspeichern), die über ein gemeinsames Steuerungs- und Transportsystem miteinander verbunden sind.

Das flexible Fertigungssystem lässt sich in drei Komponenten untergliedern:

- Bearbeitungssystem: beinhaltet Werkzeugmaschinen, Werkzeugspeicher und -wechsler, Spannmittel, Meß- und Prüfeinrichtungen und die numerische Steuerung
- Materialflußsystem: beinhaltet die Werkstückver- und entsorgung sowie den Werkzeugwechsel
- Informationsflußsystem: beinhaltet Steuerungs- und Überwachungsfunktionen (Prozeßüberwachung, Überwachung maschineller Einrichtungen)

Ziel eines flexiblen Fertigungssystems?

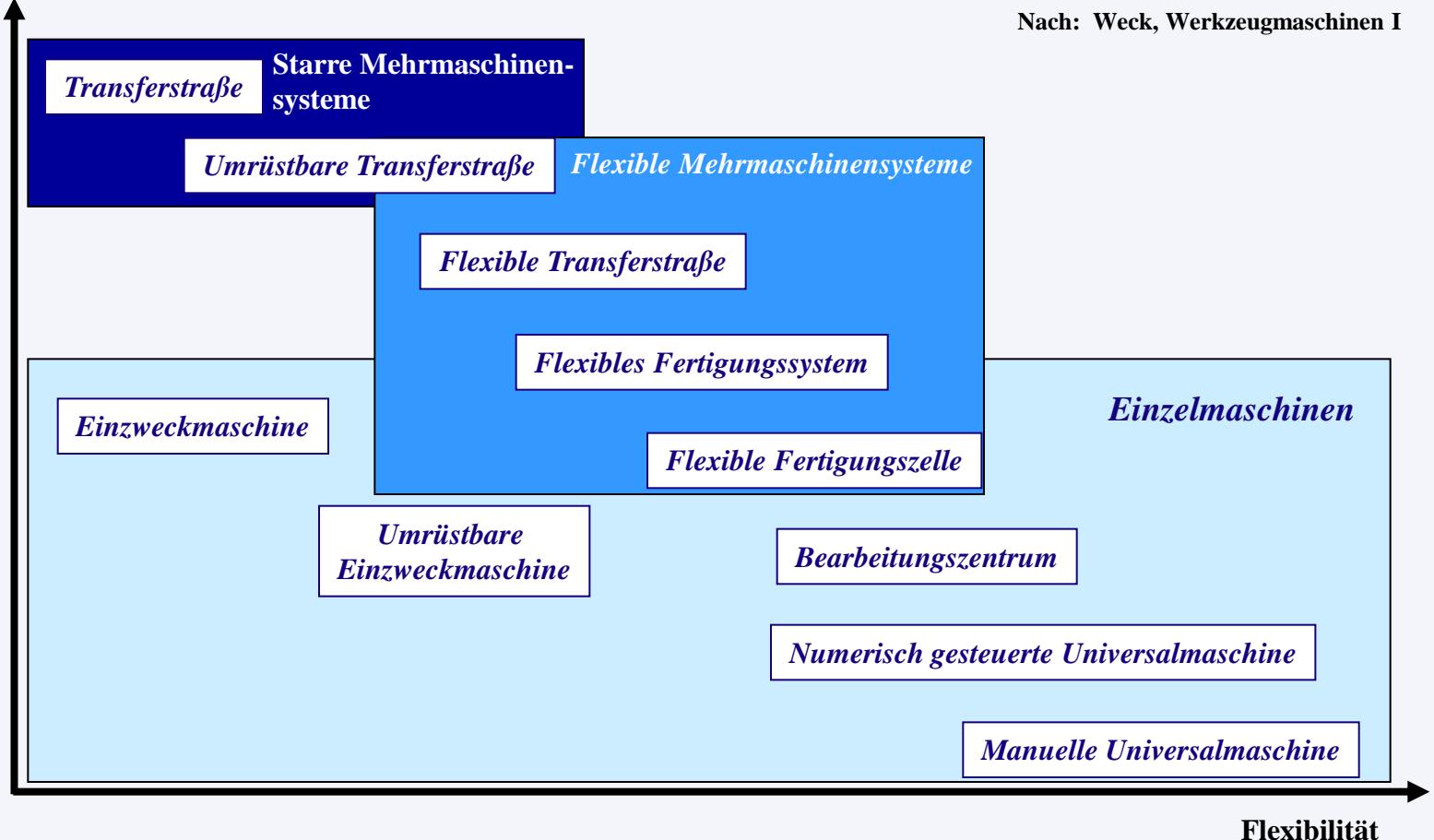
Bei der Umsetzung eines flexiblen Fertigungssystems werden die konträren Ziele

- hohe Flexibilität
 - bei relativ hoher Produktivität
- verfolgt.

Flexibilität erhöhen: Flexible Fertigungssysteme (FFS)

Produktivität

Nach: Weck, Werkzeugmaschinen I



Geschwindigkeiten erhöhen: High Speed Cutting -Bearbeitung

HSC-Bearbeitung was ist das?

High Speed Cutting bzw. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ist ein Zerspanverfahren, bei dem die Schnittgeschwindigkeit sowie der Vorschub um ein Vielfaches höher ist als bei konventioneller Zerspanung (Schnittgeschwindigkeit bis 10.000 m/min bei Aluminium).

Merkmale der HSC-Bearbeitung:

- mit der Steigerung der Drehzahl können größere Vorschubgeschwindigkeiten bei gleichen Bearbeitungskräften realisiert werden. Dies führt zu einer Reduzierung der Durchlaufzeit.
- eine Steigerung der Drehzahl bei gleichbleibendem Vorschub führt zu einer Senkung der Schnittkräfte. Dadurch verlängert sich einerseits die Standzeit des Werkzeugs und andererseits wird eine wesentlich bessere Oberflächenqualität erzielt.
- durch eine mögliche Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit kann eine Erwärmung des Bearbeitungswerkstoffes durch eine „schnellere“ Abspannung gemindert werden. Die Wärmeabfuhr erfolgt zum größten Teil durch die Späne.

Anforderungen an Werkzeugmaschinen:

- leistungsfähige Antriebe
- leistungsfähige Steuerung
- hohe Steifigkeit des Grundaufbaus
- Erhöhung der Spindeldrehzahl stellt enorme Anforderungen an das Spindel-Lager-System
- hohe Steifigkeit der kraftumsetzenden Elemente (Führungen, Kugelgewindetriebe, Lager, usw.)

Geschwindigkeiten erhöhen: *High Speed Cutting* -Bearbeitung

Wegen der reduzierten Zerspankräfte bei der HSC-Bearbeitung, kommt den Massenkräften bei der Auslegung von Vorschubeinrichtungen eine immer größere Bedeutung zu.

Ziel: Reduzierung der bewegten Massen



Fahrständerkonstruktion:

- *alle Bewegung sind nach Möglichkeit im Werkzeug vereint, so daß die Belastung der Antriebe unabhängig vom Werkzeuggewicht ist.*
- *da die Bewegungssachsen oft ungünstig aufeinander aufbauen, entstehen große Hebelarme. Hohen Beschleunigungen führen deshalb zu Verformungen der Achsen, was sich negativ auf das Bearbeitungsergebnis auswirkt.*



Neue Maschinenkonzepte und -kinematiken: parallel Kinematik, bei denen die Maschinenachsen nicht konventionell seriell zueinander angeordnet sind.

Geschwindigkeiten erhöhen: *High Speed Cutting -Bearbeitung*

Maschinebeispiel: Fahrständerbearbeitungszentrum mit Schwenkkopf



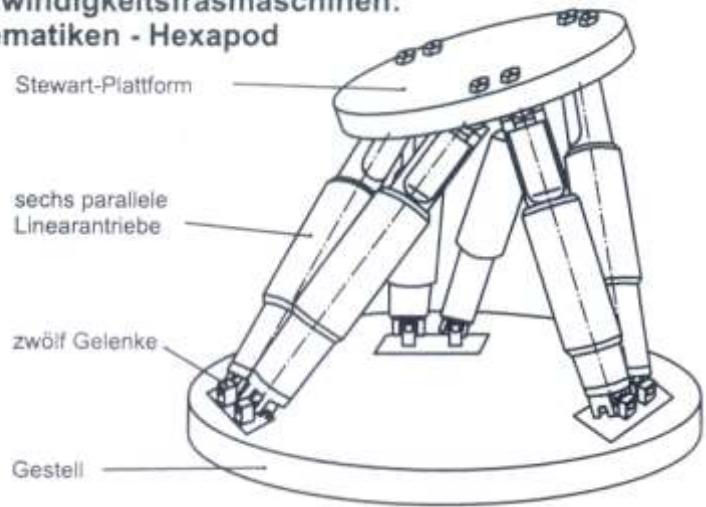
Quelle: AXA-Maschinebau

Geschwindigkeiten erhöhen: High Speed Cutting -Bearbeitung

Neue Maschinenkonzepte und -kinematiken: parallele Kinematiken, bei denen die Maschinenachsen nicht konventionell seriell zueinander angeordnet sind.

→ **HEXAPOD**

Hochgeschwindigkeitsfräsmaschinen: Sonderkinematiken - Hexapod



Vorteile:

- eigensteife Konstruktion
- Stäbe nur auf Zug / Druck belastet (Vermeidung von Biegeanteilen)
- einfache Montage, da die Positionen der ortsfesten Gelenkpunkte nach der Montage in die Steuerung eingegeben werden
- alle Antriebe sind identisch
- geringe bewegte Massen
- einfache Gestellbauweise
- keine besondere Fertigungs- und Montagegenauigkeit der Gestellbauteile erforderlich
- kein Kabelschlepp erforderlich

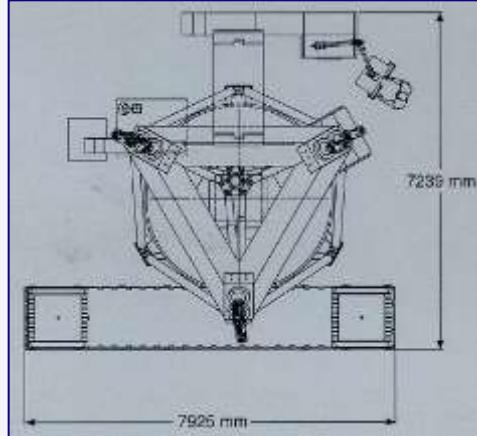
Nachteile:

- auch Linearbewegungen erfordern eine 6-Achsen-Steuerung
- sehr hoher Steuerungsaufwand, da Koordinatentransformation für alle sechs Achsen durchzuführen sind
- Schwenkwinkel der Plattform begrenzt 5-Achs-Fähigkeit; zur 5-Seiten-Bearbeitung muß zusätzlich eine Dreh- und evtl. eine Schwenkachse vorhanden sein
- aufwendige Lagerung der Beine sowie kompliziertes Wegmeßsystem zur Gewährleistung von Steifigkeit und Genauigkeit
- große thermische Wirklängen
- ungünstiges Verhältnis Arbeitsraum/Maschinenvolumen

Quelle: Uhlmann: Werkzeugmaschinen

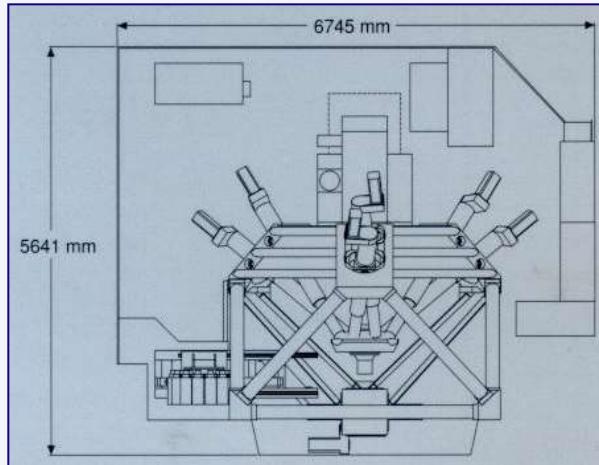
Geschwindigkeiten erhöhen: High Speed Cutting -Bearbeitung

*Neue Maschinenkonzepte und -kinematiken: parallele Kinematiken /
Maschinenbeispiele der Firma Ingersoll*



*Hochgeschwindigkeitsfräsmaschine
(VOH-1000)*

- *Vertikal-Spindel*



*Hochgeschwindigkeitsfräsmaschine
(HOH-600)*

- *Horizontal-Spindel*

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

Ultrapräzisionsbearbeitung

Für das geometrisch bestimmte Spanen im Ultrapräzisionsbereich werden spezielle Werkzeugmaschinen und Werkzeuge eingesetzt. Mit der Ultrapräzisionsbearbeitung lassen sich Rauheitswerte $< 10\text{nm}$ und das einhalten engster Toleranzen realisieren.

Anwendungsbereiche

Es können Werkstücke hergestellt werden, deren hochgenaue Oberflächen vielfältige Funktionen in Bereichen der Mechanik, Optik und Elektronik ermöglichen:

- Optiken für Bearbeitungslaser (Al, CU)
- Kontaktlinsen (Kunststoffe)
- Fotokopierer- oder Laserdruckertrommeln (Al, CU)
- Magnetspeicherplatten (ferritische Werkstoffe)

Aufgrund des mit der Härte verbundenen Verschleißwiderstandes wird als Schneidstoff für die Ultrapräzisionsbearbeitung monokristalliner Diamant eingesetzt.

Die Schärfe der Schneidplatte hat einen wesentlichen Einfluß auf die Spanbildung und damit auf die erzeugte Oberflächengüte

Maschinenanforderungen:

Ultrapräzisionsmaschinen ähneln im wesentlichen konventionellen Dreh- und Fräsmaschinen. Sie verfügen jedoch über

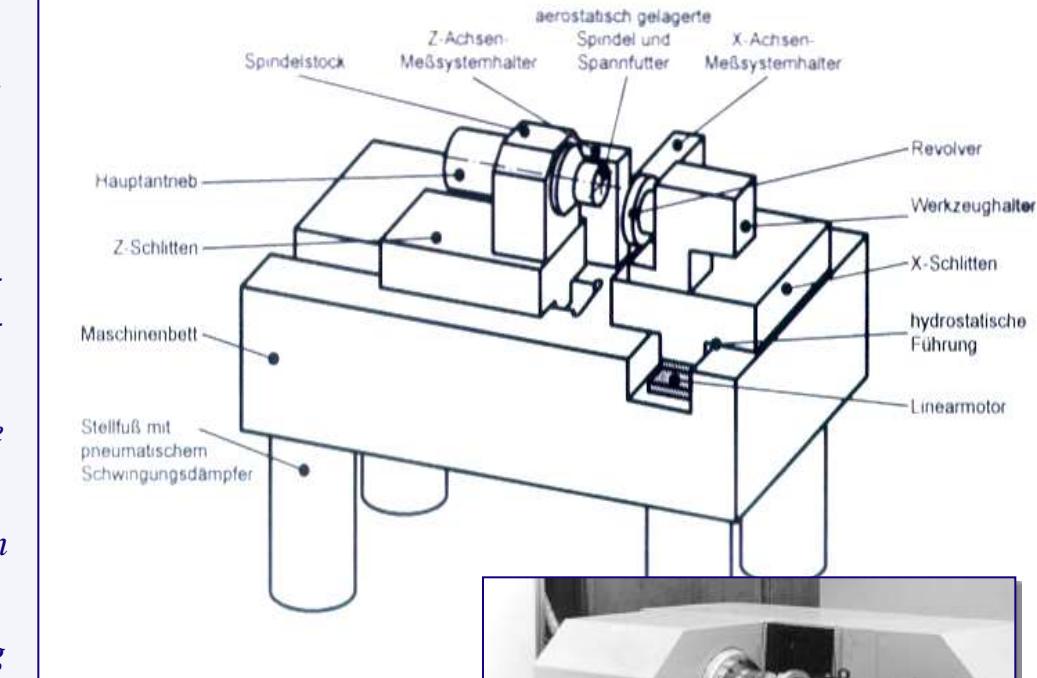
- höhere thermische Stabilität,
- einem Laserinterferometer-Wegmeßsystem in Verbindung mit einer hochauflösenden Steuerung.
- luftgelagerte Führungselemente (verschleißfrei) und

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

Anforderungsprofil einer Hochpräzisionsdrehmaschine

- hohe Steifigkeit des Maschinenbettes bei gutem Dämpfungsvermögen
- optimierter Späneabfall und Abtransport
- Hauptantrieb mit hoher Maximal-Drehfrequenz, großen Beschleunigungs- werten sowie einem weiten Regelbereich
- Hauptspindellagerung muß eine große Steifigkeit und gute Dämpfung aufweisen
- Reitstock sollte auf separater Führungsbahn gelagert sein
- eine trennende Schutzeinrichtung (Kapselung), die den im Schadensfall auftretenden hohen mechanischen Belastungen stand hält.

Hochpräzisionsdrehmaschine HP 100



Quelle: IWF, TU Berlin

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

*Vergleich der technischen Realisierung zwischen konventioneller Werkzeugmaschine,
Hochpräzisions- und Ultrapräzisionswerkzeugmaschine*

Baugruppe	konventionelle Werkzeugmaschinen	Hochpräzisions-werkzeugmaschinen	Ultrapräzision-werkzeugmaschinen
Maschinenbett	Grauguss oder Reaktionsharzbeton	Reaktionsharzbeton oder Granit	Granit
Schlittenführung	hydrodynamische Gleit- oder Wälzführungen	hydrostatische Gleit- oder Wälzführungen	aero- oder hydrostatische Gleitführungen
Spindellagerung	Wälzlager	Präzisionswälzlager oder hydrostatische Lagerung	aero- oder hydrostatische Lagerung
Vorschubantriebe	Gleichstrommotor mit Kugelrollspindel bzw. Linearmotor	Gleichstrommotor mit Präzisionskugelrollspindel	Gleichstrommotor mit Präzisionskugelrollspindel
Hauptantrieb	Asynchron-Drehstrommotor	bürstenloser Gleichstrommotor	bürstenloser Gleichstrommotor
Wegmeßsysteme	indirekt messende Winkelschrittgeber am Antrieb	direkt messende translatorische Strichmaßstäbe	Glasmaßstäbe aus Zerodur, Laserinterferometer
Spannsysteme	3-Backenfutter	Präzisionsbackenfutter, Magnetspannfutter	Vakuumspannfutter

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

Beispiel: Vakuumspannfutter für die Ultrapräzisionsbearbeitung



Quelle: Wittemann, Feinwerktechnik

Vorteile:

- *geringe Deformation des Werkstücks*
- *hohe Durchmesserflexibilität*

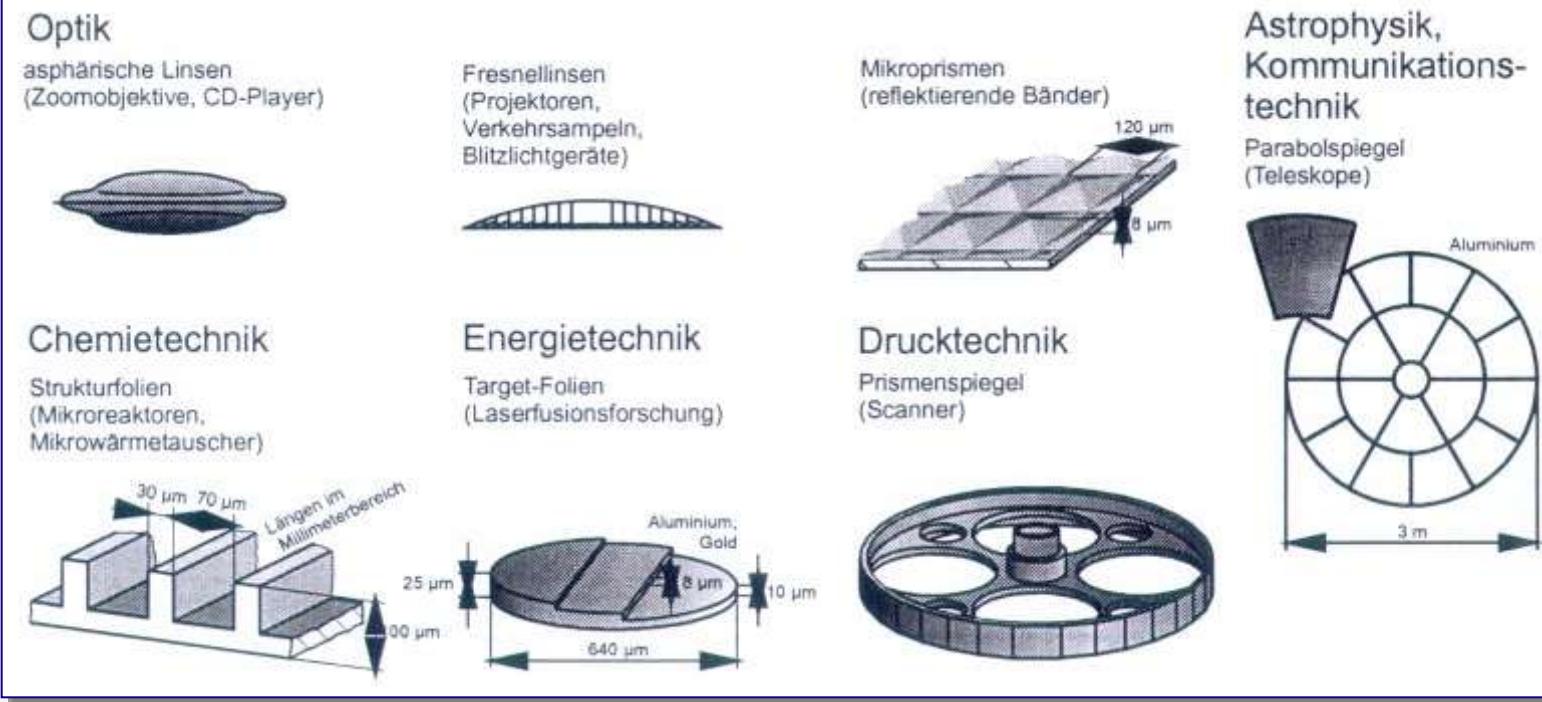
Nachteile:

- *plan vorbereitete Spannflächen am Werkstück notwendig*
- *Zentrierung der Werkstücke nur durch Zentrierstifte o. ä. möglich*
- *offene Bereiche am Futter müssen verschlossen werden (Rand, Werkstückbohrungen, -nuten)*
- *Mindestkontaktfläche zwischen Werkstück und Spannfutter notwendig (problematisch z.B. bei schmalen Ringen)*
- *nicht für wellenähnliche Werkstücke geeignet*
- *aufwendige Vakuumsysteme notwendig*
- *sinkende Spannkraft bei Leck im Vakuumsystem*

Quelle: nach Uhlmann: Werkzeugmaschinen

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

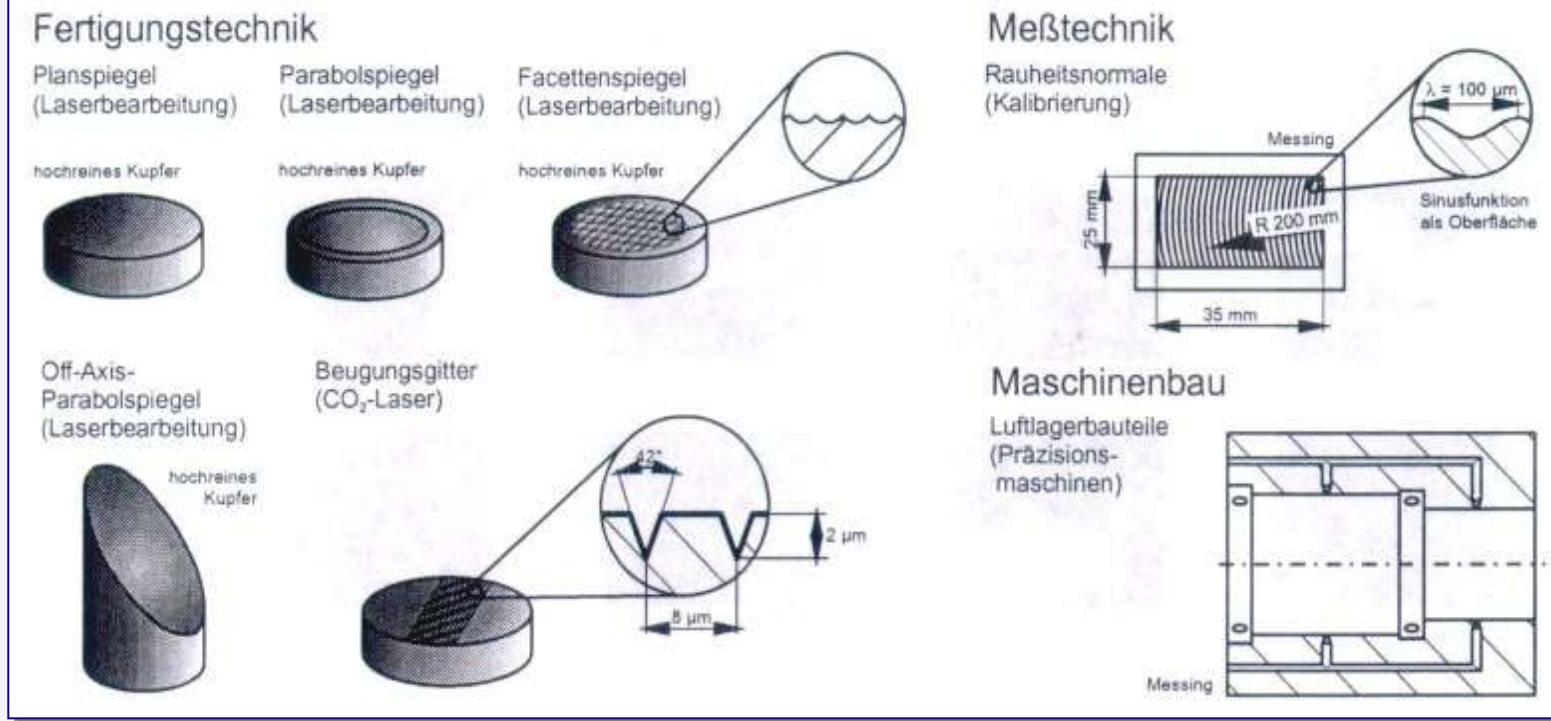
Ultrapräzisionsbearbeitung: Anwendungsbeispiele



Quelle: Uhlmann: Werkzeugmaschinen

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

Ultrapräzisionsbearbeitung: Anwendungsbeispiele (2)



Quelle: Uhlmann: Werkzeugmaschinen

Werkstoffspektrum erweitern: z.B. *Hochpräzisions-Harddrehen*

Hochpräzisions-Harddrehen

Präzisionsbauteile (z.B. Wälzlagerringe, Einspritzventile und Hydraulikkomponenten) erhielten bislang nach dem Härteten durch Feinbearbeitungsverfahren wie Schleifen, Feinschleifen und Honen ihre nötige Präzision. Das Hochpräzisions-Harddrehen bietet hier eine Alternative zum Schleifen.

Technologische Eigenschaften des Hochpräzisions-Harddrehen:

- Bauteilqualitäten im Bereich IT3 bis IT5
- Oberflächengüte von $RZ < 1 \mu\text{m}$
- Werkstoffspektrum bis zu 68 HRC

Vorteile des Hochpräzisions-Harddrehen gegenüber dem Schleifen:

- hohe Flexibilität
- Möglichkeit der Trockenbearbeitung
- Möglichkeit der Komplettbearbeitung
- Verkürzung der Hauptzeit
- Verringerung des Energiebedarfs

Anforderungen an die Werkzeugmaschine:

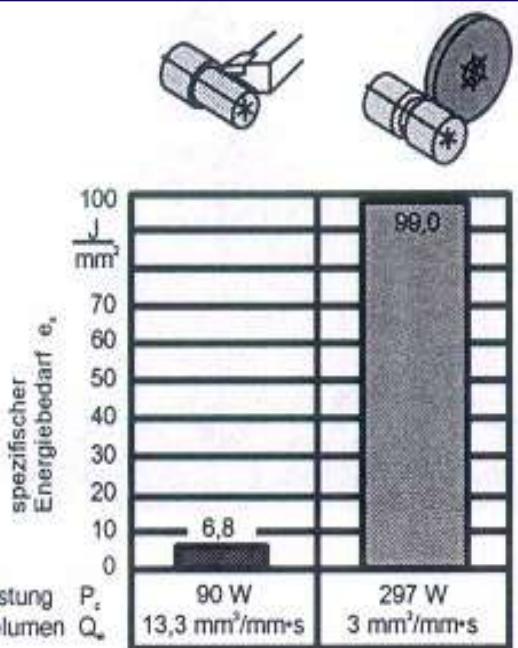
- hohe Systemsteifigkeit
- statische Grundfestigkeit
- thermosymmetrische Stabilität
- verschleißfreie hydrostatische Führungen
- geometrisch günstiger Aufbau der Schlittenführungen
- Rund- und Planlaufgenauigkeit der Arbeitsspindel von $2 \mu\text{m}$
- Präzisionsspannmittel
- Werkzeug - Temperatur - Kompensation

Werkstoffspektrum erweitern: z.B. *Hochpräzisions-Harddrehen*

Vorteile des Hochpräzisions-Hartrehen gegenüber dem Feinschleifen

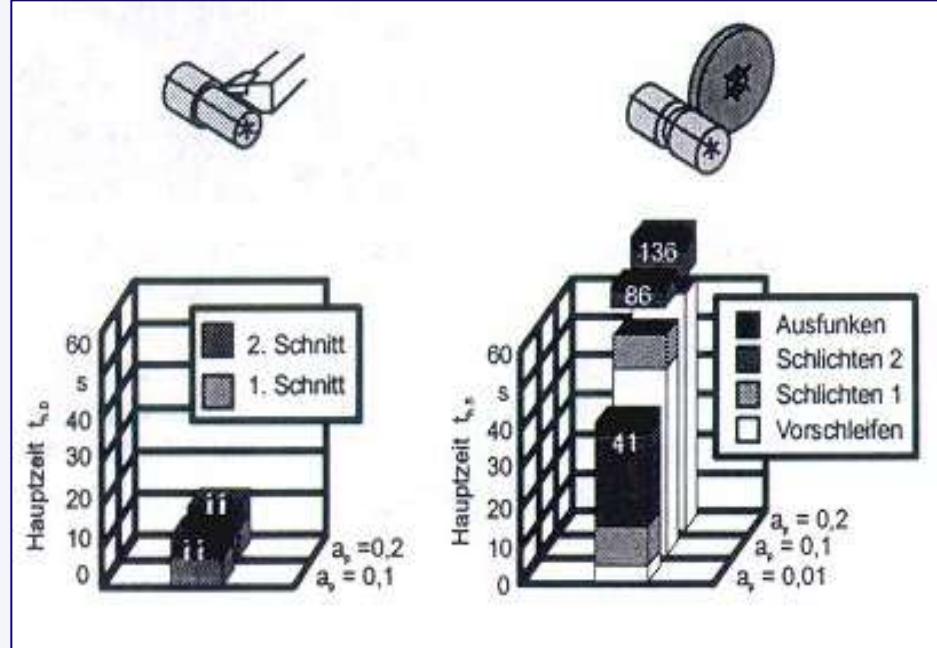
Verringerung des Energiebedarfs

Hochpräzisions- Hartdrehen Feinschleifen mit Korundscheibe



Verkürzung der Hauptzeit

Hochpräzisions- Hartdrehen Feinschleifen mit Korundscheibe



Werkstoffspektrum erweitern: z.B. *Hochpräzisions-Hartdrehen*

Anwendungsbeispiele



*Getriebebauteile
(Wellen, Zahnräder)*



*Werkzeuge
(Hülsen, Stempel,
Preßformen)*



*Lagerbauteile
(Wälzlagerringe)*



*Hydraulikbauteile
(Kolben, Ventile)*

Ressourcenverbrauch minimieren: Trockenbearbeitung

Trockenbearbeitung was ist das?

Bei der Trockenbearbeitung wird ganz oder teilweise (Minimalmengenkühlschmerung) auf die Verwendung eines Kühlschmierstoffs verzichtet.

Warum Trockenbearbeitung?

- Umweltschutz
- Arbeitsschutz
- Entsorgungskosten
- Reinigungs- und Pflegeaufwand
- Kosten für Kühlschmierstoffe

Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Produktionsprozessen
Sie wird entscheidend von den Schnittparametern und den erzielten Standzeiten bestimmt!

Auftretende Probleme bei der Zerspanung (mit geometrisch bestimmter Schneide) von legierten und hochfesten Stählen:

- hohe Bearbeitungskräfte
- starken Werkzeugverschleiß
- ungünstige Spanformen
- schlechte Oberflächenqualität
- Maß- und Formfehler



Zerspanprozeß mit Kühlschmierstoff (Quelle: IWU)

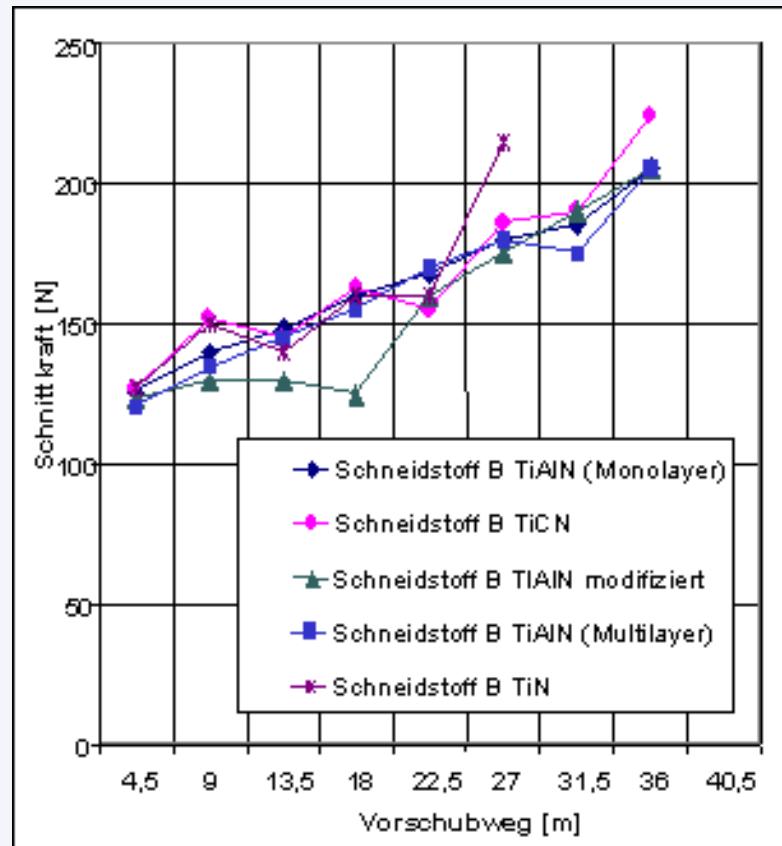


Zerspanprozeß ohne Kühlschmierstoff (Quelle: IWU)

Ressourcenverbrauch minimieren: Trockenbearbeitung

Die Wahl des Hartmetallschneidstoffes in Verbindung mit der Beschichtungsart hat entscheidenden Einfluß auf die erzielbare Standzeit.

Die Prozess-Sicherheit ist mit einer Multilayerbeschichtung am größten!

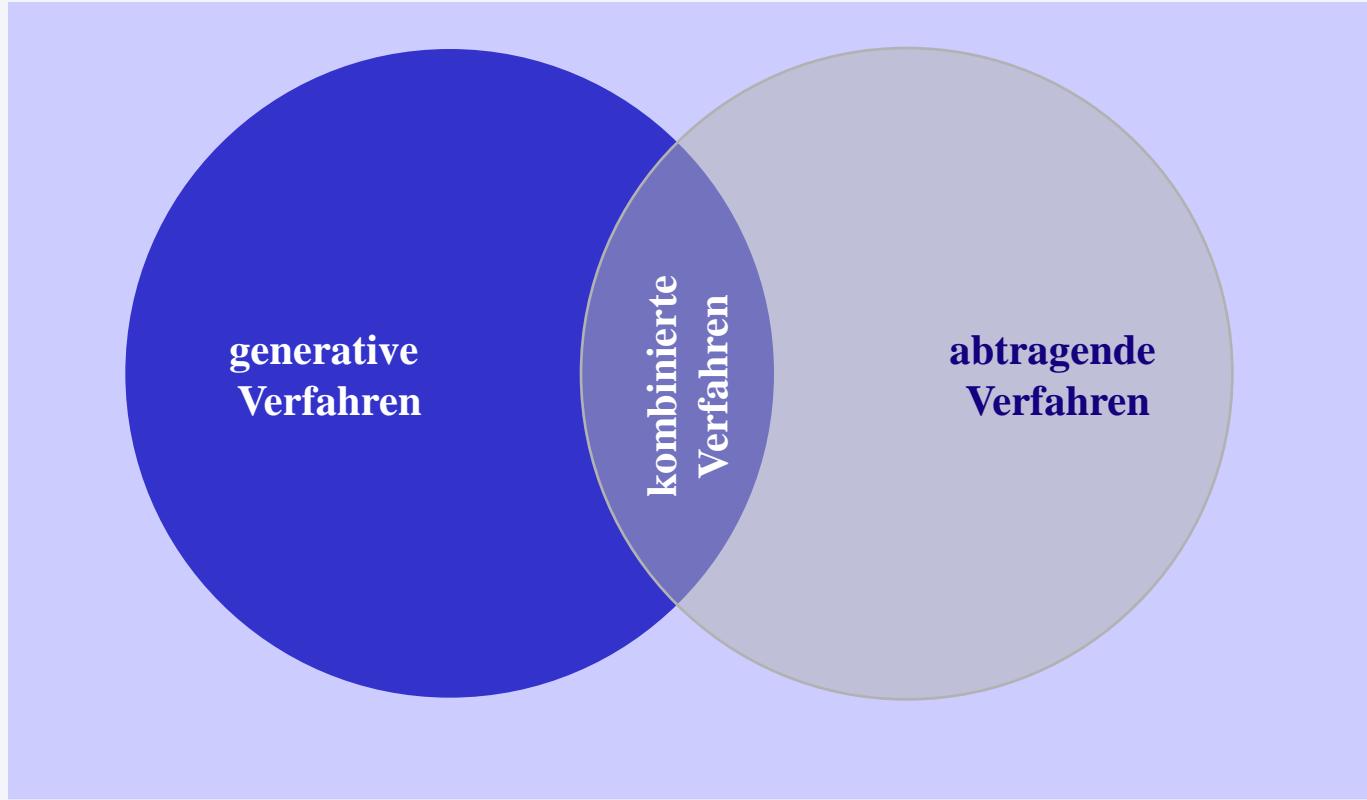


Quelle: IWU, Fraunhofer

Werkzeugmaschinen für generative Fertigungsverfahren

Verfahren: Einteilung

Klassen von Rapid Prototyping - Verfahren

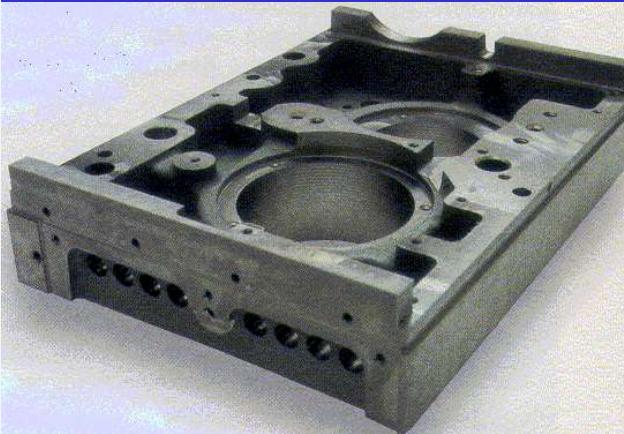


Rapid Prototyping - Verfahren

Verfahren: Einteilung

Abtragende und generative Verfahren

abtragende Fertigungsverfahren



Quelle: Hermle AG

**Formgebung durch Materialabtrag
(konventionelle Verfahren)**

- Verfahren:**
- Bohren
 - Fräsen
 - Drehen
 - ...

generative Fertigungsverfahren



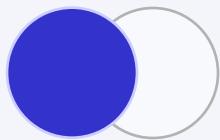
Quelle: Charlyrobot

**Formgebung durch
Aneinanderfügen bzw. Aufbau von
Körperschichten**

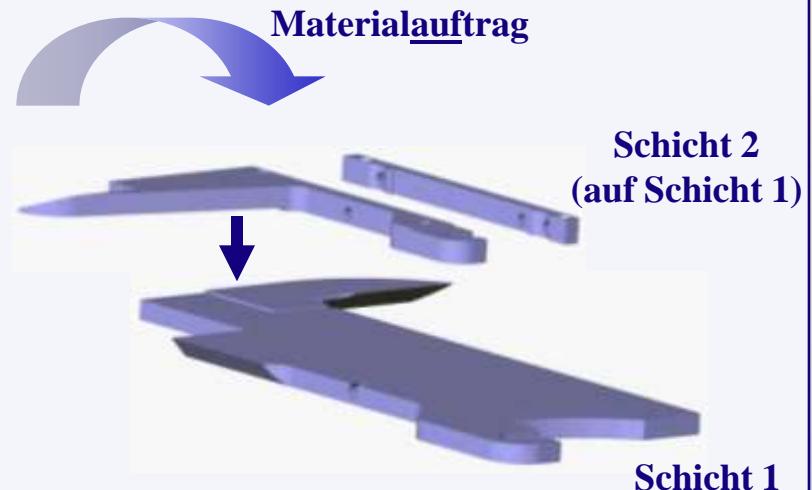
- Verfahren:**
- Stereolithographie
 - Selektives Laser-Sintern
 - Laminated Object Manufacturing
 - Fused Deposition Modelling
 - Laser-Auftragsschweißen

Verfahren: Einteilung

Generative Rapid Prototyping - Verfahren



- **Materialauftrag:**
Aufbau des Prototypen über Materialauftrag
- **Schichtorientierung:**
Prototyp wird Schicht für Schicht aufgebaut

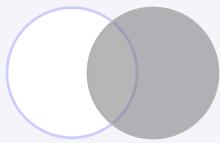


Beispiele:

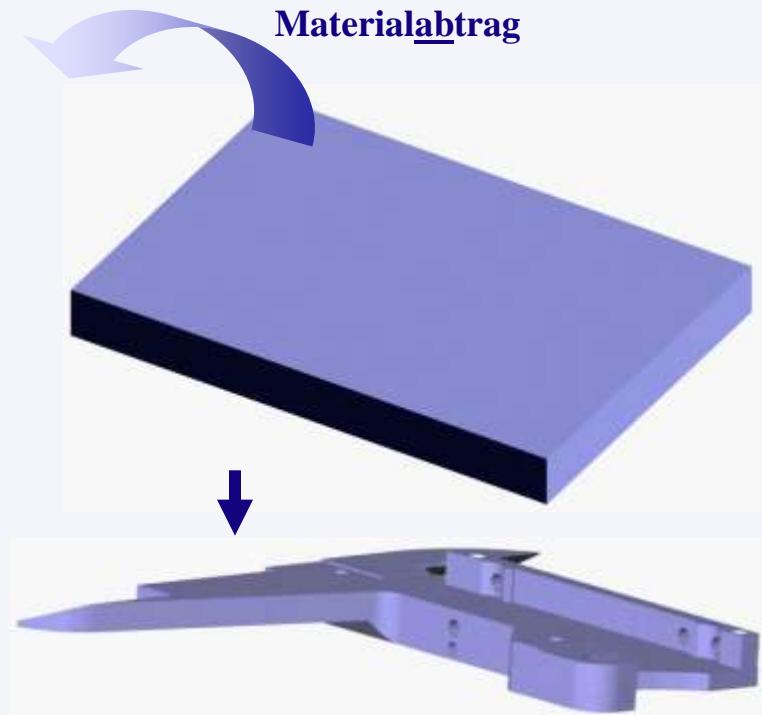
- Sintern
- Laminieren und Ausschneiden
- Aushärten flüssiger Werkstoffe
- ...

Verfahren: Einteilung

Abtragende Rapid Prototyping - Verfahren



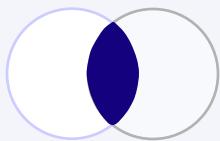
- **Materialabtrag:**
Prototyp wird mittels Entfernen von Material hergestellt
- **Schichtorientierung nicht zwingend**



Beispiele:

- Fräsen, insbesondere Hochgeschwindigkeitsfräsen
- Prototyping mit konventionellen zerspanenden Verfahren

Verfahren: Einteilung



Kombinierte Rapid Prototyping - Verfahren

Anteile von generativen Verfahren und
abtragenden Verfahren

→ quasi - generative Verfahren

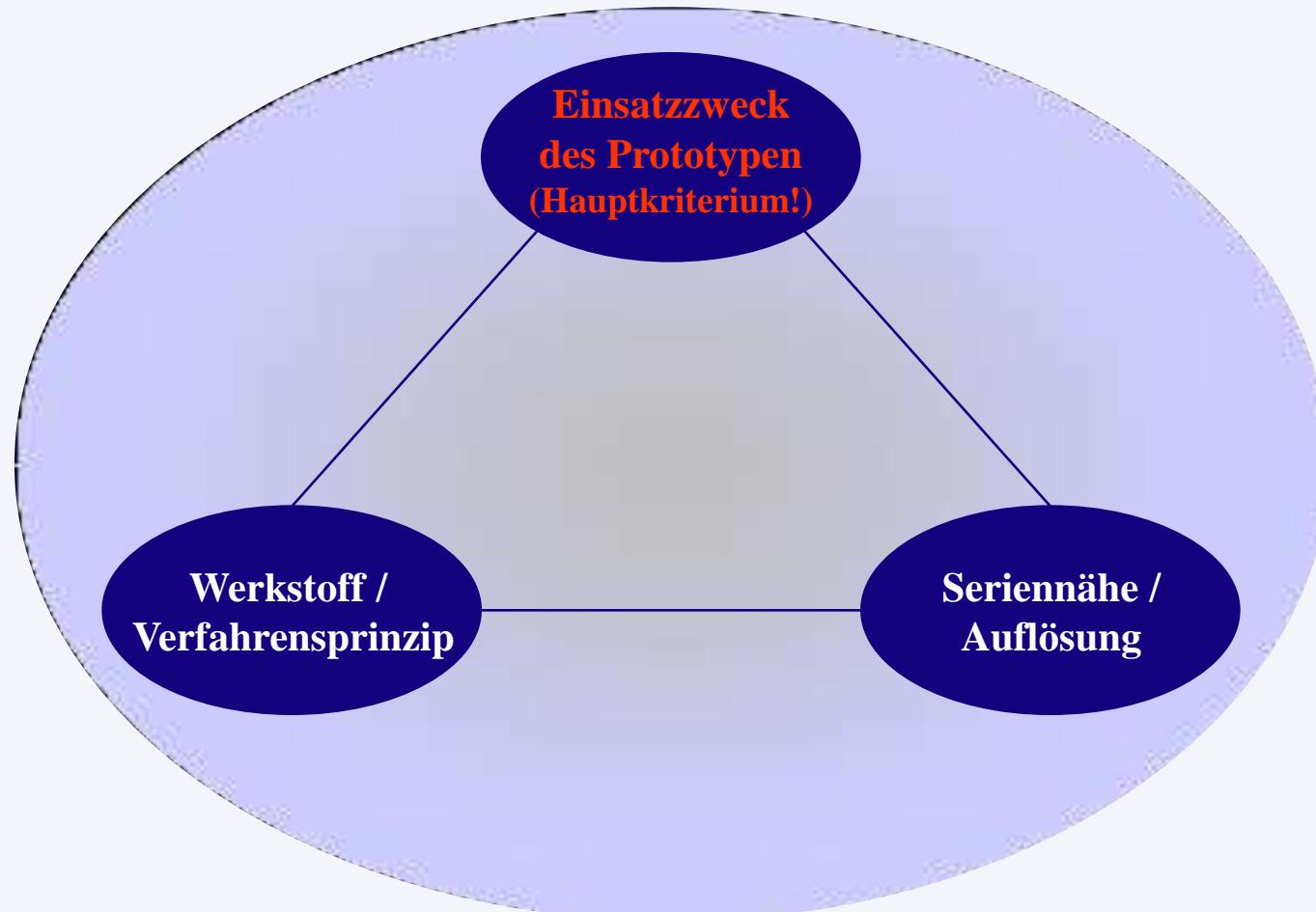


Beispiele:

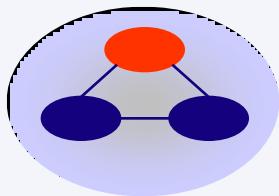
- Fräsen innerhalb einer Schicht und anschließendes Fügen der einzelnen Schichten
- Materialaufbau und anschließendes Herausarbeiten der Kontur, z. B. mittels Fräsen

Verfahren: Einteilung

Weitere Kriterien zu Auswahl und Einteilung von Rapid Prototyping - Verfahren



Verfahren: Einteilung



Einsatzzweck des Prototypen

Einsatzzweck

Prototyp, Werkzeug oder Produkt herzustellen ?
(Rapid Prototyping / Tooling Manufacturing)

Funktionsprototyp

- **Art der darzustellenden Funktionen**
- **auftretende Belastungen**
- **Einfach-/ Mehrfachverwendbarkeit**
- ...

Anschauungsprototyp

- **Qualität der Oberflächen / optische Eigenschaften**
- **Detaillierungsgrad**
- ...

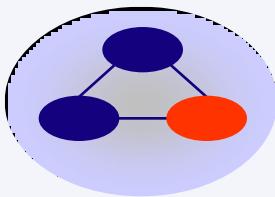
interne Nutzung

externe Nutzung (Kunde / Messe etc.)

Folgeverfahren

...

Verfahren: Einteilung



Seriennähe und Auflösung des Verfahrens

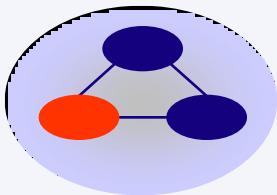
Seriennähe

- **eher Modellcharakter (noch weit von der Serie entfernt)**
- **z.T. nicht sehr weit ausgearbeitet, sondern eher Prinzipdarstellungen**
- **eher Prototypcharakter (seriennah)**
- **Ausarbeitungsgrad stark vorangeschritten**

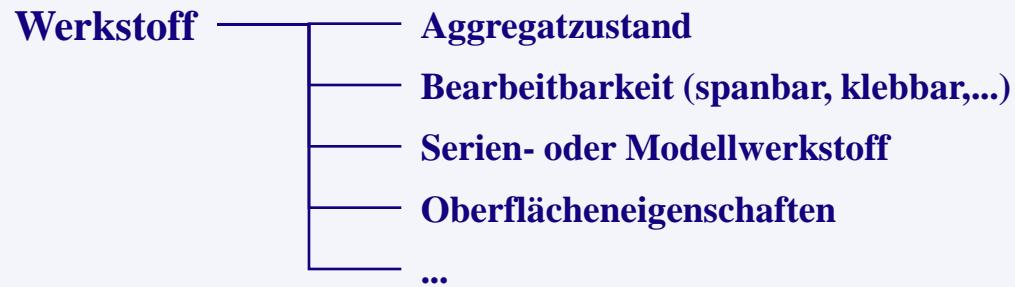
Auflösung

- **grob**
- **wenig Details**
- **teilweise vereinfacht**
- **Radius z.T. stark angenähert**
- **STL-Darstellung grob**
- **fein**
- **detailliert, Einzelheiten dargestellt**
- **Radius und Krümmungen genauer beschrieben**
- **feine STL-Zerlegung**

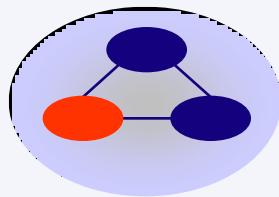
Verfahren: Einteilung



Werkstoffe und Verfahrensprinzip



Verfahren: Einteilung



Werkstoffe und Verfahrensprinzip: Übersicht über Verfahrensgruppen (Auszug)

Rapid Prototyping - Verfahren

Generative Verfahren

Polymerisationsprozess

- Schichtweise Laser-bestrahlung
- Belichten durch Maske

Abtragende Verfahren

Fräsen

- HSC

Anwendung thermischer Energie (=generativ)

Sinter- prozess

- Selective Laser Sintering

Metall- schweißen

Kombinierte Verfahren

Fräsen + Fügen

Fräsen + Laser- auftragsschweißen

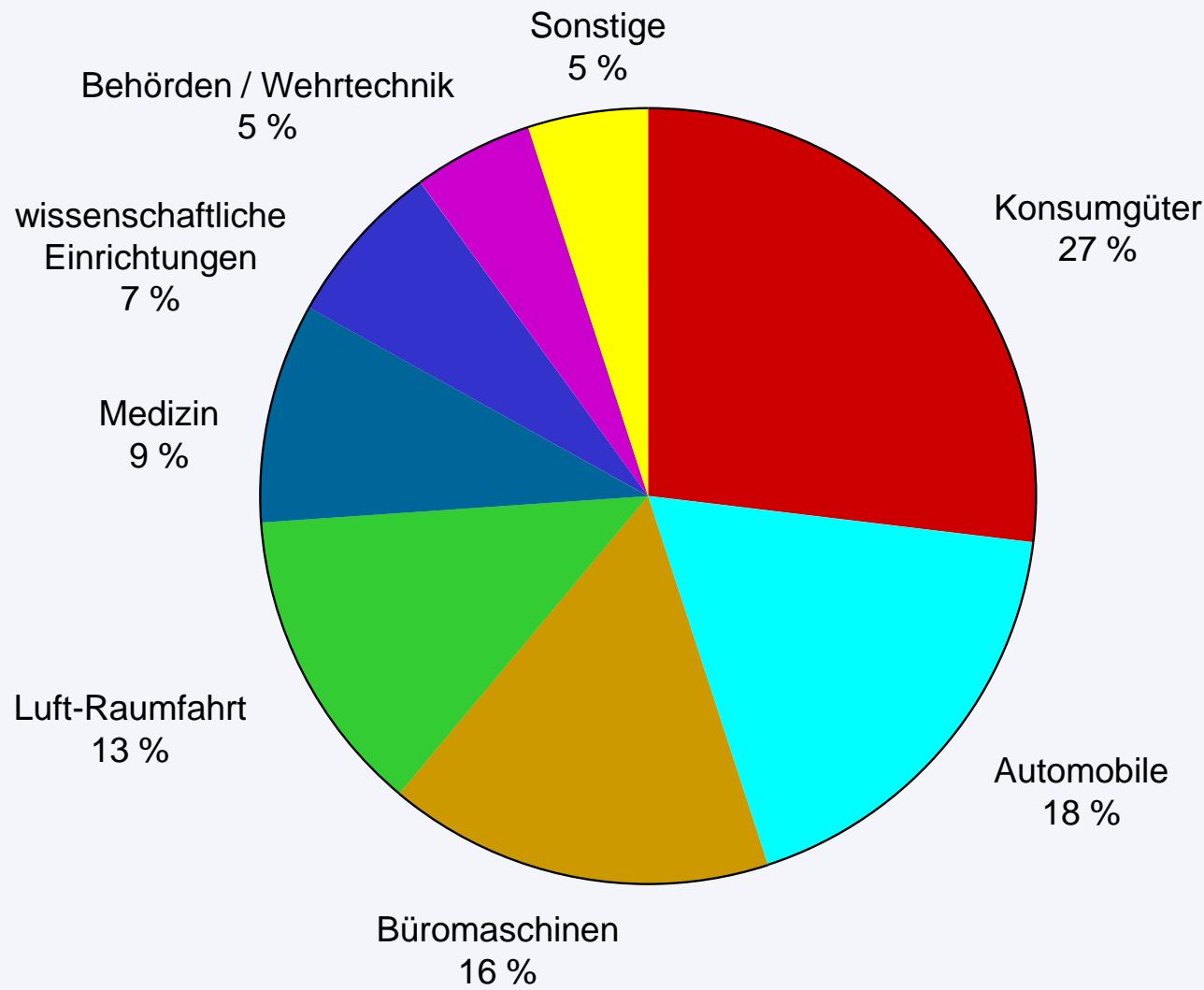
Verkleben von Schichten

- Laminated Object Manufacturing

In Form

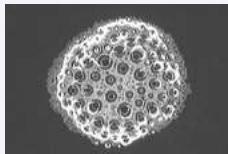
- Giessen
- Spritzgiessen

Generative Verfahren: Verteilung der Rapid Prototyping Verfahren

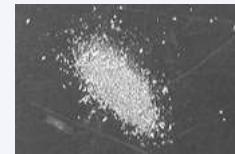


Rapid Prototyping Verfahren

Fluid



Pulver



Draht / Folie



Sterolithographie

Solid Ground Curing
Solid Creating System
Colamm-300
Soup
Somos
Stereos

Selective Laser Sintering

EOS - Verfahren
DTM - Verfahren

Fused Deposition Molding

Laminated Object Molding (Manufacturing)

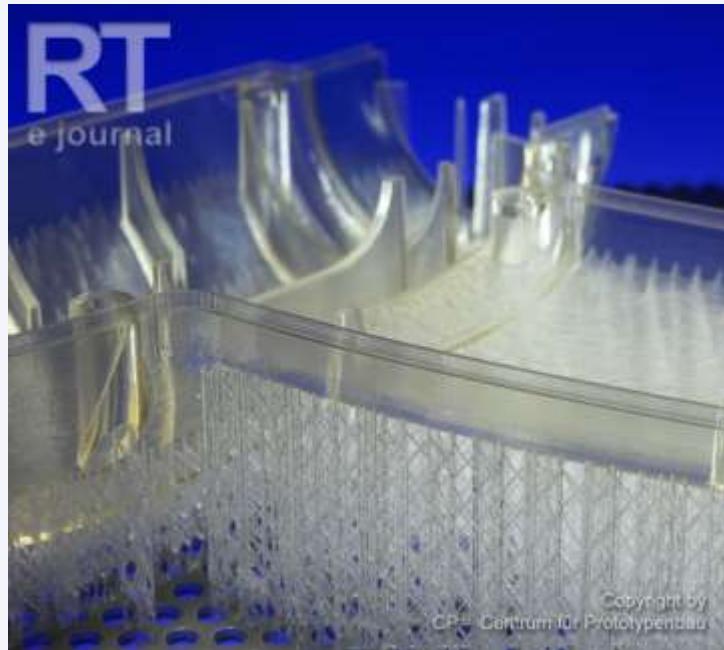
Multi Jet Modeling

Solider-Verfahren

3D-Printing

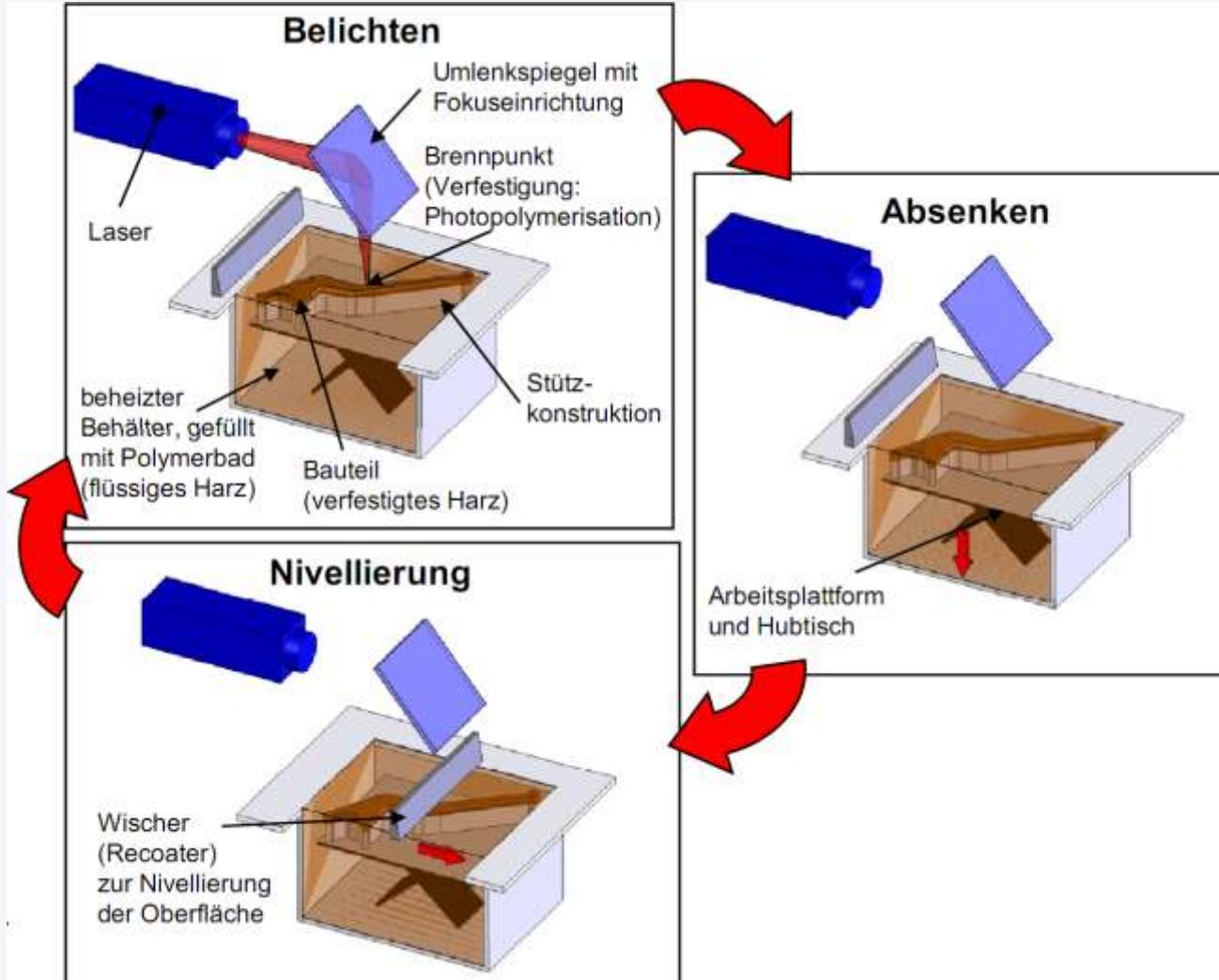
SLA / DLP

Verfahren	Lokale Verfestigung von flüssigem Monomer durch UV-Stahlung (Laser, Lampe), Stützen oder Stützmaterial erforderlich
Materialien	Epoxydharze, Acrylate
Vorteile	Hoher Detaillierungsgrad, sehr gute Oberflächen
Nachteile	Geringere mechanische und thermische Belastbarkeit als Lasersintern und Extrusionsverfahren. Spezialharze für höhere Temperaturen verfügbar



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

Stereolithographie



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme



Stereolithographie-Anlage der Firma 3D-Systems



Stereolithographie: Prozessablauf



Ein Stereolithographie-Modell in der Herstellung. Der Laser (blau) härtet die Oberfläche entsprechend dem Modell in dieser Schichtposition aus.



Fertiggestelltes Modell, noch vor Entfernung der Stützstrukturen.

Stereolithographie: Beispiele



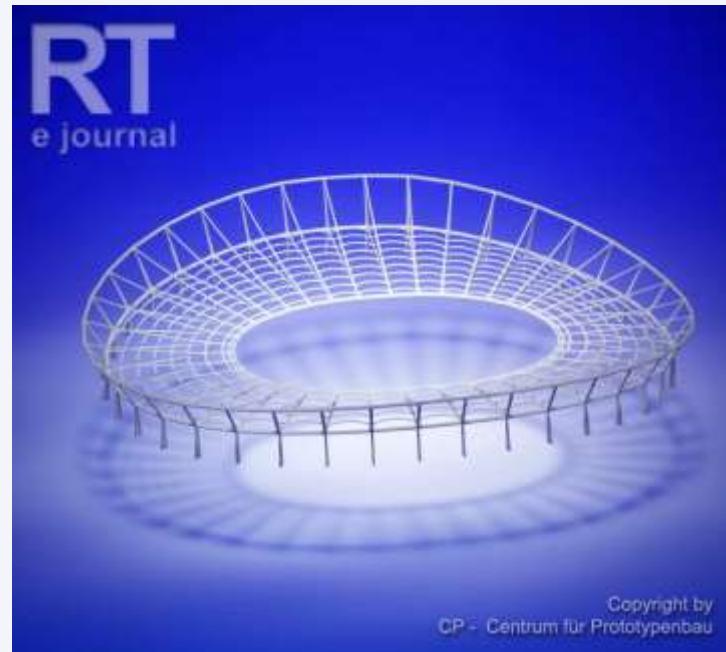
Gebrauchsfertiges Stereolithographie-Modell:
Gesichtsschädel



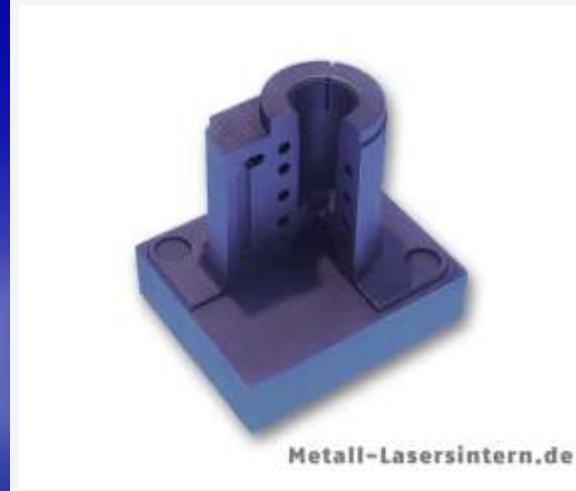
(Quelle: FA. Weihbrecht)

Selective Laser-Sintering (Laser Sintern)

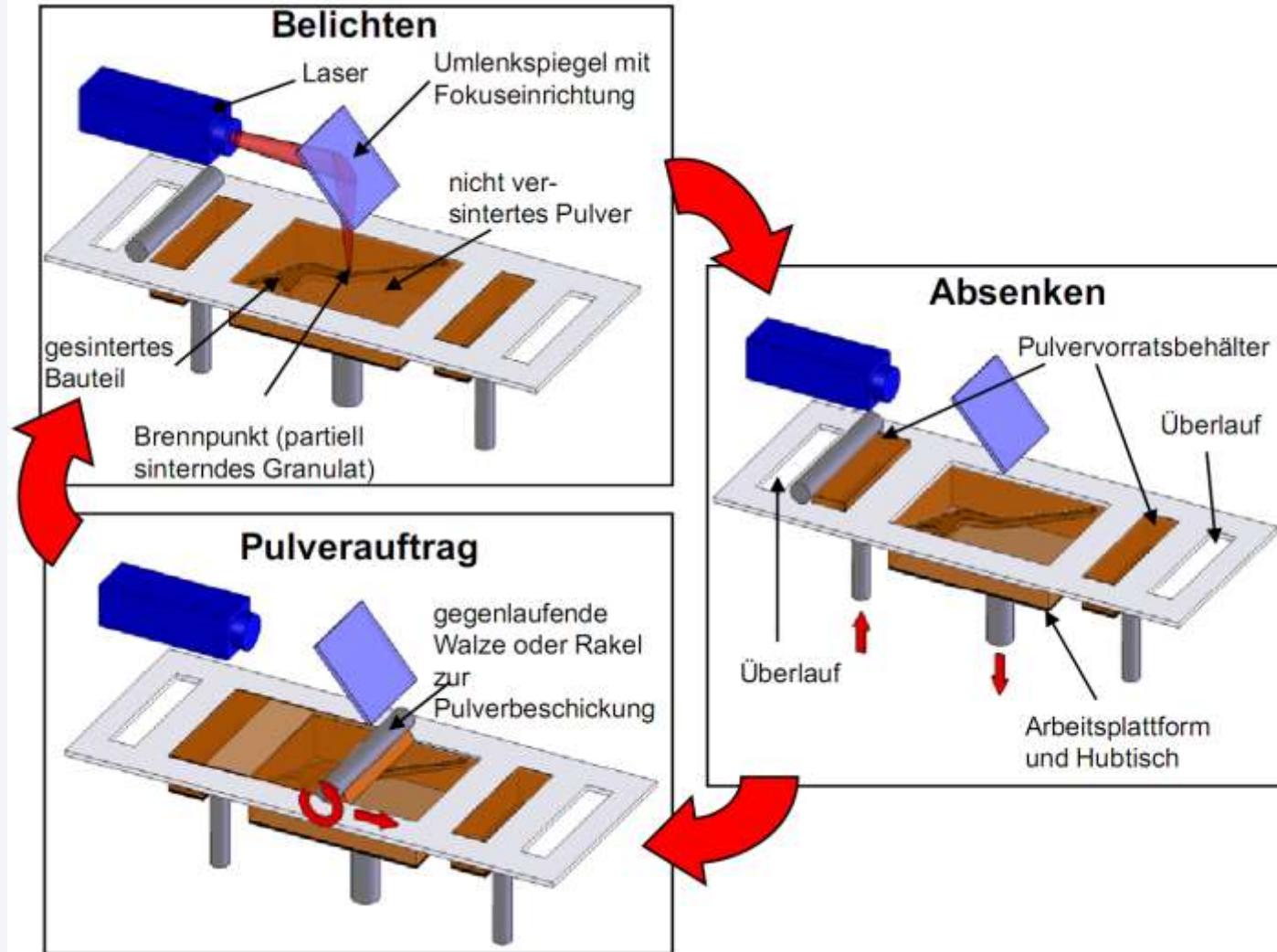
Verfahren	Lokales Aufschmelzen von pulverförmigem thermoplastischem Material, Schichtbildung nach Erstarrung. Keine Stützen erforderlich
Materialien	Kunststoffe (Polyamid, Polystyrol), <u>Metalle</u>, Sande, Keramiken
Vorteile	Kunststoff: Höhere mechanische und thermische Belastbarkeit als Stereolithographie
Nachteile	Rauere Oberflächen, geringerer Detaillierungsgrad als Stereolithographie



Quelle: RTejournal



Selective Laser-Sintering (Laser Sintern)

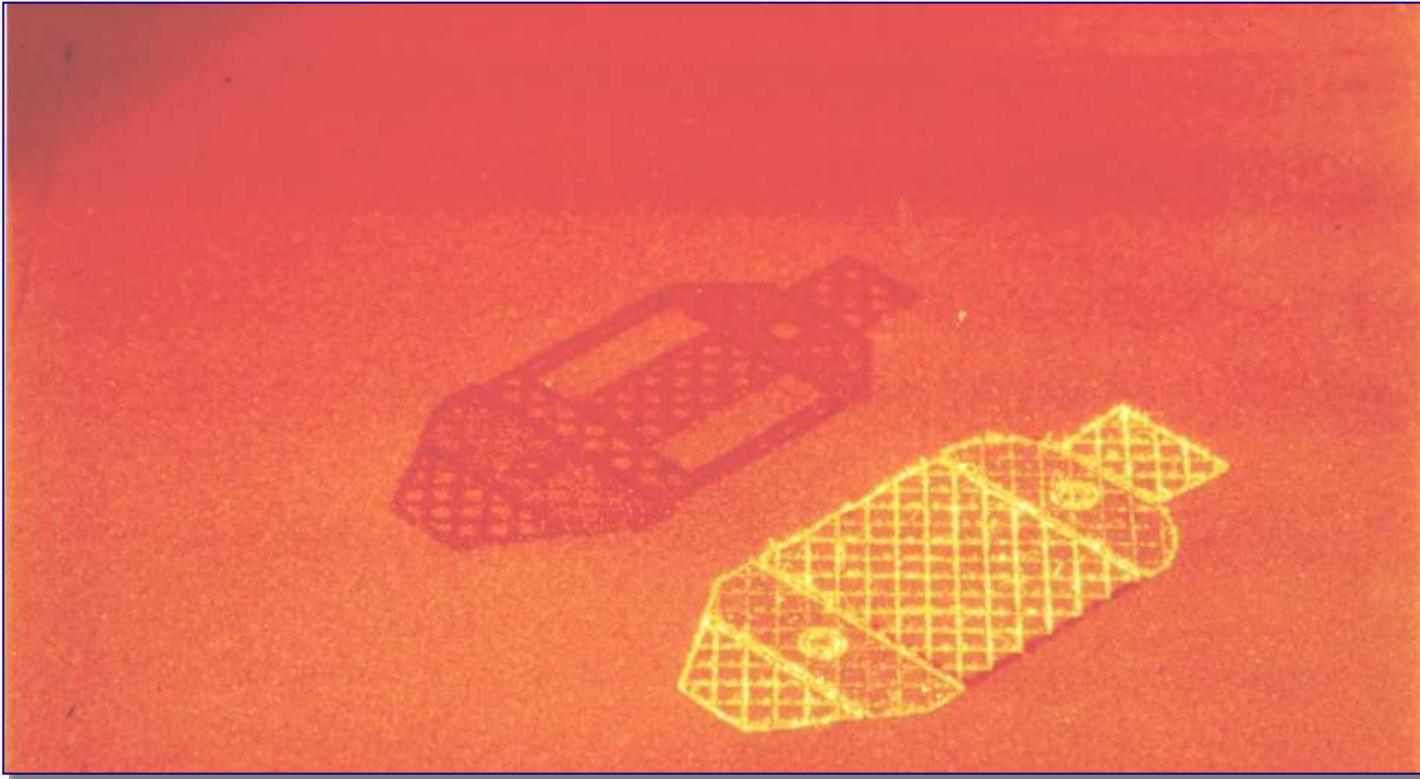


Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

Maschinenbeispiel: EOSINT S (Laser-Sinter-System für Sandformen und –kerne)

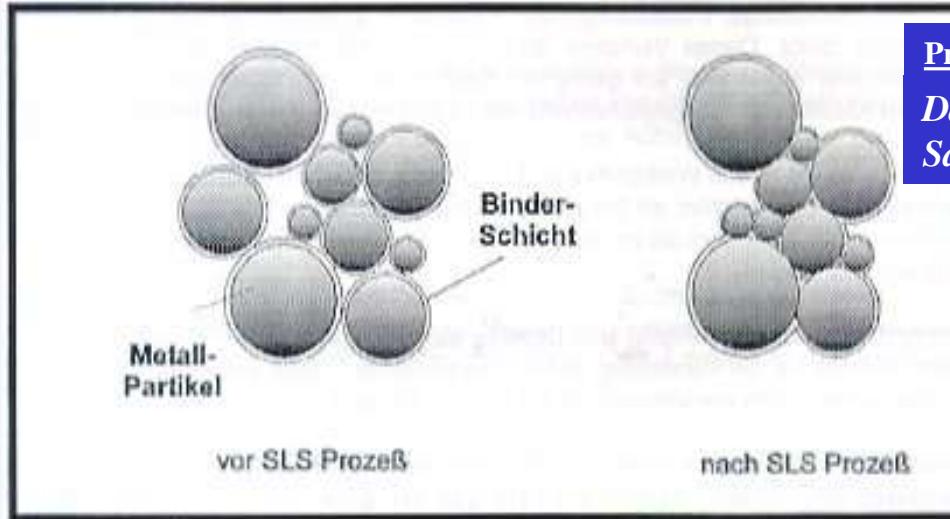


Laser-Sinter-Vorgang (EOSINT S 350/40)



*EOSINT S 350/40: Fotoaufnahme eines Laser-Sinter-Vorganges mit langer Belichtungszeit.
Gleichzeitige Herstellung von zwei Bauteilen erhöht die Wirtschaftlichkeit der Anlage.*

Selective Laser-Sintering: Beispiele



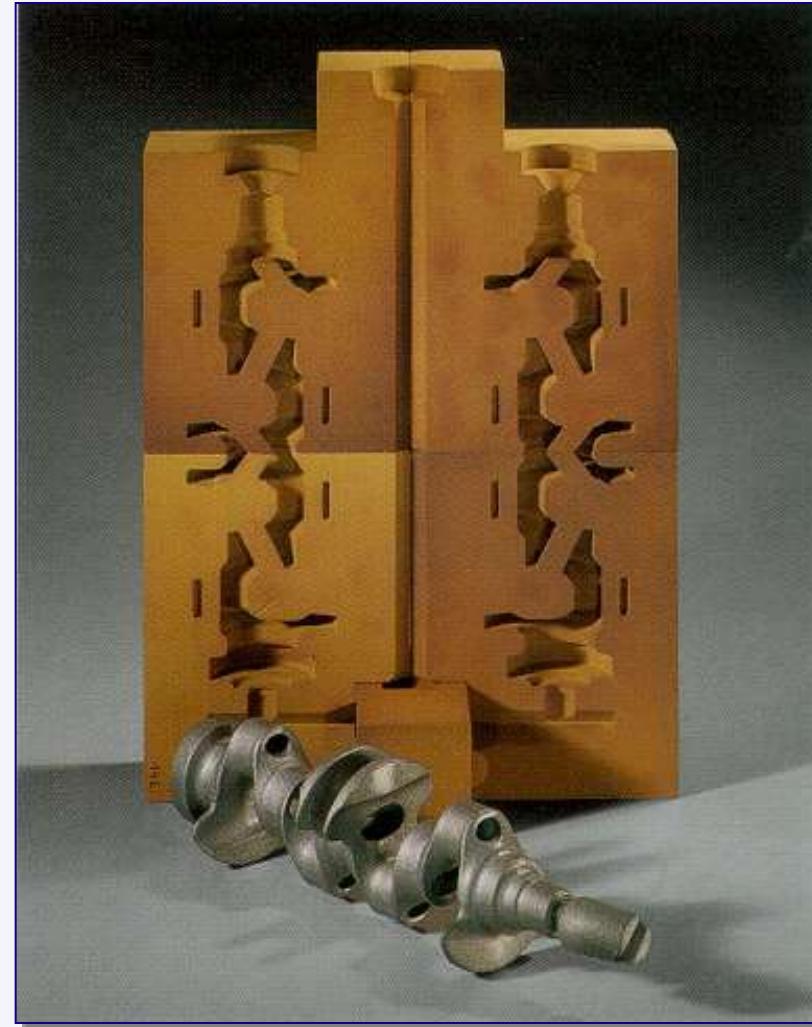
Komplexe Strukturen wie dieses Kernstück einer Kanalreinigungsdiise, die mit konventionellen Werkzeugen nur sehr aufwendig oder möglicherweise überhaupt nicht zu fertigen wäre, sind mit Laser-Sinter-Systemen problemlos herzustellen.



Gegossenes Einzylinder-Motorgehäuse aus Aluminium mit den entsprechenden lasergesinterten Formen und Kernen, einschließlich des in CAD konstruierten Angußsystems.

Selective Laser-Sintering: Beispiele

Große Formen können in Segmenten gebaut und anschließend zusammengestellt werden, z.B. diese Form für zwei Kurbelwellen



Selective Laser-Sintering: Einblick in die DTM Sinterstation 2400 plus

Voraussetzung:

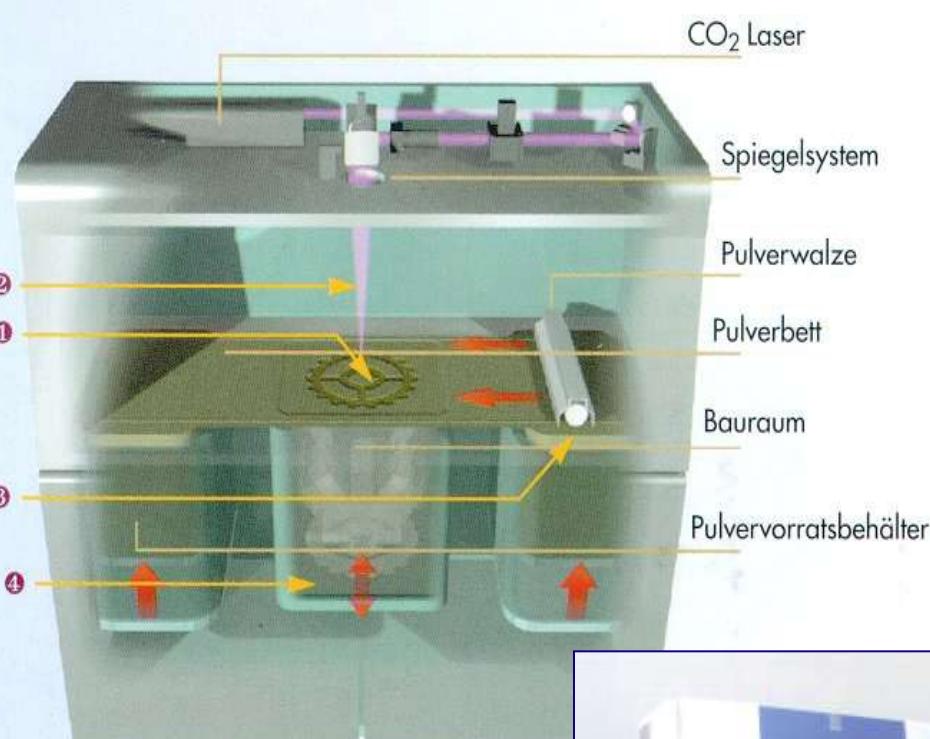
Erstellung eines dreidimensionalen CAD-Datensatzes im genormten STL-Format.

Der Prozeß

- ① Zu Beginn des SLS Prozesses wird eine dünne Schicht eines aufschmelzbaren Werkstoffes auf einer in z-Richtung verfahrbaren Arbeitsplattform aufgebracht.
- ② Die CAD-Daten werden rechnerisch in zweidimensionale Querschnitte einer festgelegten Schichtstärke zerlegt. Mit diesen Daten wird ein Laserstrahl so gesteuert, daß auf der Oberfläche der bis knapp unter den Schmelzpunkt erhitzen Pulverschicht ein thermisches Abbild des Querschnitts gezeichnet wird. Die Energiezufuhr versintert den abgebildeten Bereich zu einer geschlossenen Schicht. Der Laserstrahl ist so gesteuert, daß nur Bereiche, die zum späteren Bauteil gehören, aufgeschmolzen werden.
- ③ Durch einen speziellen Rollenmechanismus wird eine neue Pulverschicht aufgebracht.
- ④ Der Prozeß wird bis zur vollständigen Fertigstellung der Bauteile wiederholt. Es entstehen homogene, beliebig komplexe Teile. Das Pulverbett bildet eine maßgerechte stützende Struktur, wodurch Stützkonstruktionen überflüssig werden.

Nach dem Bauprozeß

Die fertigen Bauteile werden anschließend aus dem Bauraum entnommen und von überflüssigem Pulver befreit. Die Bauteile können je nach Anforderung z.B. durch Schleifen oder Lackieren nachbearbeitet werden.



Selective Laser-Sintering: Beispiele



Funktionsmuster eines Staubsaugergehäuses, gefertigt aus dem Polyamid-Werkstoff DuraForm PA, Abmessungen ca. 340 x 260 x 200



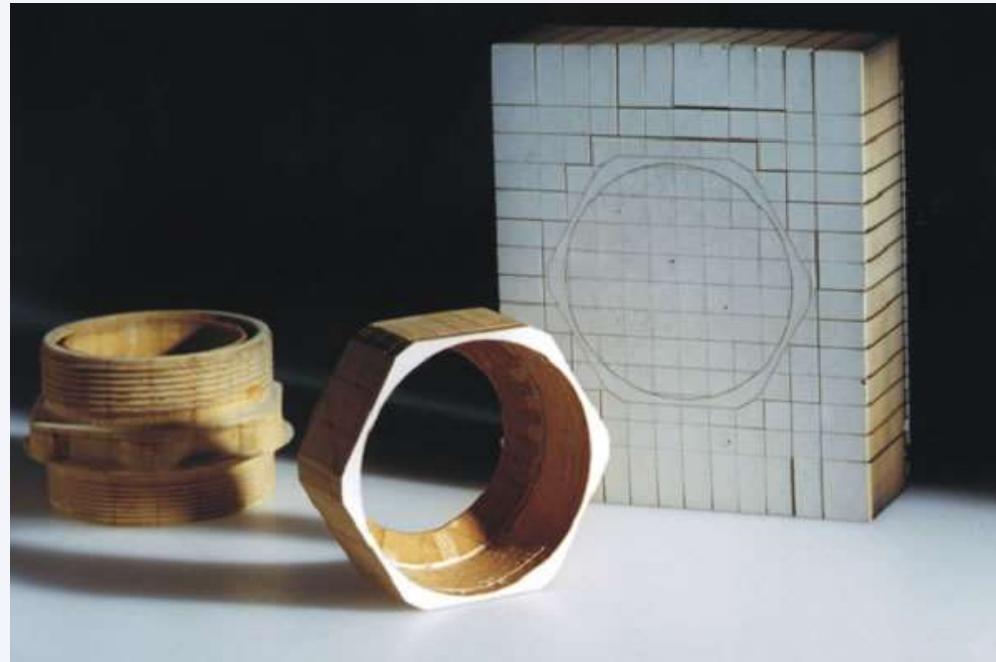
Sandkern und Abguß in Aluminium für Turbinentreibwerk, Fa. Boeing, Abmessungen ca. 430 x 350 x 305 mm³

Selective Laser-Sintering: Rapid-Tooling



*Metallische Werkzeugeinsätze für die Herstellung von Bohrmaschinengehäusen
im Kunststoffspritzguß, Abmessungen ca. $152 \times 317 \times 38 \text{ mm}^3$*

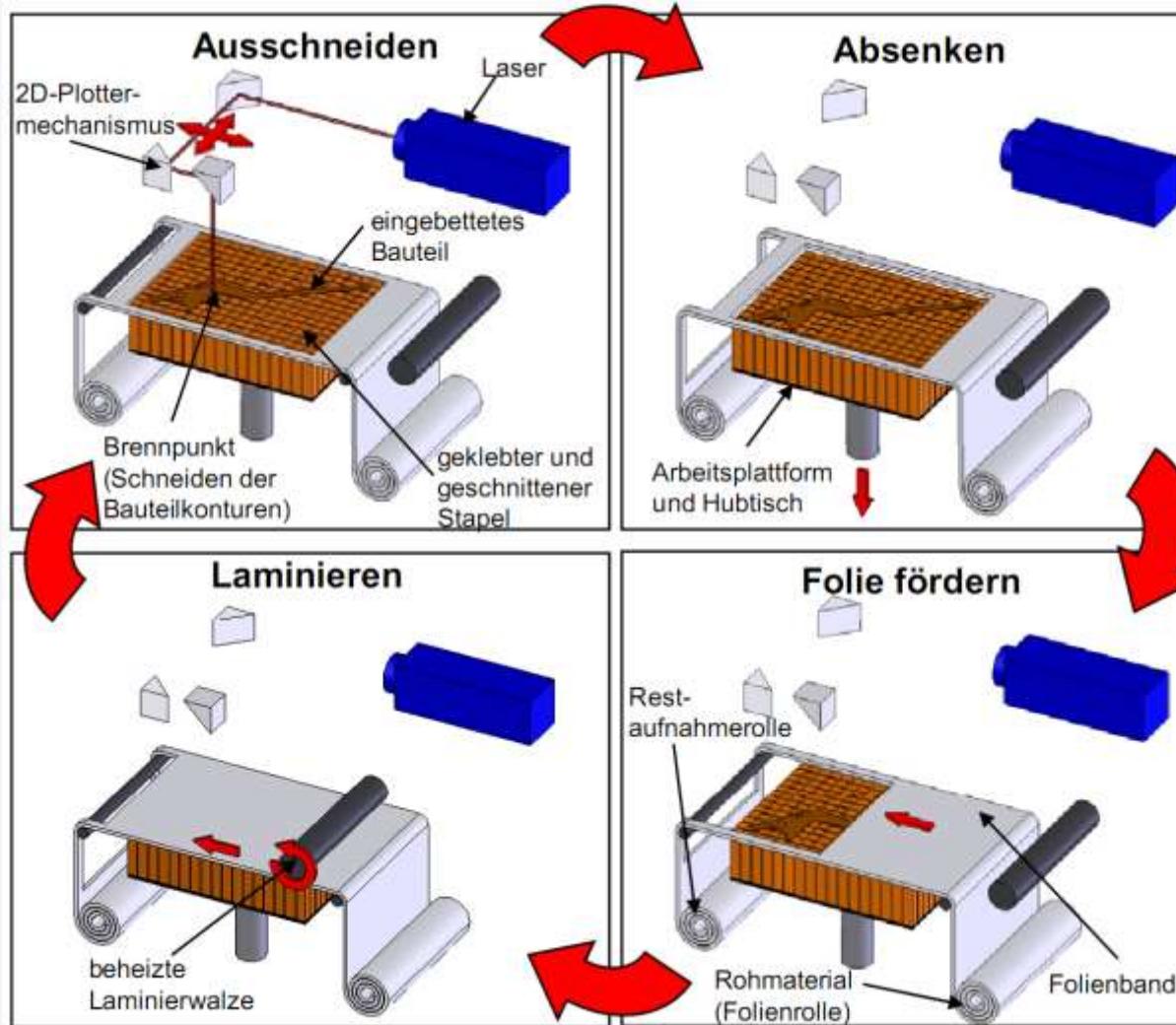
Laminated Object Manufacturing (Layer Laminate Manufacturing)



Verfahren	Ausschneiden von Konturen aus Folien oder Platten mittels Laser oder Messer. Verbinden der Schichten vorzugsweise durch Kleben
Materialien	Papier, Kunststoff, (Keramik), (Metall)
Vorteile	Papier: Hohe Druckbelastung, geringe Materialpreise
Nachteile	Geringere Genauigkeit aus Stereolithographie, Lasersintern und Extrusionsverfahren, richtungsabhängige mechanische Eigenschaften

Quelle: RTejournal

Laminated Object Manufacturing (Layer Laminate Manufacturing)

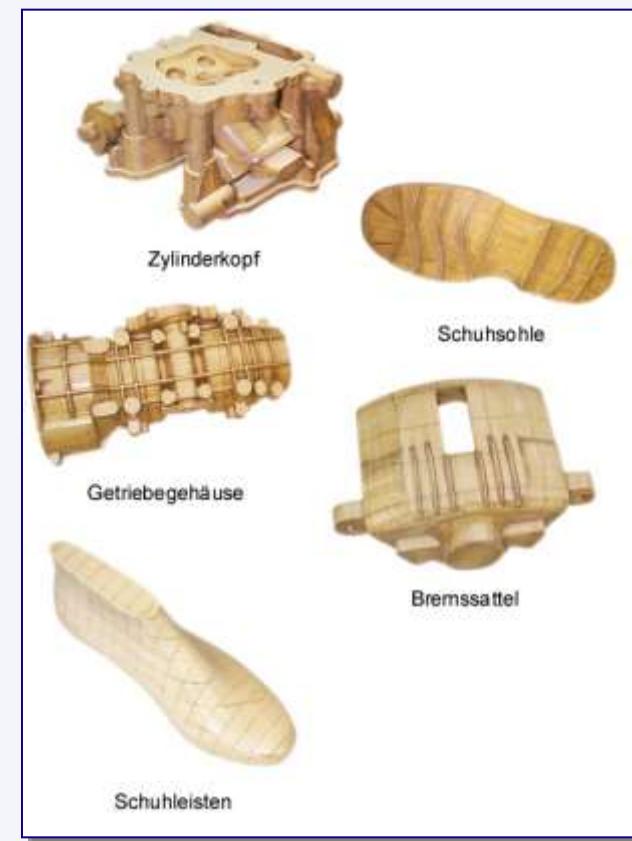


Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

Maschinenbeispiel: LOM-Anlagen der Firma Invenio



LOM-Beispiele



LOM: Metallguß und Silikon-Werkzeuge



Schwundmaße können getrennt nach xyz-Richtung, aber auch als Faktor eingegeben werden. Weitere Konstruktions- oder Programmierarbeiten sind nicht nötig. LOM™-Modelle eignen sich für die Anwendung als verlorener Kern im Schalenfeinguß. Sie dehnen sich unter Wärmeeinwirkung nicht aus und sprengen somit nicht die Keramikschale während des Ausbrennprozesses. Für kleine Stückzahlen werden Wachsmodelle aus LOM-Teilen hergestellt.

LOM-Modelle eignen sich aufgrund ihrer Dimensionsstabilität hervorragend zur Abformung in Silicon. Aus diesen Werkzeugen können dann kleine Serien von Polyurethaneilen hergestellt werden. LOM-Teile reagieren nicht mit Silicon und können so nachgearbeitet werden, daß die Oberfläche den Anforderungen an präzise Kunststoffteile entsprechen.



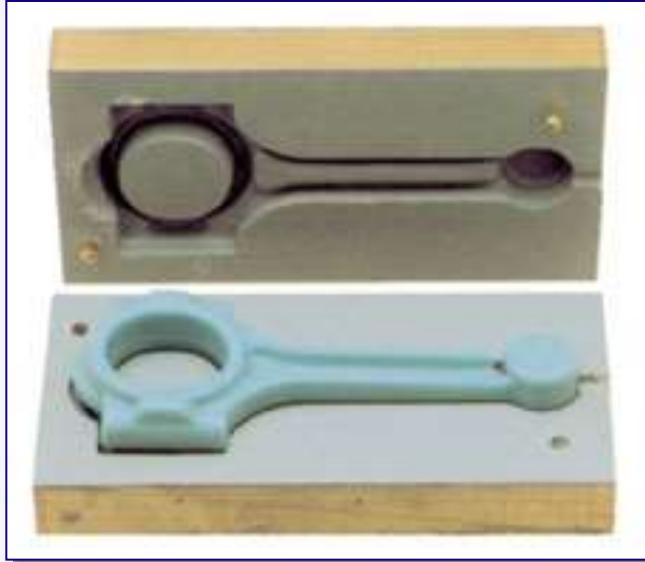
LOM: Spritzgußform und Sandguß

Die Genauigkeit und Stabilität von LOM-Teilen ermöglicht die Herstellung von Prototypwerkzeugen nach dem Metallspritzverfahren. Die Trennung kann direkt festgelegt werden und unterstützt so den Werkzeughersteller.



Der LOM-Prozeß kann auch zur Produktion von Kernen oder Kernformen benutzt werden. Durch die Verwendung von preiswerten Materialien können selbst große Teile besonders schnell und kostengünstig hergestellt werden.

LOM: Formen und Gipsabgußverfahren



LOM wird auch zum Herstellen von Kunststoff- oder Hartschaumteilen sowie Wachsmodellen benutzt. Die Formenhälften werden mit einem Trennmittel beschichtet und dann mit Polyurethan, Epoxydharz oder Wachs gefüllt. Eine Beschichtung der Formhälften mit Metall oder Keramik erlaubt die Herstellung von Spritzgußteilen.



LOM-Teile werden auch für Gipsabgußverfahren verwendet. Die Teile können wie Holz gefinished werden, um eine optimale Oberflächenstruktur zu erreichen.

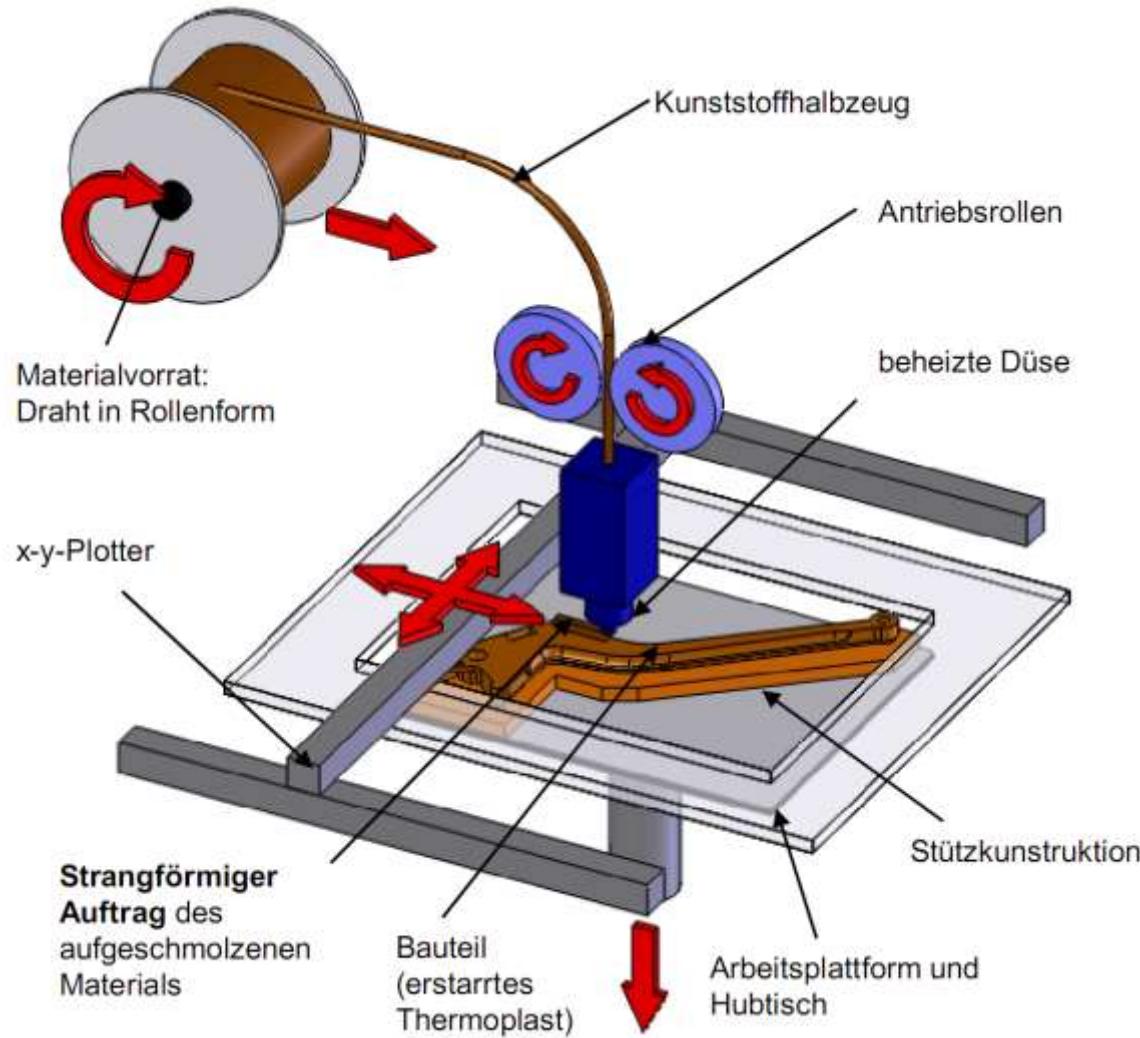
Fused Deposition Modeling (Fused Layer Modeling / Manufacturing)

Verfahren	Aufschmelzen von festen Kunststoffen (Draht oder Block) in einer beheizten Düse. Schichtaufbau durch Extrusion. Verfestigung durch Abkühlung. Stützen erforderlich
Materialien	Unterschiedliche Kunststoffe, z.T. nominell serienidentisch (ABS, PPSF)
Vorteile	Höhere mechanische und thermische Belastbarkeit als Stereolithographie
Nachteile	Rauhere Oberflächen, geringerer Detaillierungsgrad als Stereolithographie



Quelle: RTejournal

Fused Deposition Modeling (Fused Layer Modeling / Manufacturing)



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

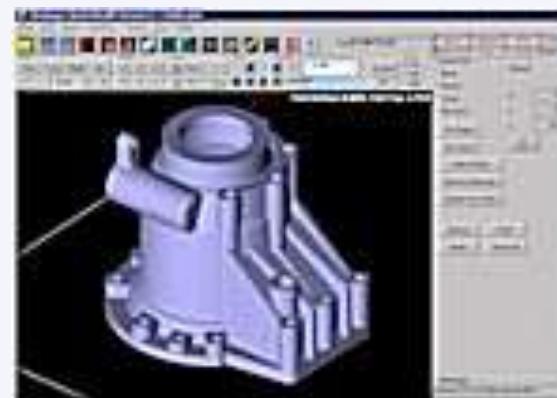
FDM: Arbeitsvorbereitung

1



Einlesen der STL-Daten

2



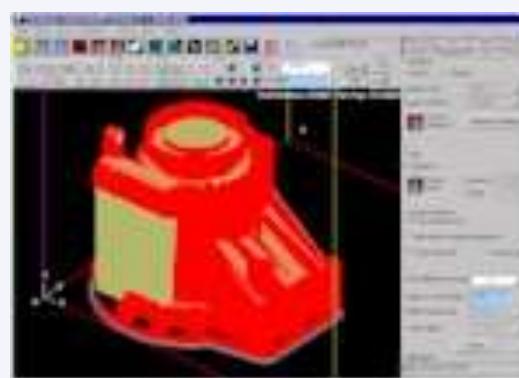
Festlegen der optimalen Baulage

3



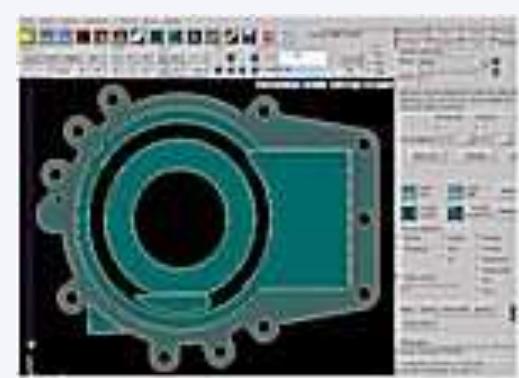
Schneiden des Modells in horizontale Ebenen (Slicen)

4



Automatisches Berechnen der Stützkonstruktionen

5



Berechnen der Verfahrwege

FDM: Maschinenbeispiele und Funktionsmodelle



FDM 8000

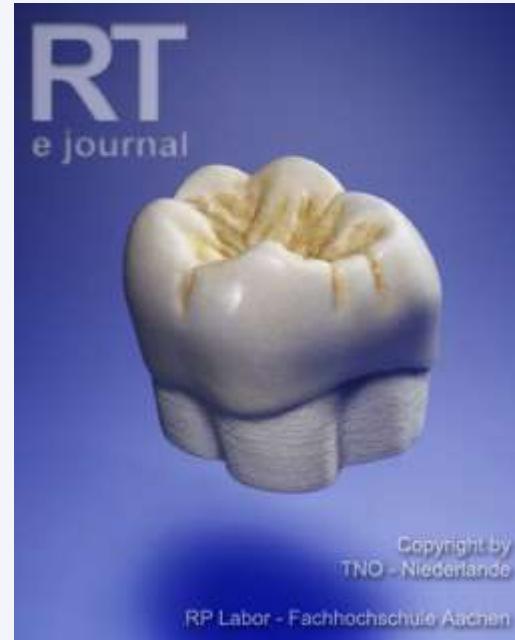
Felge erstellt mit der FDM 8000



Funktionsmodelle aus ABS.



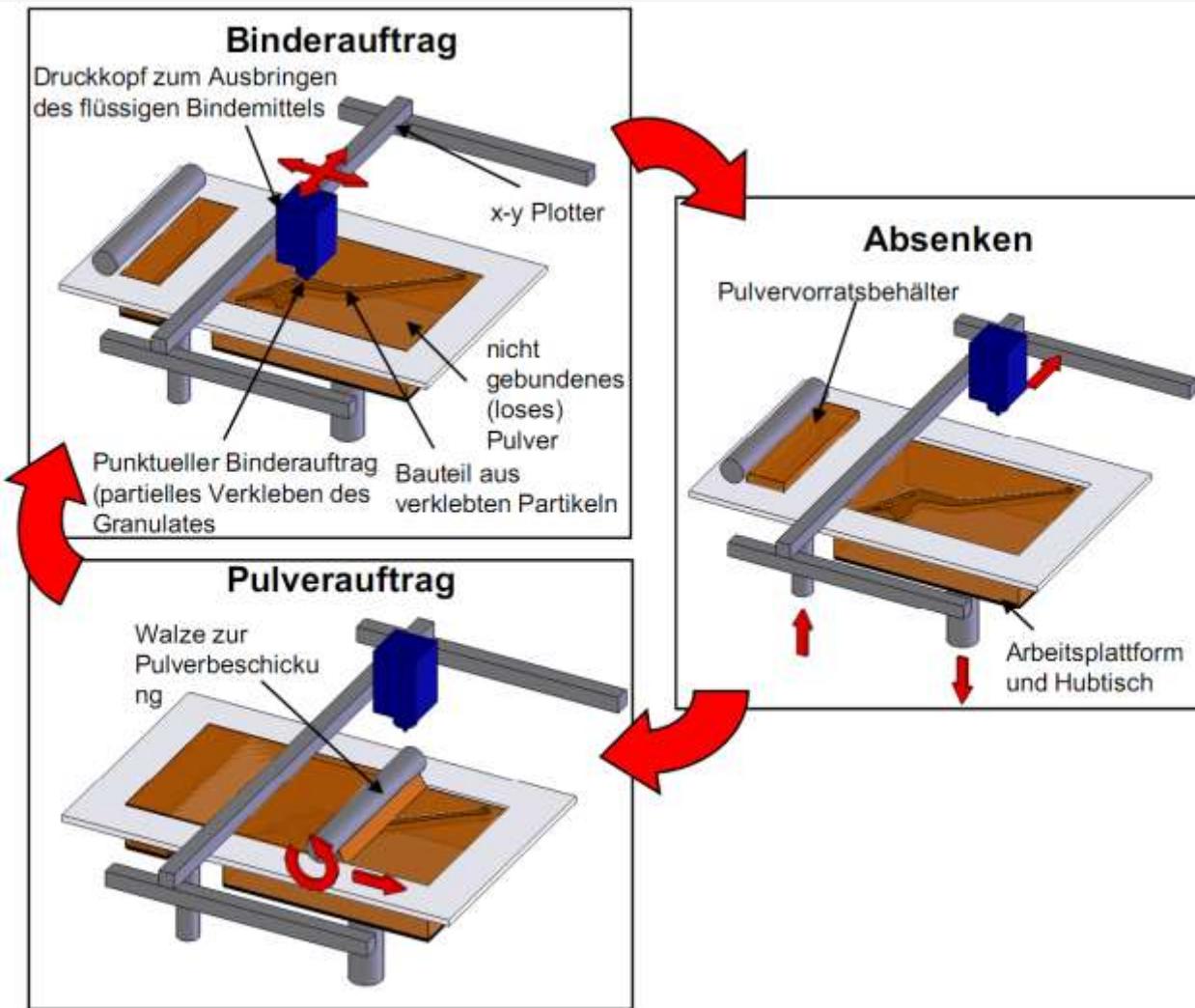
3D Printing



Verfahren	Verfahren Einspritzen von Binderflüssigkeit in ein Pulverbett. Mechanische Belastbarkeit durch Infiltrieren. Keine Stützen erforderlich
Materialien	Stärke / Wasser, Gips-Keramik/Wasser, Metall
Vorteile	Schnell und preiswert, kalter Prozess, farbige Modelle möglich
Nachteile	Geringe Detaillierung, raue Oberflächen. Stärke und Gips+Infiltration: geringe Belastbarkeit, undefinierte mechanische Eigenschaften

Quelle: RTejorunal

3D Printing

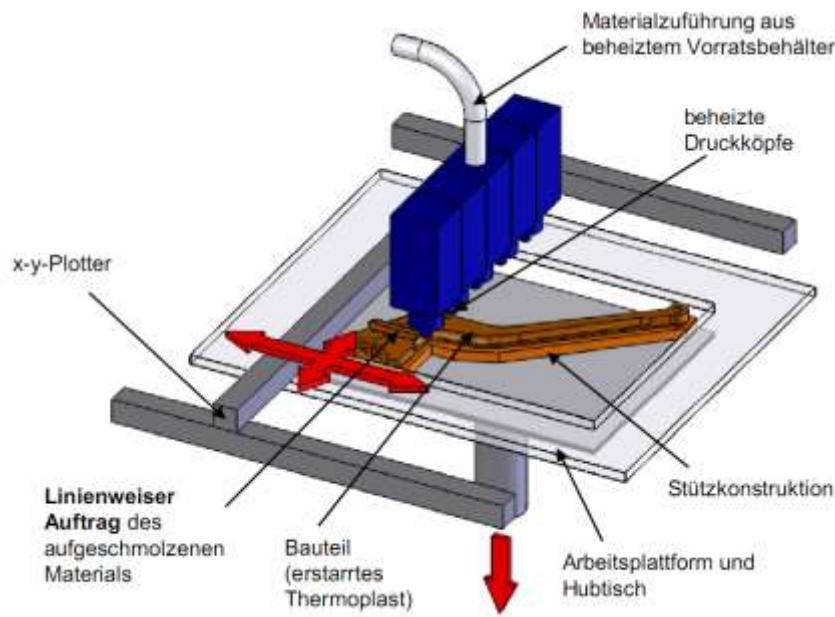


Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

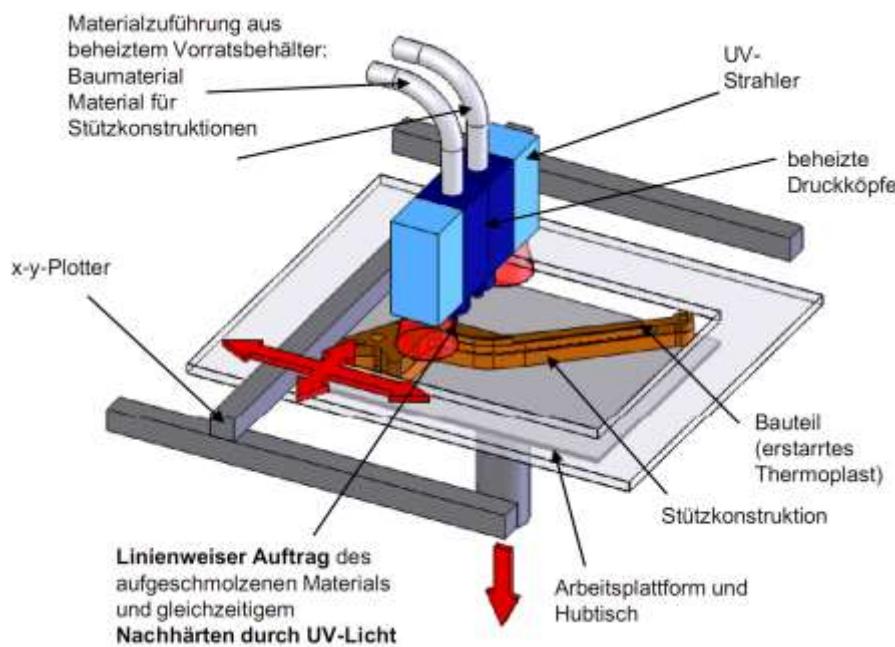


Multi Jet Modeling / Poly Jet Modeling

Multi Jet Modeling



Poly Jet Modeling



Grundprinzip

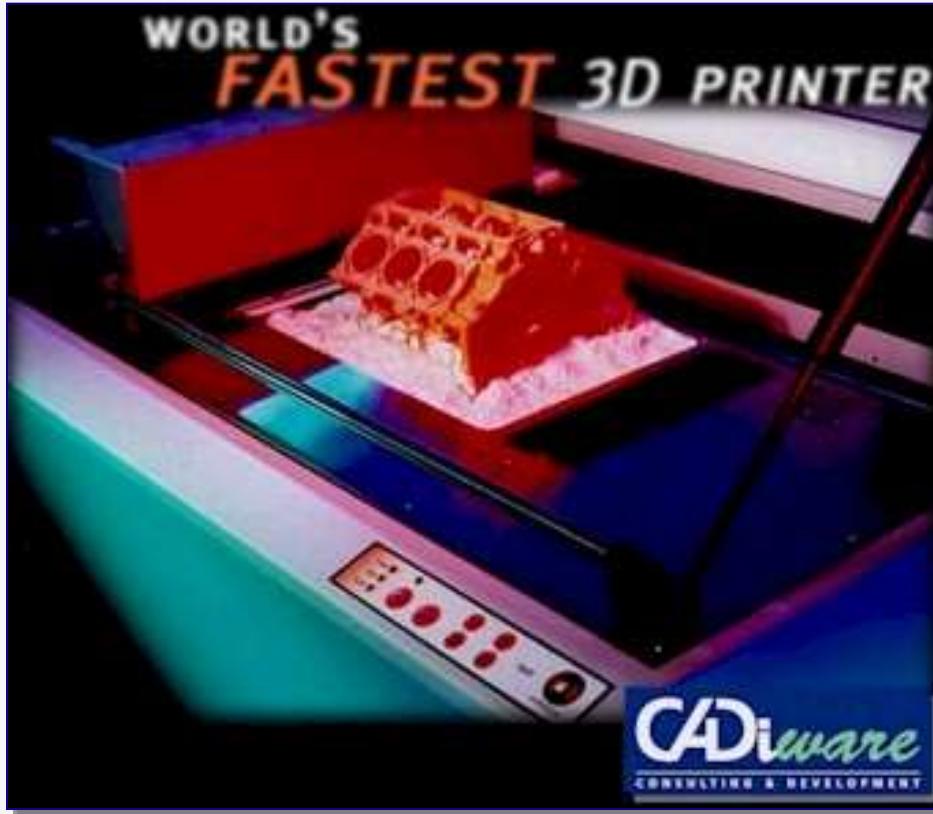
Schichtweiser Bauprozess durch Schichtweiser Bauprozess durch Aufschmelzen und linienweises Auftragen thermoplastischen Materials durch beheizte Düsen; unmittelbares Aushärten des aufgebrachten Materials

Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

Grundprinzip

Schichtweiser Bauprozess durch linienweises Auftragen von Photopolymer-Flüssigharzen (Polymere mit Photoaktivatoren) mit unmittelbarem Aushärten durch UV-Strahler Strahler.

3D Printing-Anlage der Firma CADiware

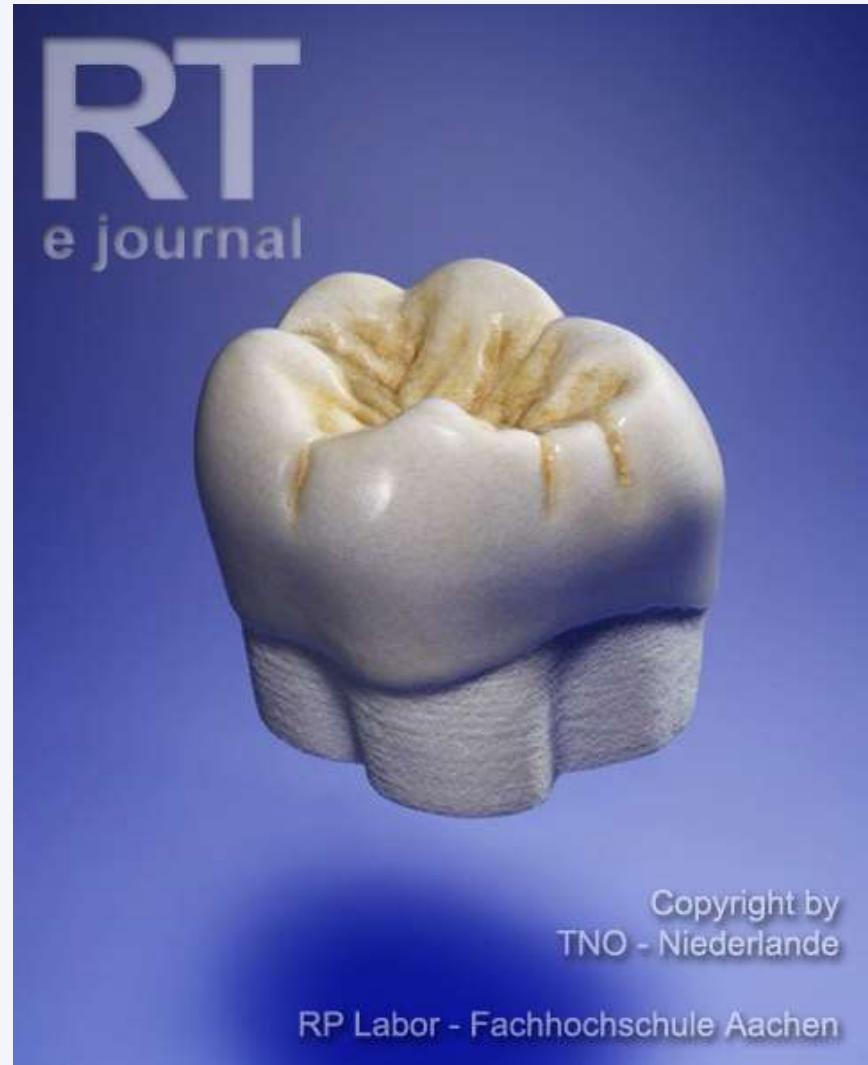


CADiware: Z402 3D Printer

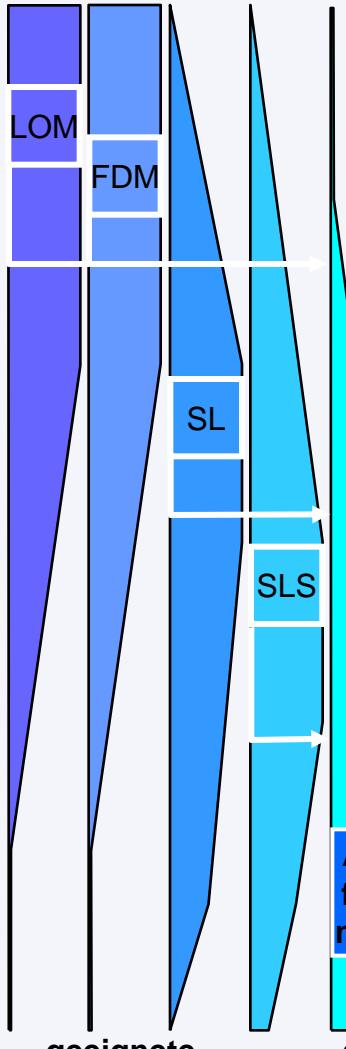
3D Printing: Beispiele (CADIware)



3D Printing: Beispiele



Zuordnung von Rapid Prototyping Verfahren



Propotionsmodell

Darstellung der äußereren Form und der wichtigsten Proportionen

Ergonomiemodell

Darstellung wichtiger Details hinsichtlich der Bedin- und Benutzbarkeit des Produkts

Designmodell

möglichst getreue Darst. des äußereren Erscheinungsbildes des Endproduktes

Funktionsmodell

Darstellung ausgewählter bis sämtlicher wesentlichen Funktionen

Prototyp

weitgehende bis vollständige Übereinstimmung mit dem Endprodukt

Vorserienbauteil

weitestgehende bis vollständige Übereinstimmung mit dem Endprodukt

Muster

Test sämtlicher Produkteigenschaften an einem aus der Serie entnommenen Endprodukt

Entscheidungsmatrix

	<i>Stereolitho-graphie</i>	<i>Selektives Laser Sintern</i>	<i>LOM</i>	<i>FDM</i>
Ausgangs material	Photopolymere (Acryl- und Epoxidharze)	Wachse; Thermoplaste (PA, PC)	Folien (Papier, Kunststoff)	Wachse Thermoplaste/TPE (PA, PE, ABS)
Generierbare Teilgröße	600 x 600 x 500 mm ³	350 x 350 x 380 mm ³	550 x 800 x 500 mm ³	300 x 330 x 300 mm ³
Maßtreue	0,02 - 0,1 mm	0,05 - 0,1 mm	0,15 mm	0,15 mm
Abkühl-/ Aushärtezeit	keine Abkühlzeit, Aushärtezeit bis 30 min.	geometrie-, masseabhängig, (ca.3-5h)	geometrie-abhängig	weder Abkühl- noch Aushärtezeiten
am Markt erhältlich seit	1987	1991	1990	1991
Anlagen-kosten	ab 360 TDM	ab 600 TDM	ab 240 TDM	ab 300 TDM
relative Modellkosten ¹⁾	mittel	mittel - hoch	gering - mittel	gering - mittel

1) Die Kosten sind sehr stark von der Anzahl, der Größe und der Komplexität der Modelle abhängig.