

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 wirtschaftlicher 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

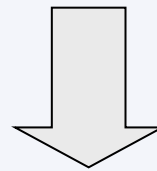


Das industrielle Produktionssystem

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

- Stoffherzeugung
- Wandlung von physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften

Fertigungstechnik

- Formgebung von Bauteilen
- Montage zu gebrauchsfähigen Erzeugnissen

Fördertechnik

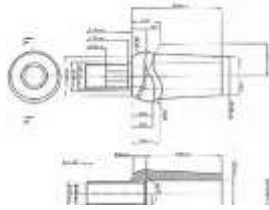
- Transport und Handhabung von Gütern unter zeitlicher und örtlicher Bestimmung

Informationstechnik

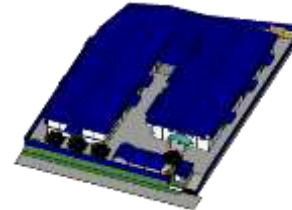
- Informationserstellung
- Informationsverarbeitung
- Informationsverteilung

Elemente eines Produktionssystems

Informationen



Räume



Energie



Personal



Produktionsprozess

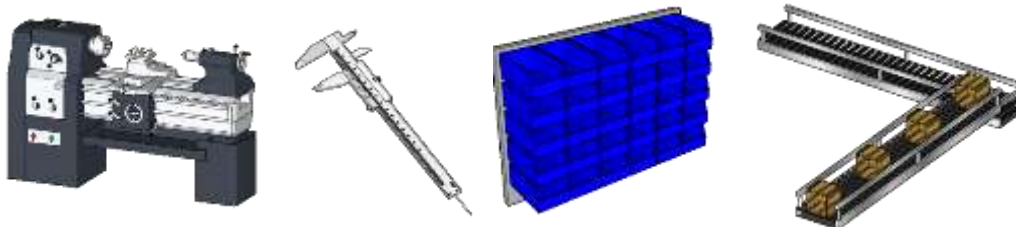
- Rohmaterialien
- Halbzeuge
- Bauteile

Hilfsstoffe

- Fertigteile
- Produkte

Abfälle

Fertigungs-, Mess-, Lager- und Transportmittel



Nach: Engelbert Westkämper / Hans-Jürgen
Warnecke: Einführung in die
Fertigungstechnik. 7. Auflage,
Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2006.

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.

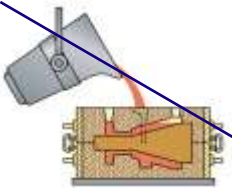
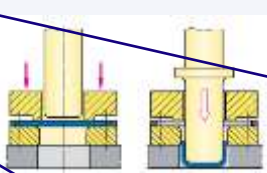

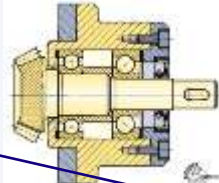
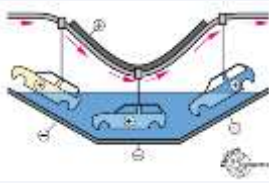
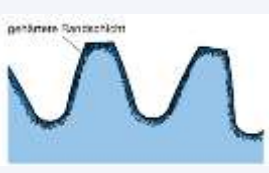
Fertigen

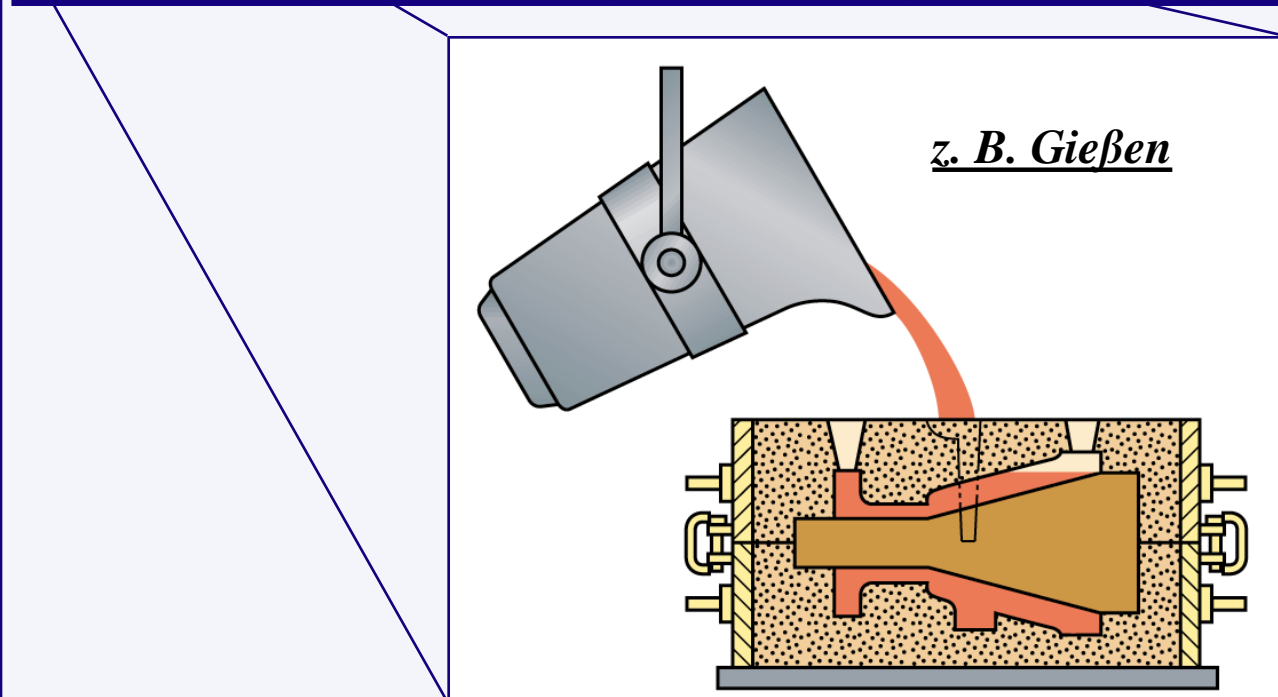
Fertigen ist das Erzeugen von Werkstücken geometrisch bestimmter Gestalt (*Grundbegriffe*: Maschine, Werkstück, Werkzeug). Die Fertigung läuft an der Wirkstelle zwischen Werkzeug und Werkstück ab. Energie und Formdefinition werden von der Maschine über das Werkzeug auf das Werkstück übertragen.

Einteilung der Fertigungsverfahren

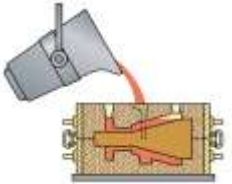
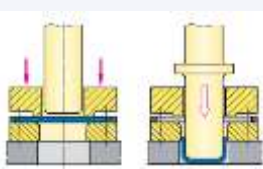

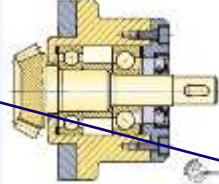
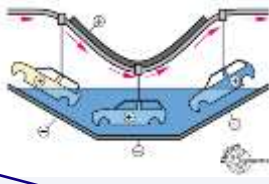
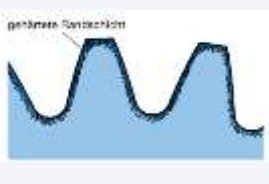
Einteilung der Fertigungsverfahren					
nach DIN 8580	Zusammenhalt Schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren	
	Hauptgruppe 1 Urformen Formschaffen	Formändern			Hg 5: Beschichten
Hg 2: Umformen		Hg 3: Trennen	Hg 4: Fügen		
		Hg 6: Stoffeigenschaft ändern			
		Umlagern	Aussondern	Einbringen	
		von Stoffteilen			

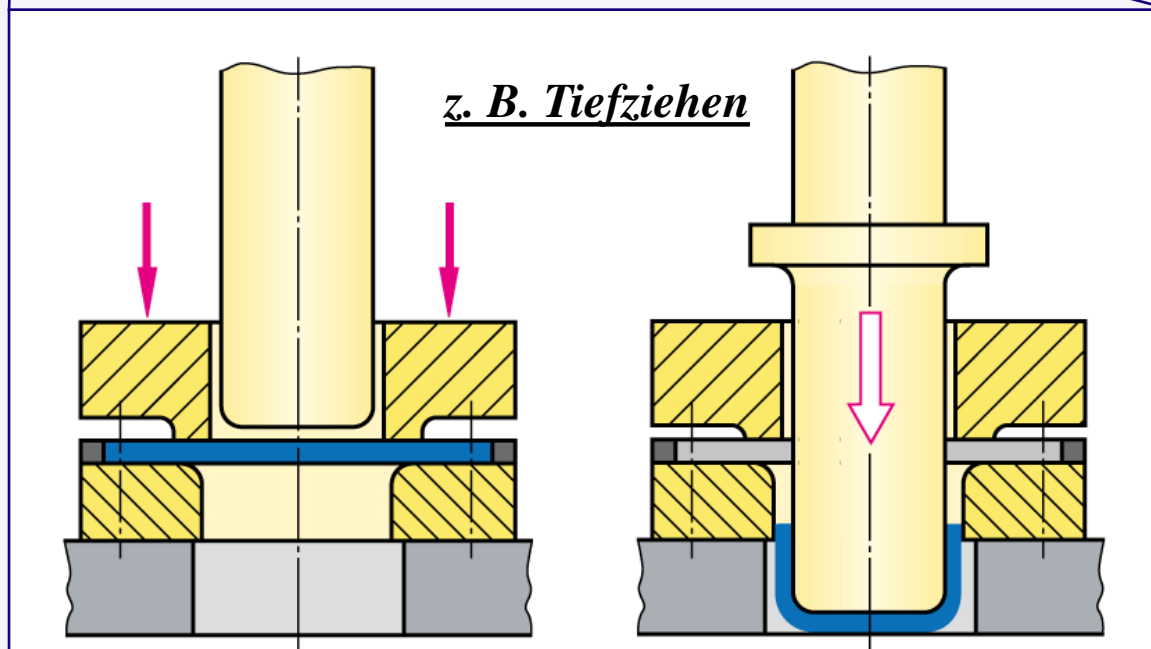
Gliederung der Fertigungsverfahren

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

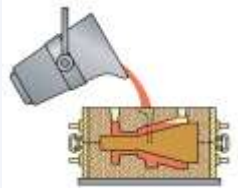
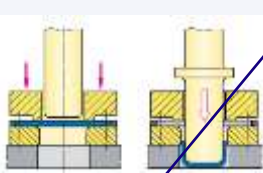

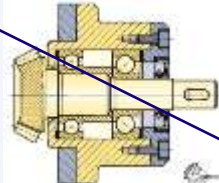
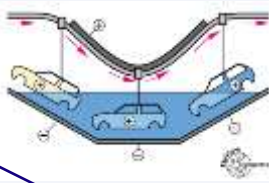
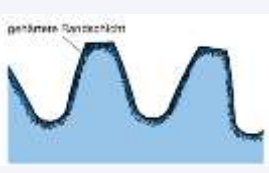


Gliederung der Fertigungsverfahren

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



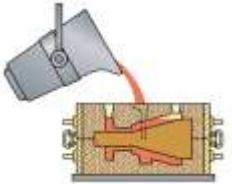
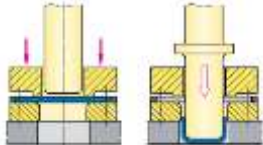

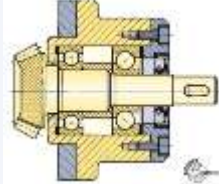
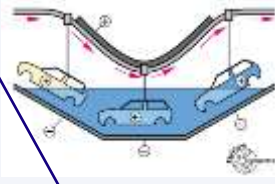
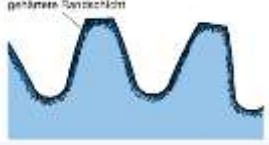
Gliederung der Fertigungsverfahren

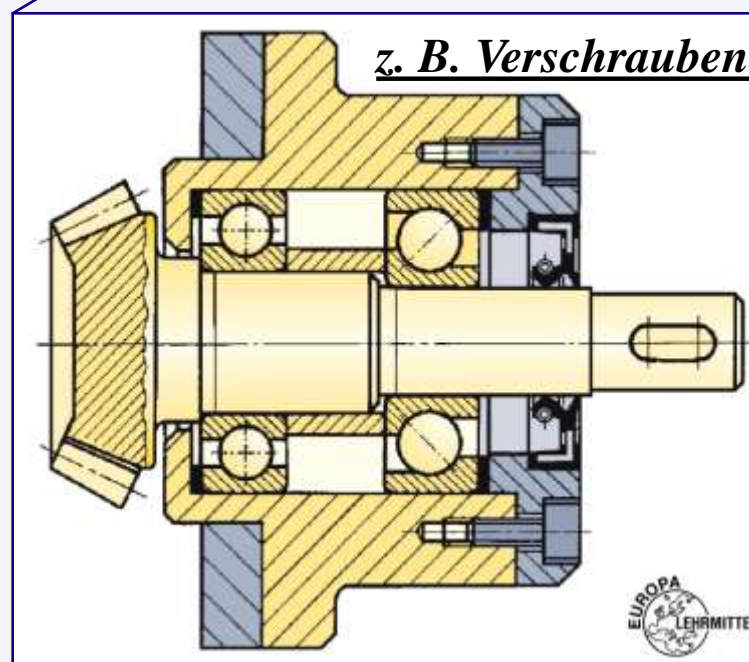
1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					

z. B. Fräsen

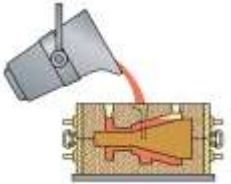
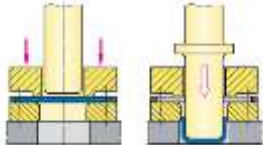

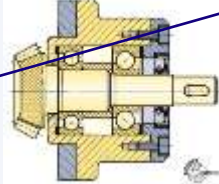
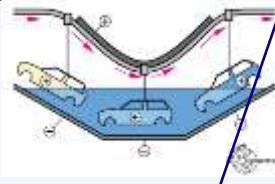
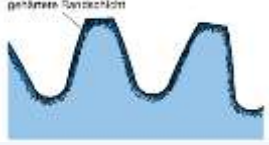


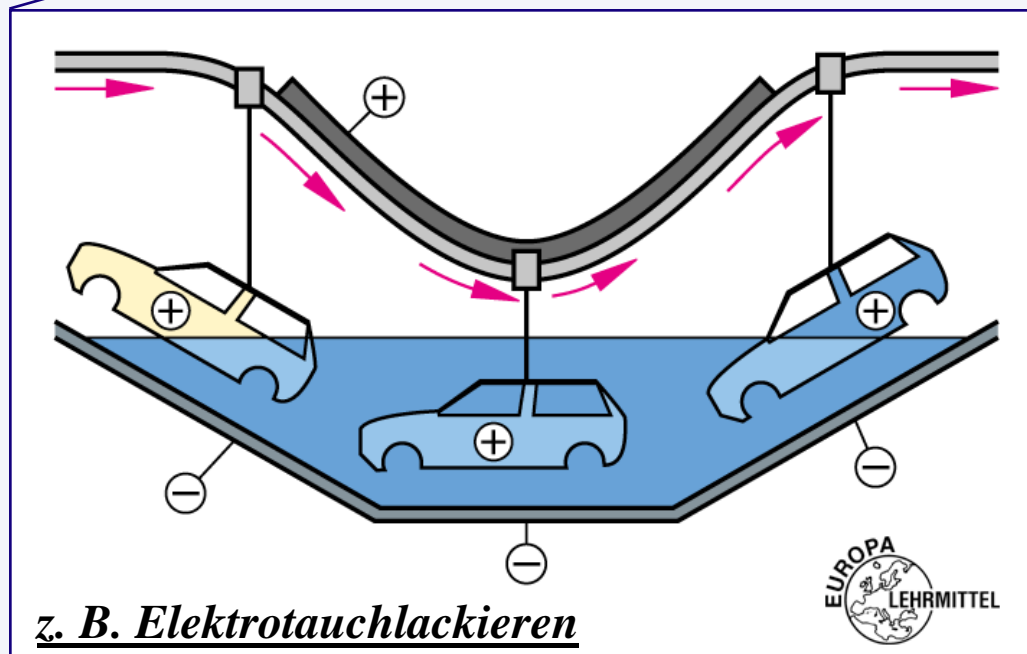
Gliederung der Fertigungsverfahren

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



Gliederung der Fertigungsverfahren

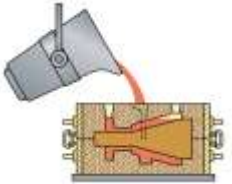
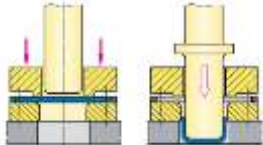

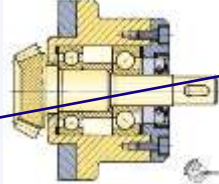
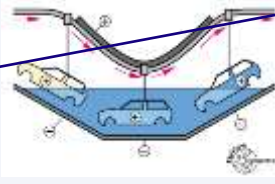
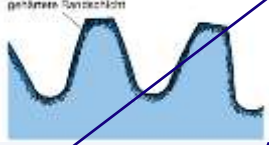
1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaft ändern
					

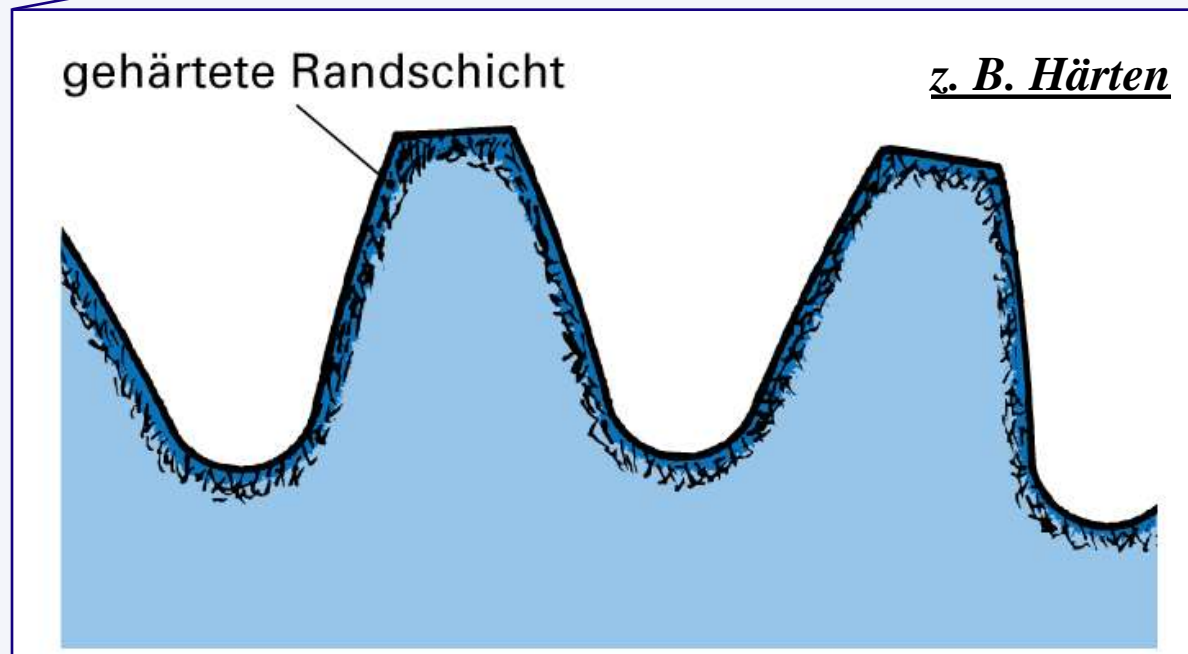


z. B. Elektrottauchlackieren



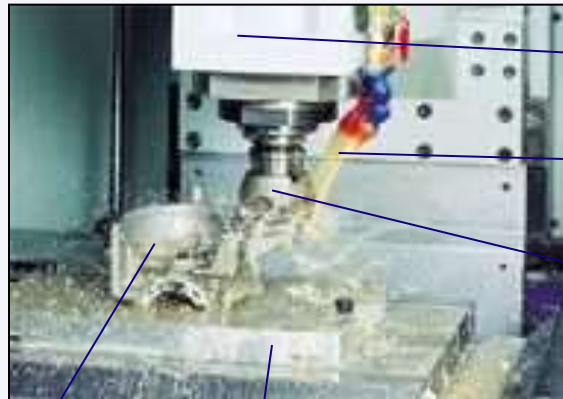
Gliederung der Fertigungsverfahren

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



Einschub: Fräsen und Bohren

Der Fräsprozeß



Z-Schlitten

Kühlmittel

Fräser

Quelle: WZM-Markt

Werkstück

Maschinentisch
(Kreuztisch für x-
und y-Bewegung)

Frästeil



Hinterschnidungen sind nicht
möglich! (Quelle: Mastercam)

Fräsen und Bohren



Vertikalfräsen

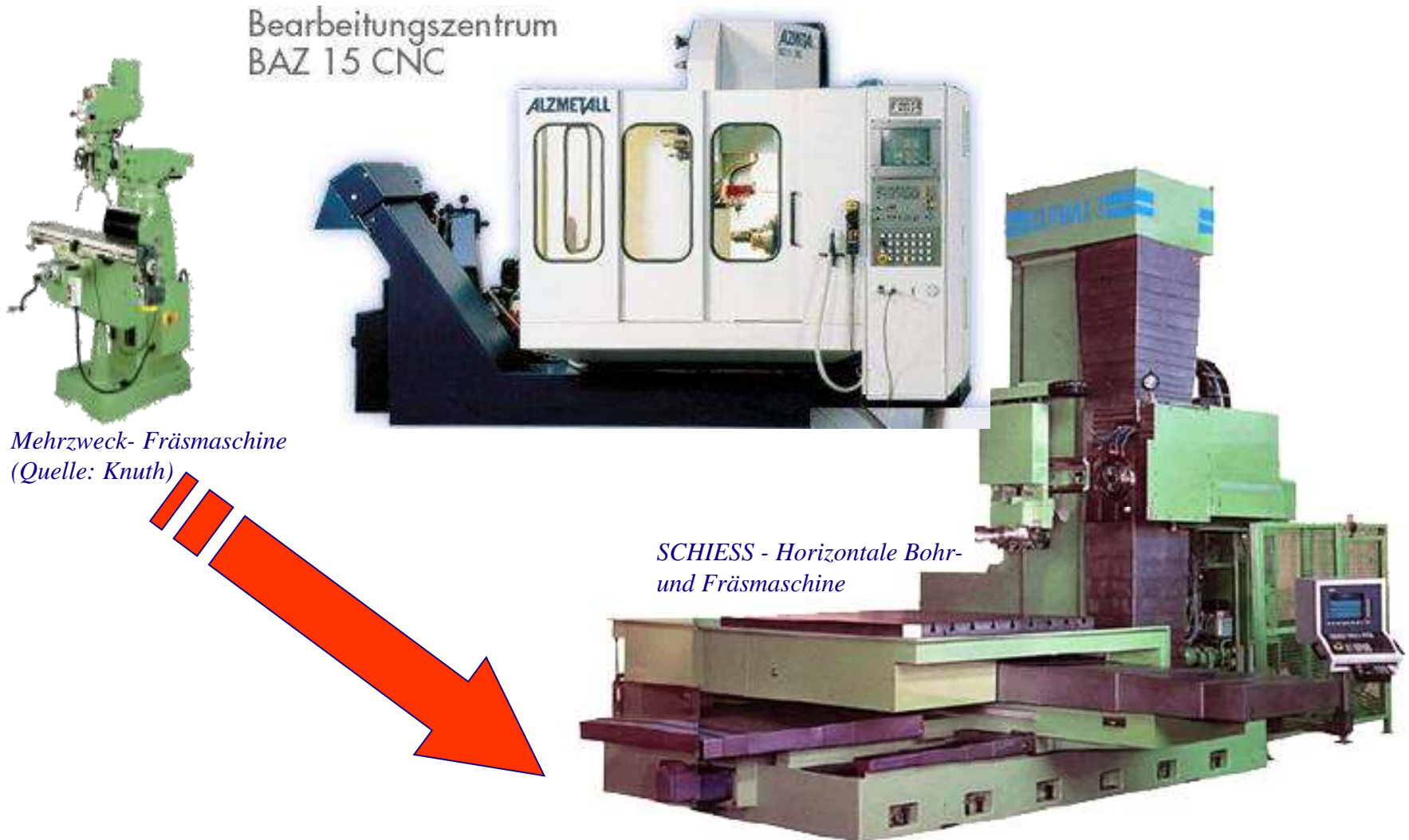
Quelle: Baxmeier



Schrägbohren
(45 Grad)

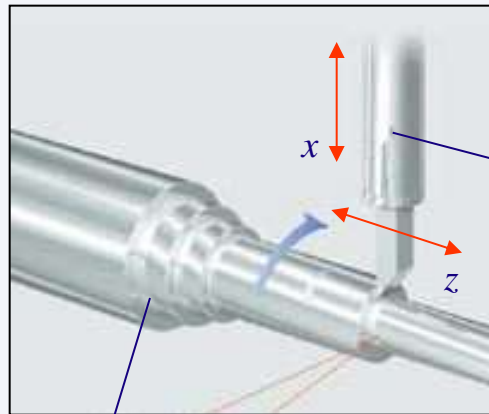
Quelle: Baxmeier

Fräsen und Bohren: Maschinenbeispiele



Einschub: Drehen

Der Drehprozeß



Werkzeug
(Drehmeißel)

Quelle: Keyence

Werkstück



Werkzeugaufnahme
mit Werkzeug

Werkstück

Quelle: Berufenet / Arbeitsamt

Werkstückaufnahme

Drehteil

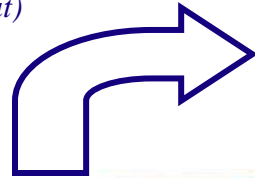


Drehteile sind stets
rotationssymmetrisch!

Drehen: Maschinenbeispiele

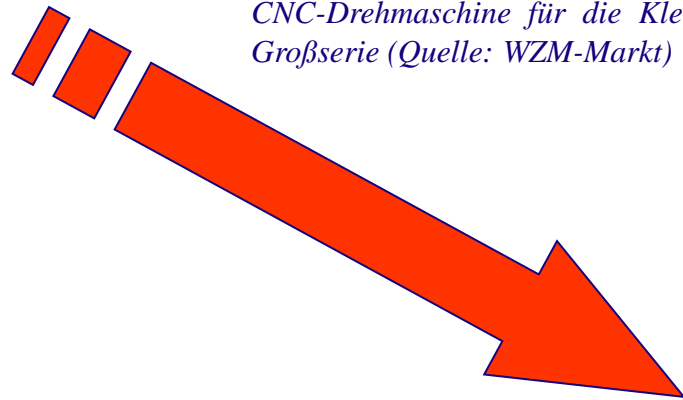


*Feinmechaniker-Drehmaschine
(Quelle: Unimat)*



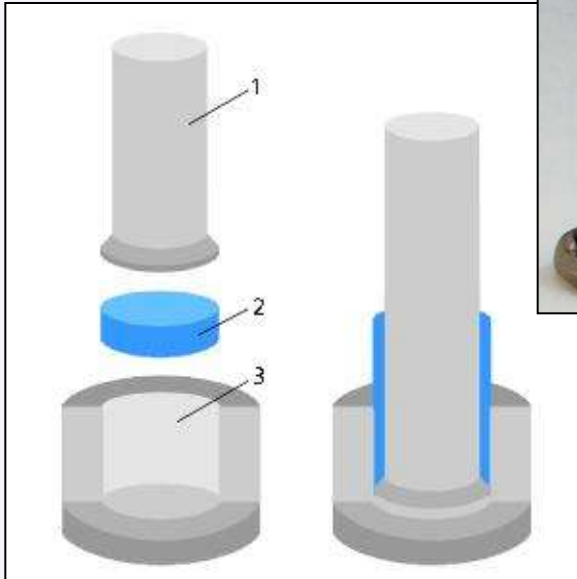
*CNC-Drehmaschine für die Klein- und
Großserie (Quelle: WZM-Markt)*

Schwerdrehmaschine (Quelle: Surplex)



Einschub: Umformen (ausgewählte Verfahren)

Fließpressen

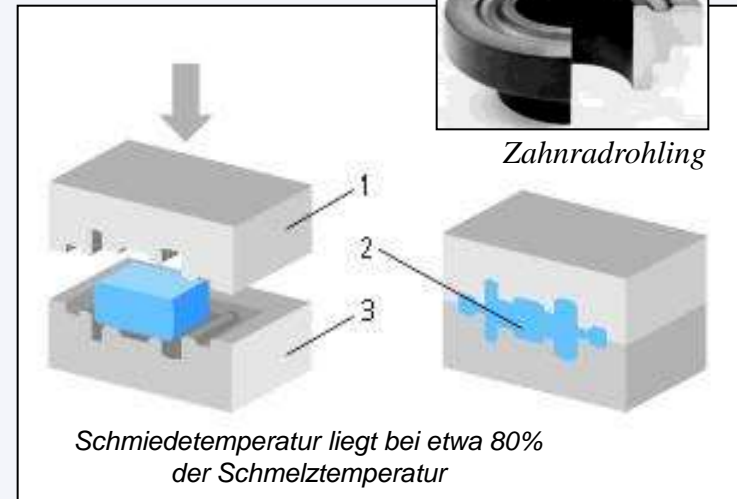


1 Stempel 2 Werkstück 3 Pressform



Schweißbolzen

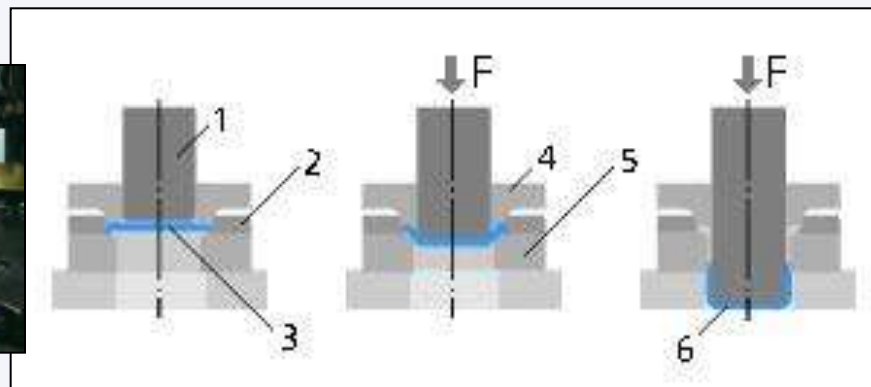
Gesenkschmieden



1 Obergesenk 2 Werkstück 3 Untergesenk

Tiefziehen

Gewindehülsen



1 Ziehstempel
2 Aufnahme
3 Blechzuschnitt
4 Niederhalter
5 Ziehmatrize
6 Werkstück

Umformen: Maschinenbeispiele (mechanische Pressen)



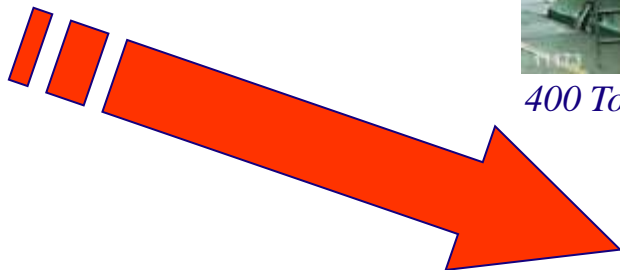
60 Tonnen



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
Strangguß- maschinen	Pressen	<u>Zerteilende Maschinen</u>	Schweiß- maschinen	Galvanisier- maschinen	Härteöfen
Druckguß- maschinen	Hämmer	- Scheren	Löt- maschinen	Lackier- maschinen	PVD-Anlagen
Spritzguß- maschinen	Wälzmaschinen	- Schneidpressen			CVD-Anlagen
Schleuderguß- maschinen	Ziehmaschinen	...	Niet- maschinen	Plattier- maschinen	Ionen- beschleuniger- anlagen
...	...	<u>Spanende Maschinen</u>	Klebe- maschinen	PVD-Anlagen	
		- Drehmaschinen		CVD-Anlagen	
		- Fräsmaschinen	Schraub- maschinen		
		- Läppmaschinen			
		...			
		<u>Abtragende Maschinen</u>			
		- Erodiermaschinen			

Definition einer Werkzeugmaschine

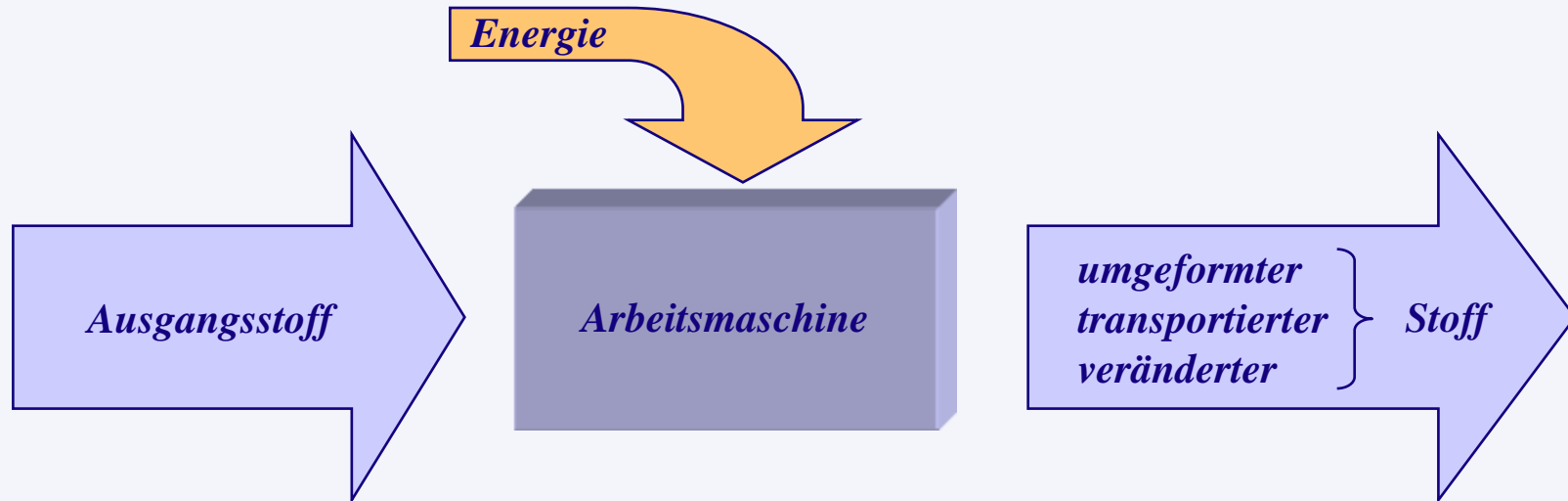
Fertigungsmaschinen zum Umformen, Trennen und Fügen werden nach DIN 69651 als Werkzeugmaschine bezeichnet.



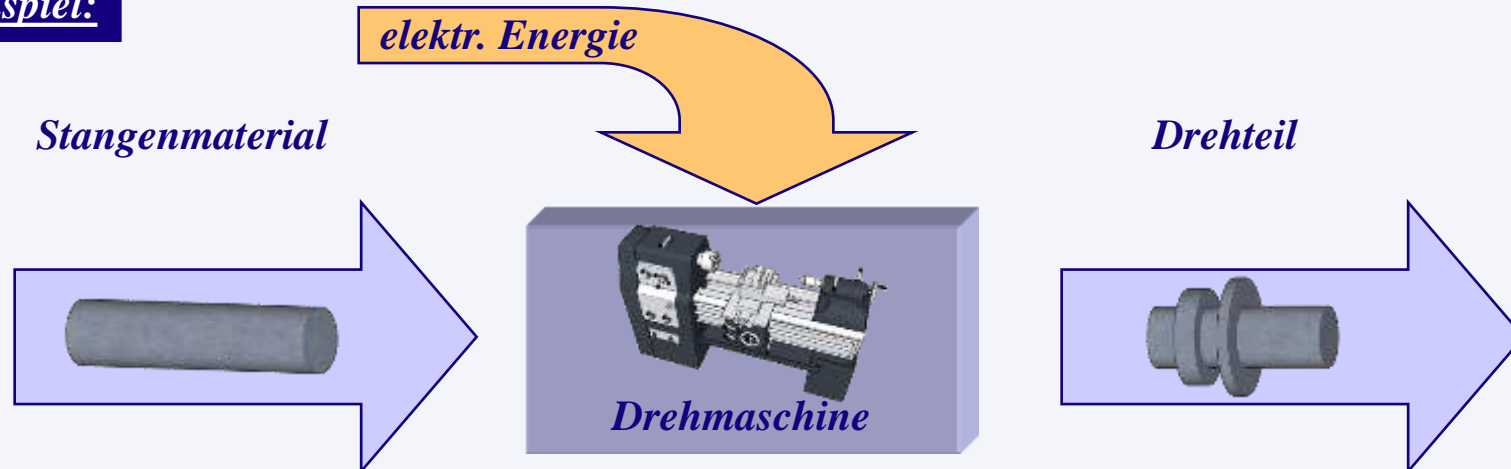
Werkzeugmaschinen werden in der Literatur definiert als „mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen“.



Die Arbeitsmaschine / Werkzeugmaschine als technisches System



Beispiel:



Quelle: nach Europa Fachbuchverlag

Bedeutung der Werkzeugmaschinen (WZM)

Werkzeugmaschinen

*kein technisches
Produkt ist ohne WZM
herstellbar*

*haben
Schlüsselqualifikationen
in der industriellen
Produktionstechnik*

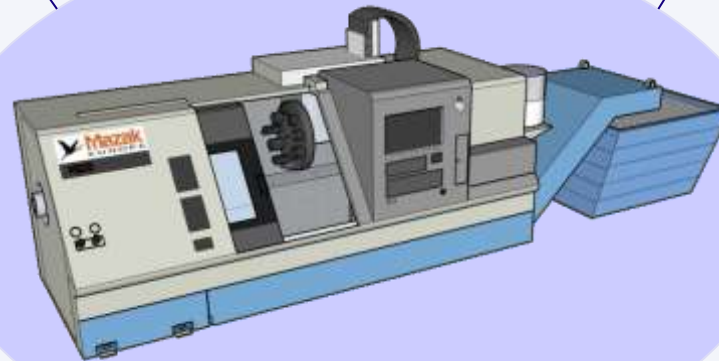
*Impulsgeber für
Rationalisierung und
Automatisierung der
Produktion*

*sind Schrittmacher für
Strukturwandel und
technischen Fortschritt*

*tragen zur Sicherung
des Industriestandorts
Deutschland bei*

*Innovationen im WZM-
Bau haben weitreichende
multiplikative Wirkung*

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



Quelle: www.mazak.de

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		%-Änderung zum Vorjahr %-change to previous year	Umsatz Mrd. EUR Turnover bn EUR		%-Änderung zum Vorjahr %-change to previous year
		2011	2012		2011	2012	
Maschinenbau <i>Mechanical engineering</i>	6.227	931	971	4,3	201	207	3,1
Elektroindustrie ¹ <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

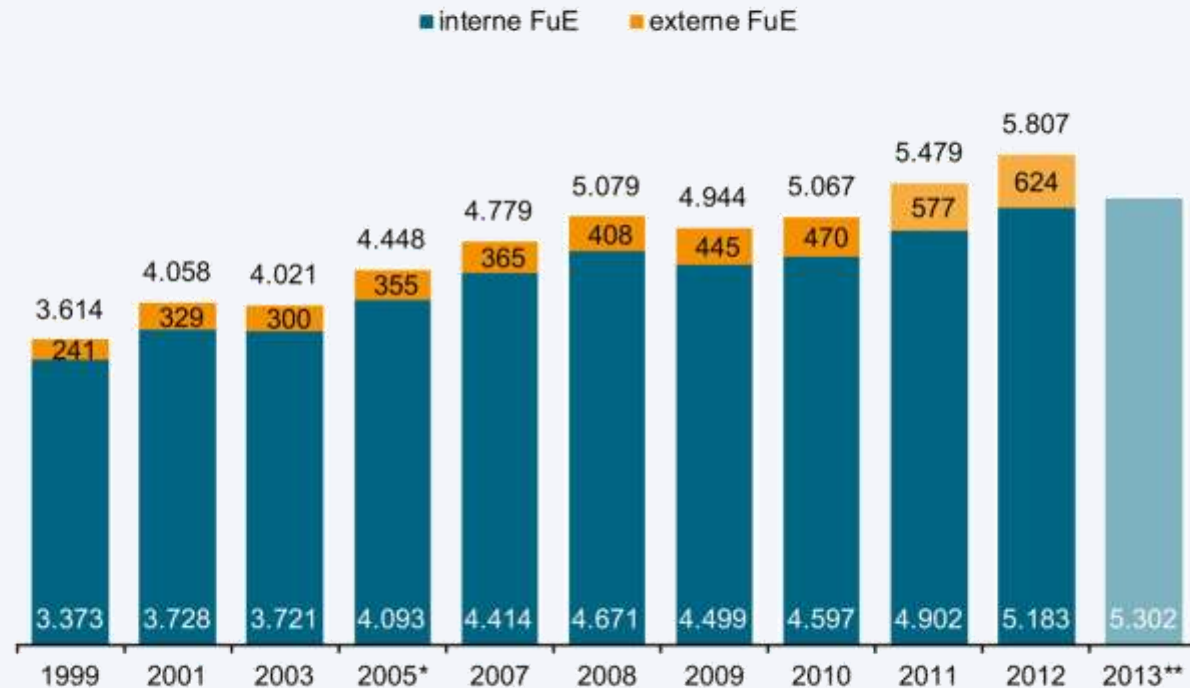
Quelle/Source: Statistisches Bundesamt, ZVEI, VDMA
1) ohne Datentechnik/ without information technology

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

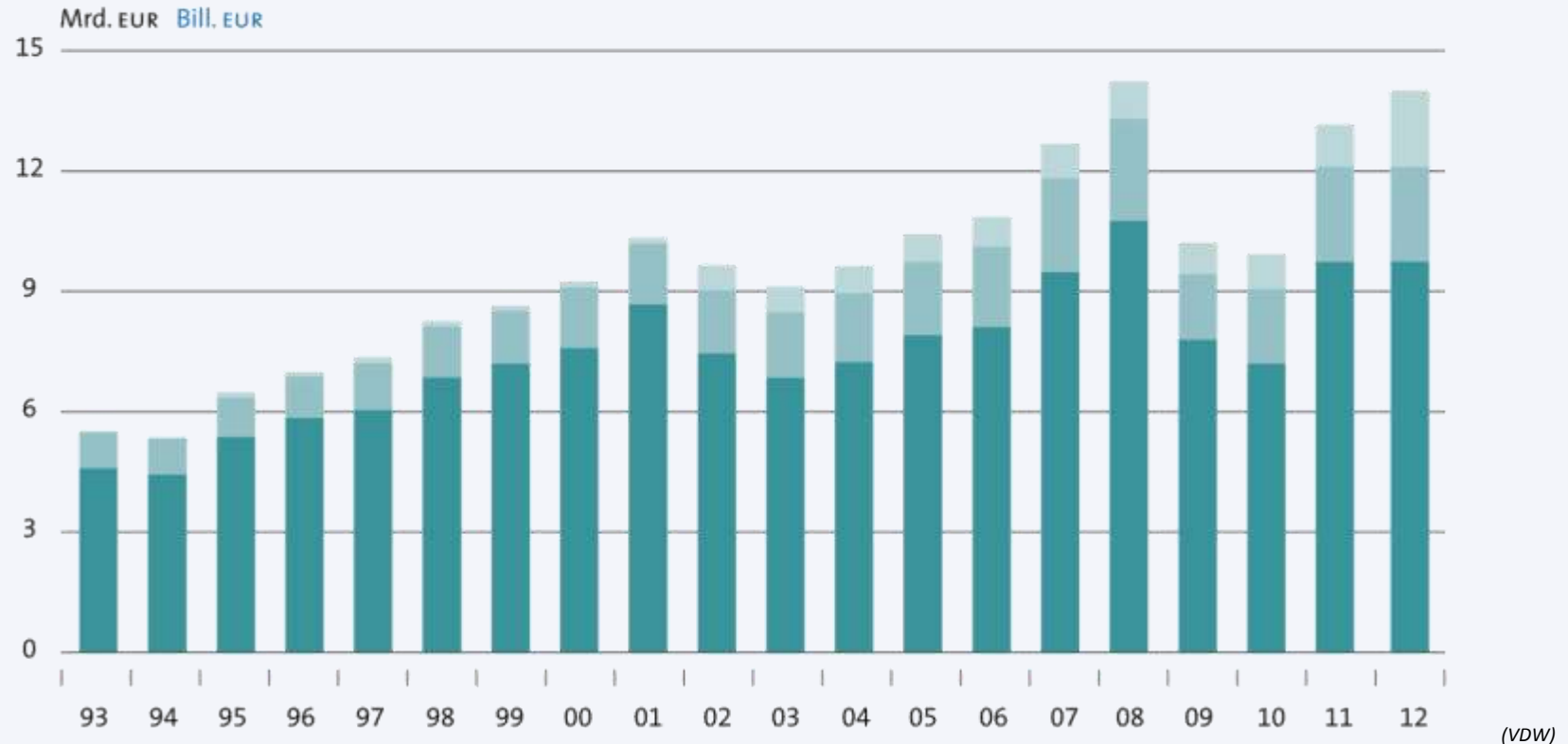
(VDMA)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Werkzeugmaschinen-Produktion Deutschland Machine tool production Germany

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

2012 = VDW-Schätzung
Hinweis: Ab 1995 Werte
verfügbar für Installation,
ab 2002 zusätzlich für
Reparatur/Instandhaltung
Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDW, VDMA



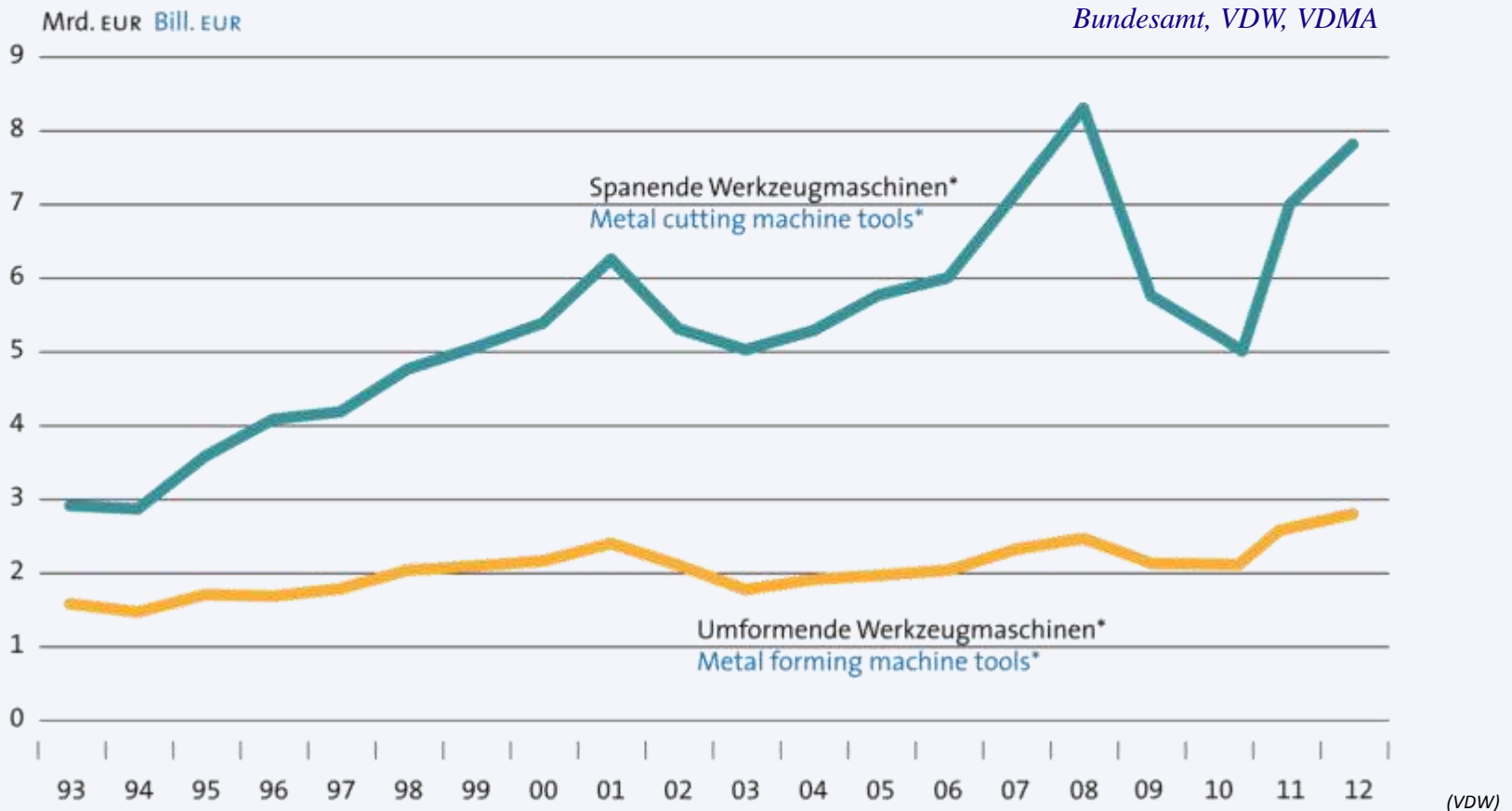
Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

2012 = VDW-Schätzung

* ohne Teile, Zubehör

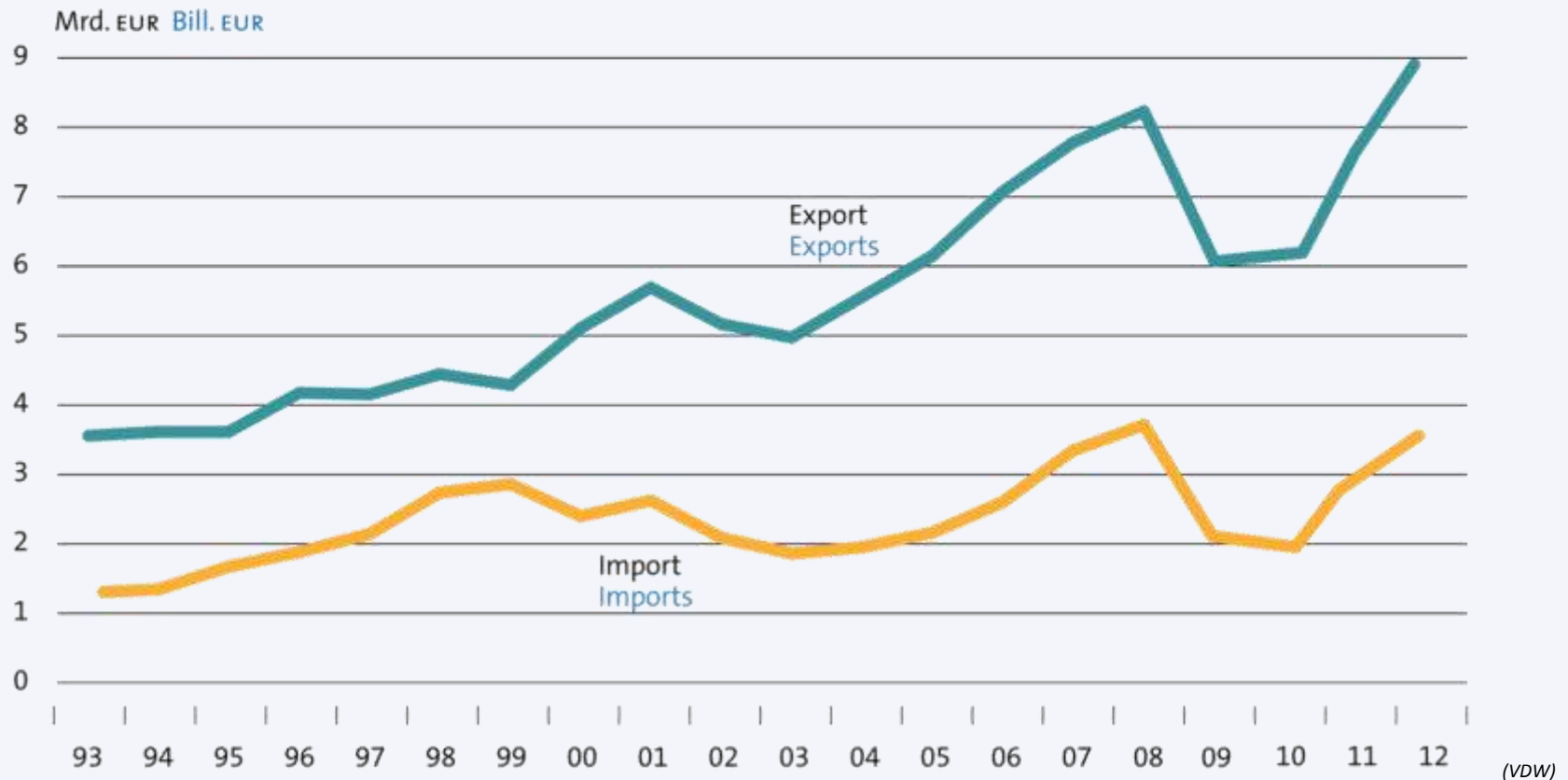
Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDW, VDMA



Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

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



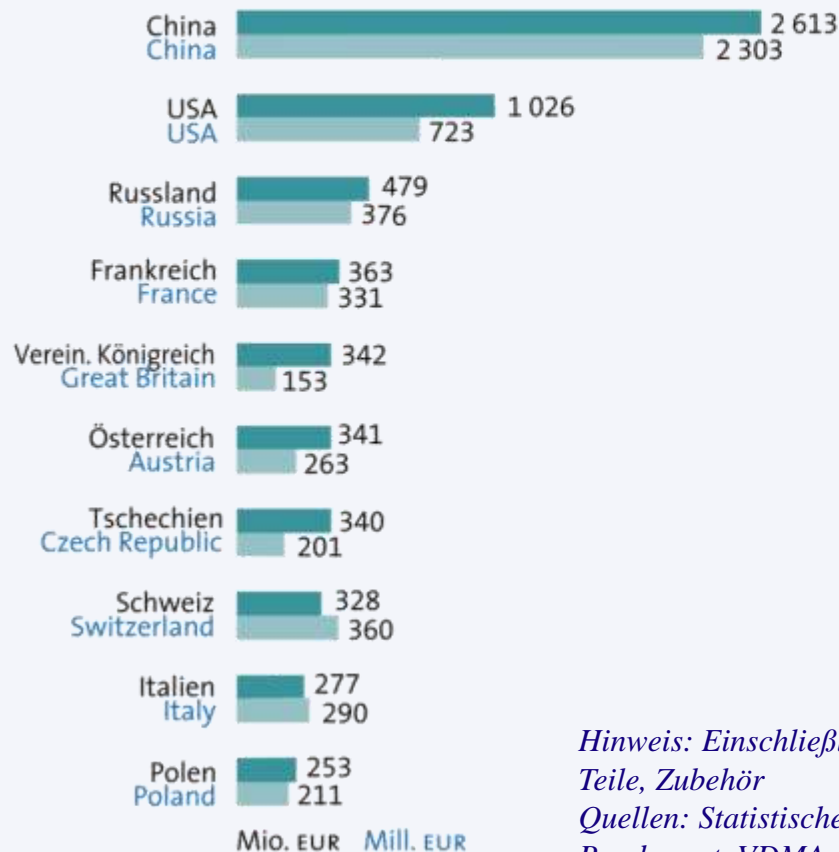
Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Deutscher Werkzeugmaschinen-Export: wichtigste Absatzmärkte

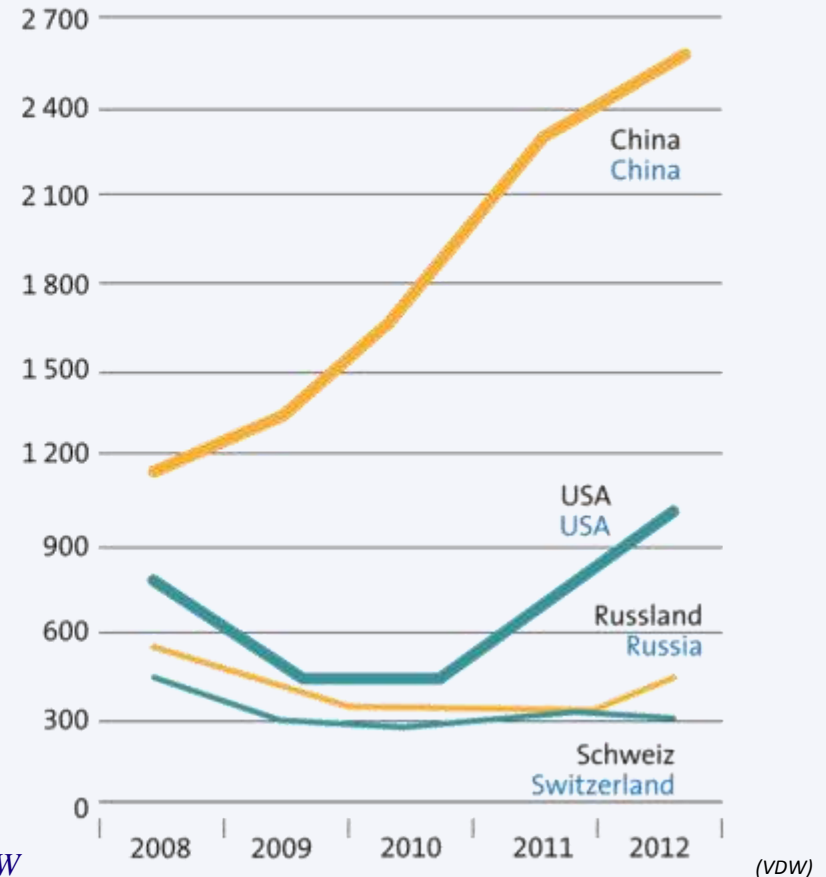
German machine tool exports: major customer markets

Top-10-Absatzmärkte
Top 10 customer markets

2012
2011



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



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

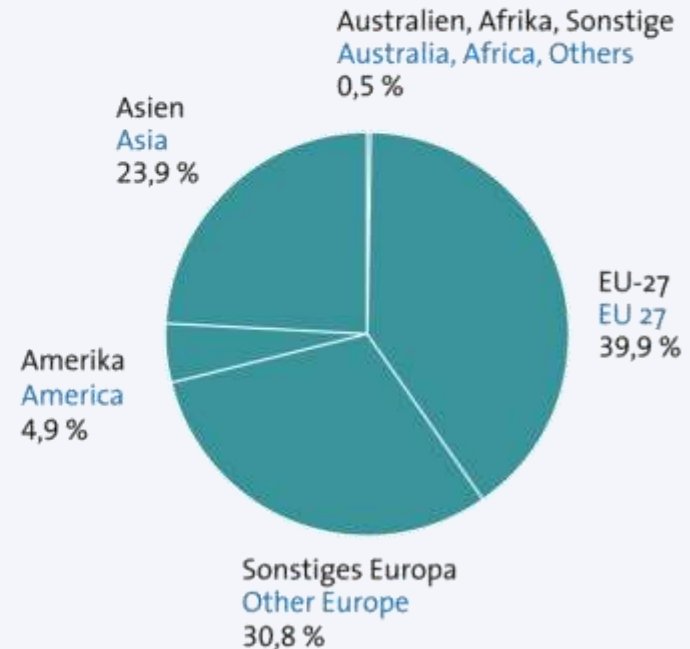
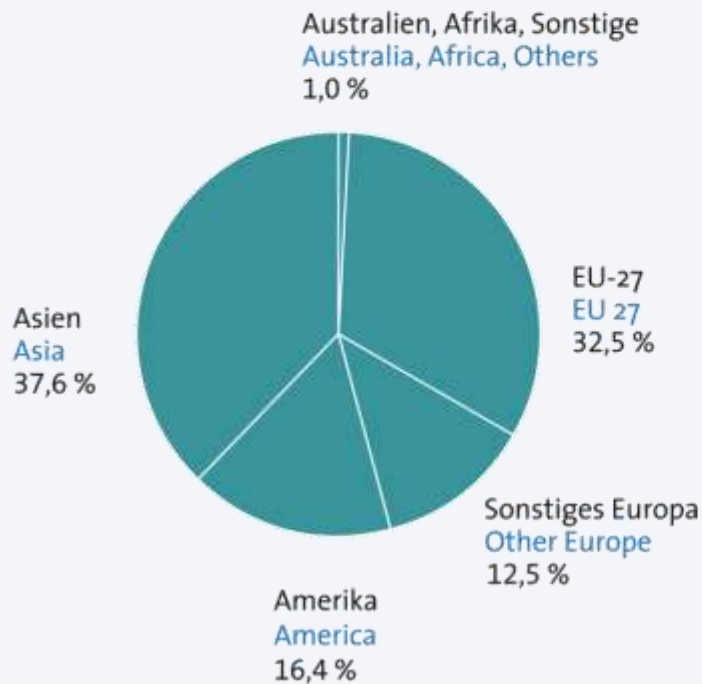
Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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)

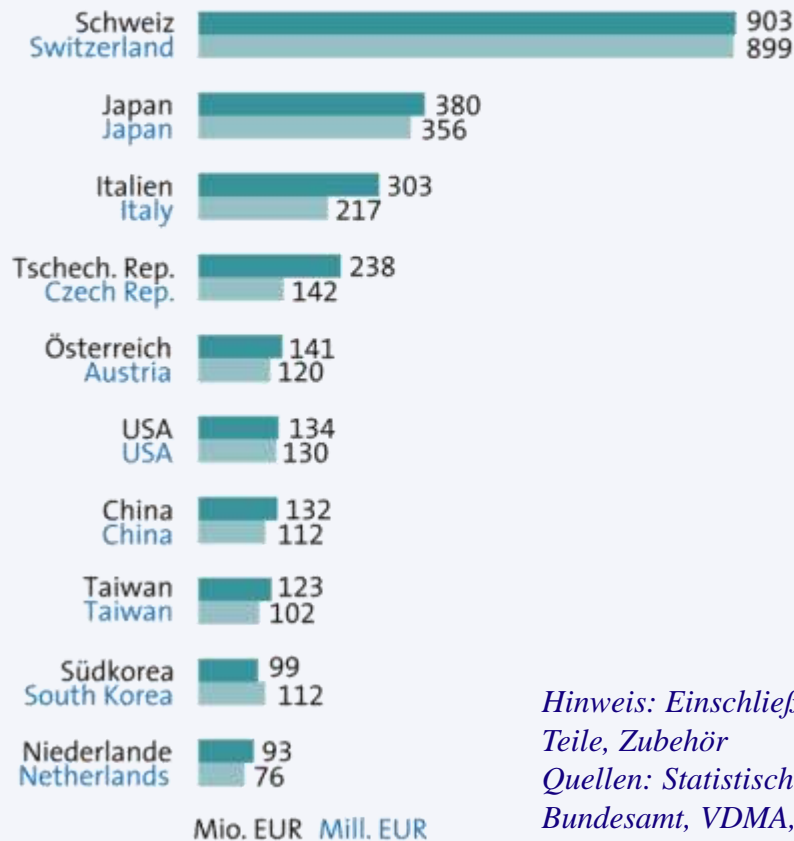
Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Deutscher Werkzeugmaschinen-Import: wichtigste Lieferländer

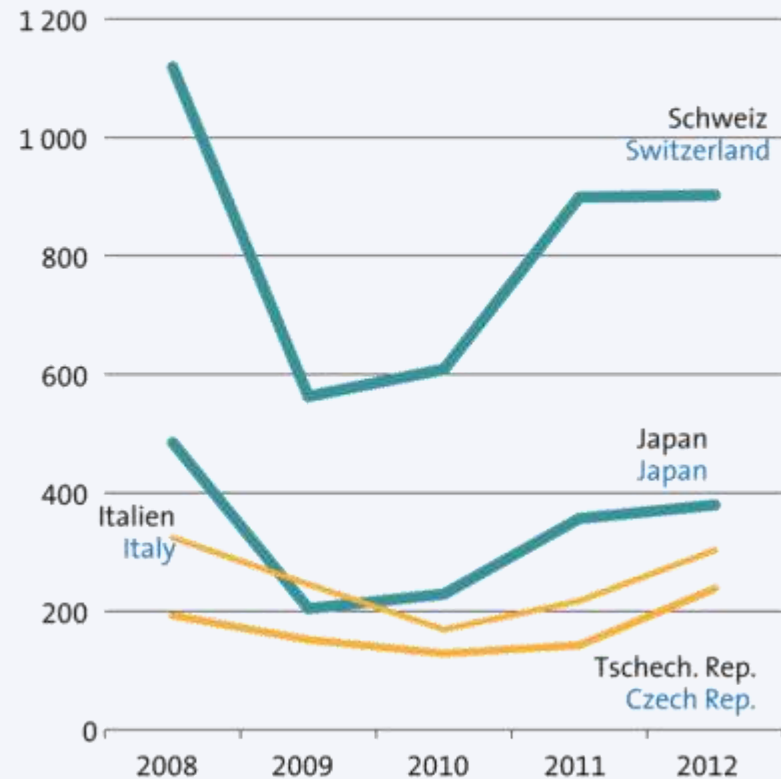
German machine tool imports: major supplier countries

Top-10-Absatzmärkte
Top 10 customer markets

■ 2012
■ 2011



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



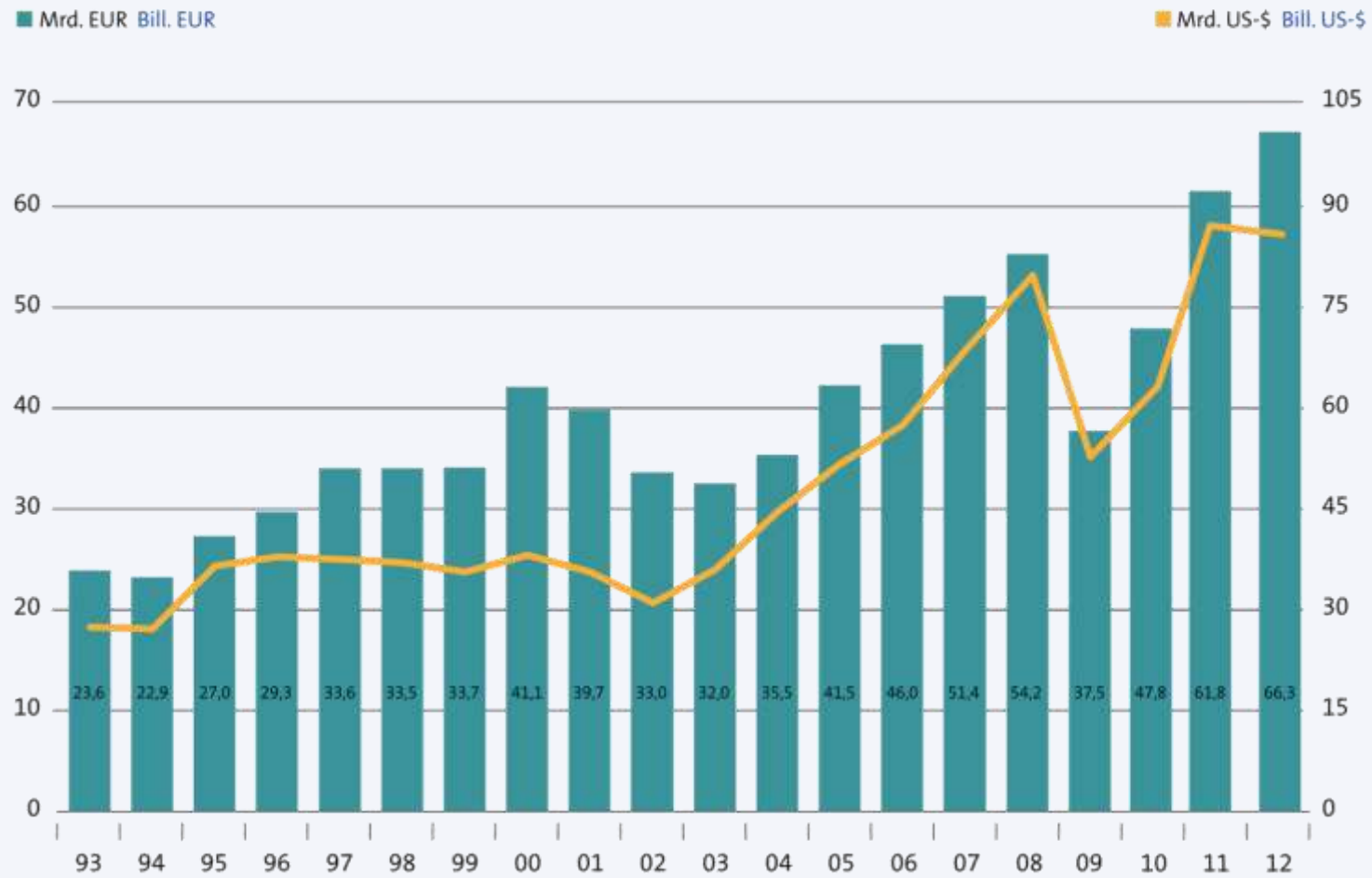
*Hinweis: Einschließlich
Teile, Zubehör
Quellen: Statistisches
Bundesamt, VDMA, VDW*

(VDW)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Welt-Produktion Werkzeugmaschinen World machine tool production

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



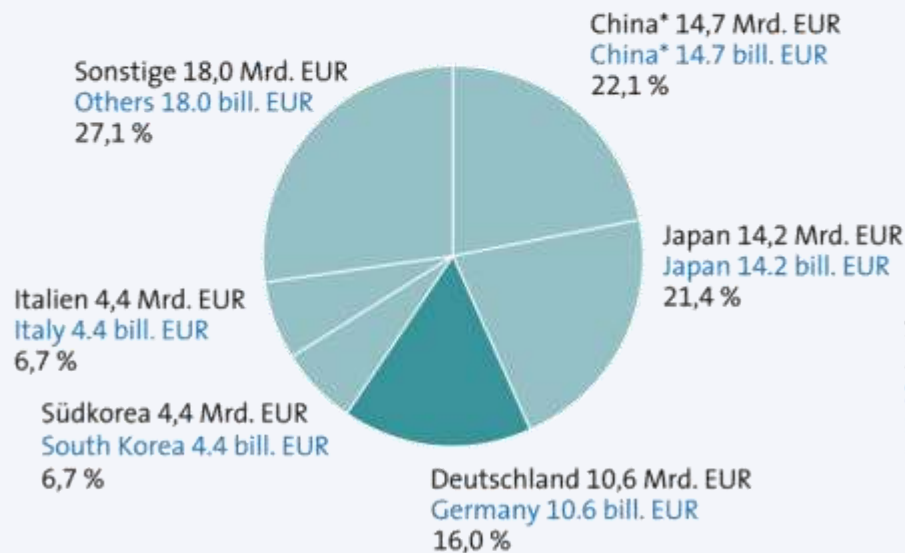
(VDW)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

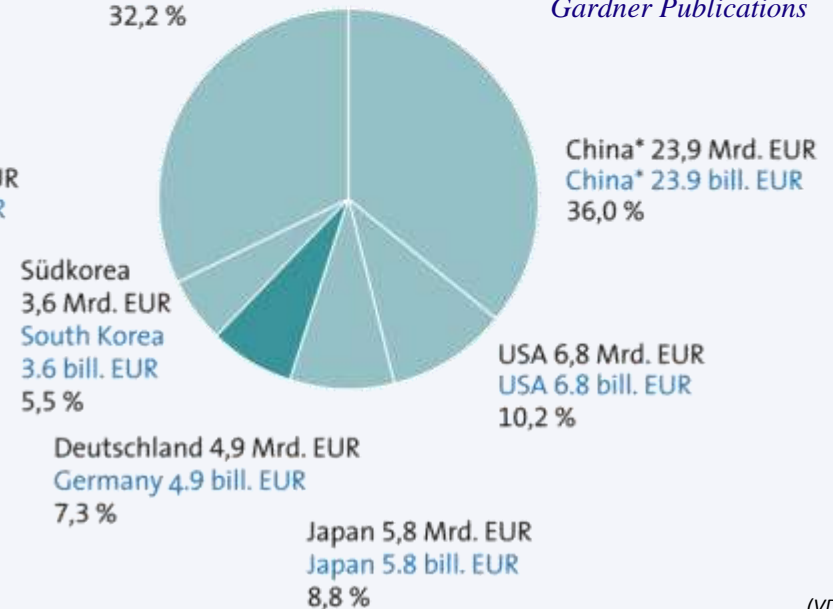
Welt-Produktion und -Verbrauch von Werkzeugmaschinen World machine tool production and consumption

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

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



Sonstige 21,4 Mrd. EUR
Others 21.4 bill. EUR
32,2 %



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

* VDW-Bereinigung um einfachste 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

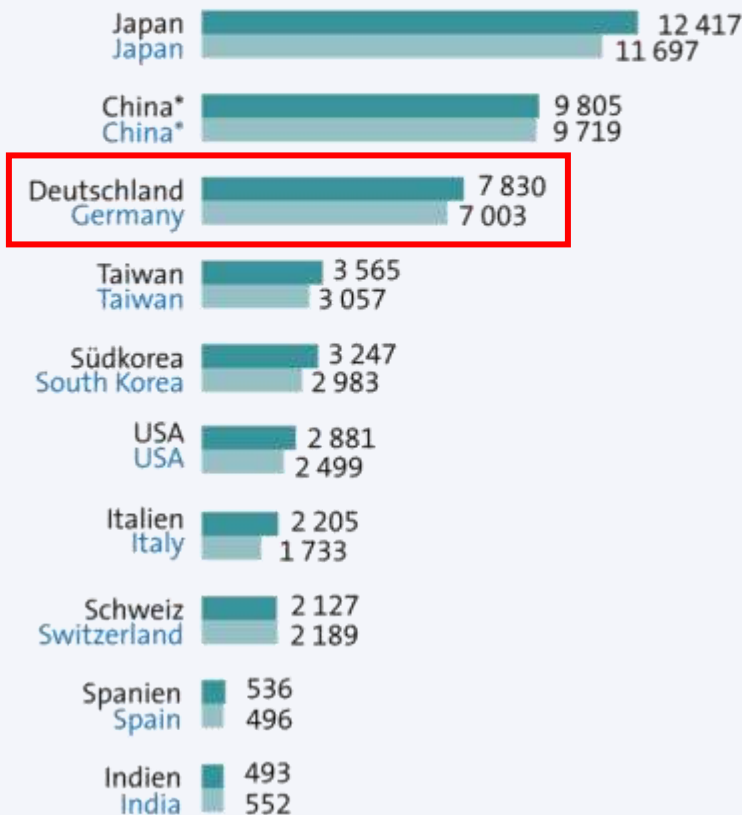
(VDW)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

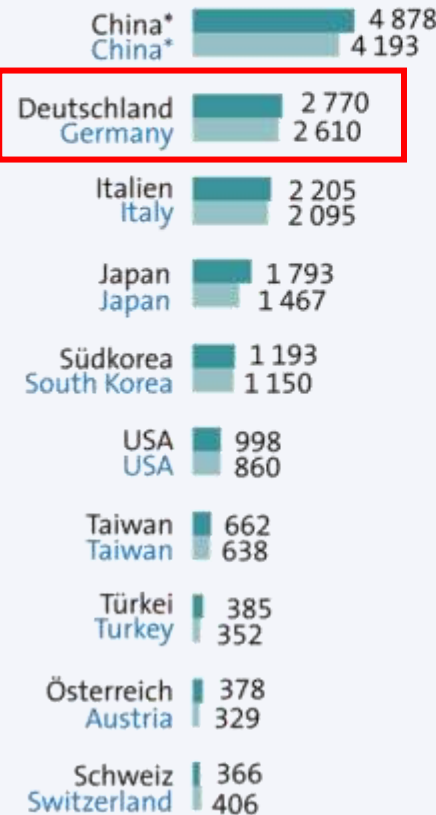
Werkzeugmaschinen-Produktion spanend/umformend: Top-10-Länder weltweit

Machine tool production cutting/forming: top 10 countries worldwide

Produktion spanende Maschinen in Mio. EUR
Production cutting machines in mill. EUR
■ 2012 ■ 2011



Produktion umformende Maschinen in Mio. EUR
Production forming machines in mill. EUR
■ 2012 ■ 2011



* VDW-Bereinigung um einfachste Maschinen (vgl. Anhang, methodische Hinweise, z. B. 2012 um 32 %);
Hinweis: Ohne Teile, Zubehör; 2012 = Schätzungen
Quellen: VDW, VDMA, nationale Verbände, Gardner Publications (VDW)

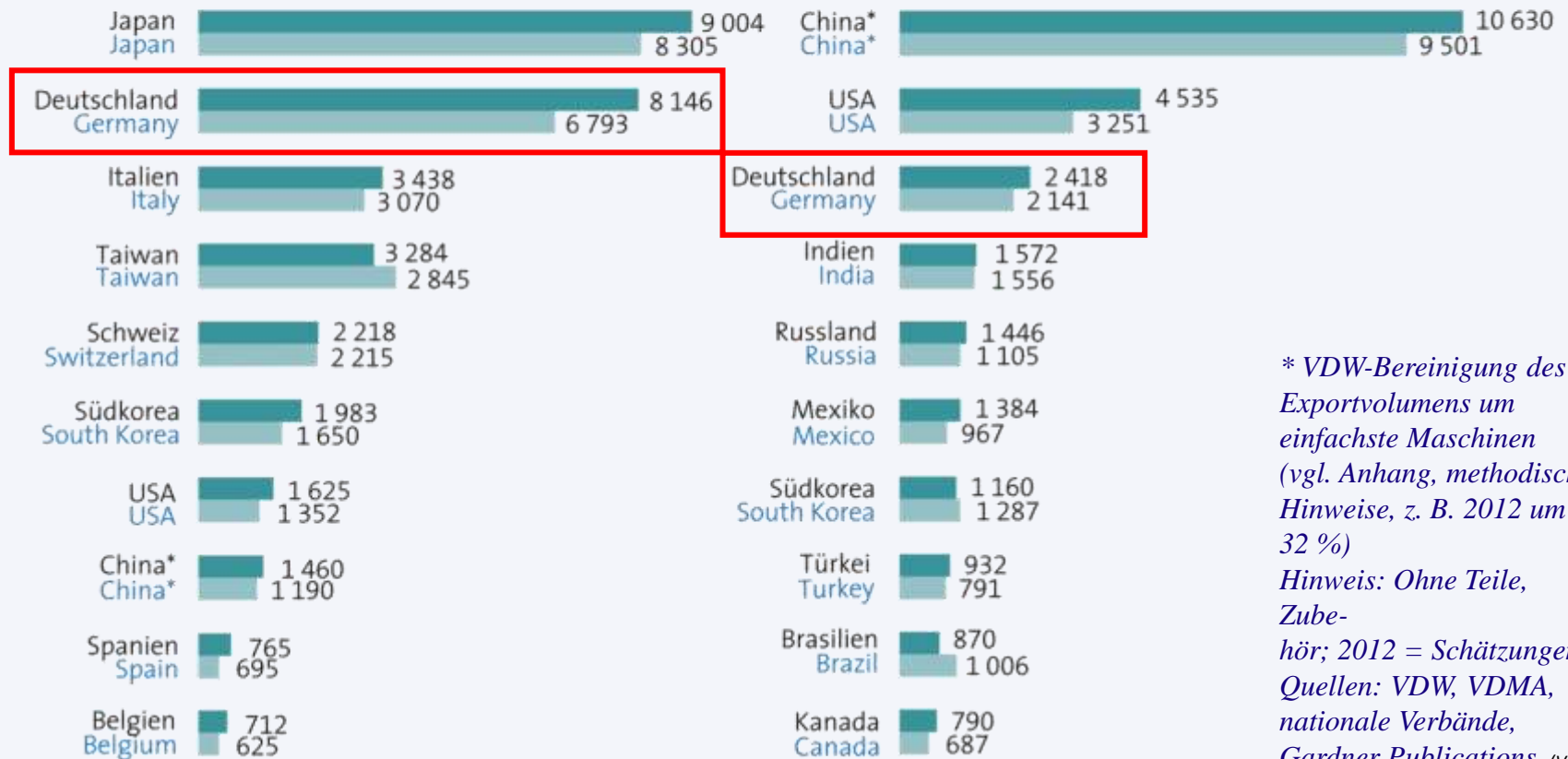
Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

Machine tool exports and imports: top 10 countries worldwide

Export in Mio. EUR
Exports in mill. EUR
■ 2012 ■ 2011

Import in Mio. EUR
Imports in mill. EUR
■ 2012 ■ 2011



* VDW-Bereinigung des Exportvolumens um einfachste Maschinen (vgl. Anhang, methodische Hinweise, z. B. 2012 um 32 %)
Hinweis: Ohne Teile, Zubehör; 2012 = Schätzungen
Quellen: VDW, VDMA, nationale Verbände, Gardner Publications (VDW)

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 – 1 000	13,3	14,2	14,6	30,4	29,3	29,5	36,2	29,7	28,6
> 1 000	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

(VDW)

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

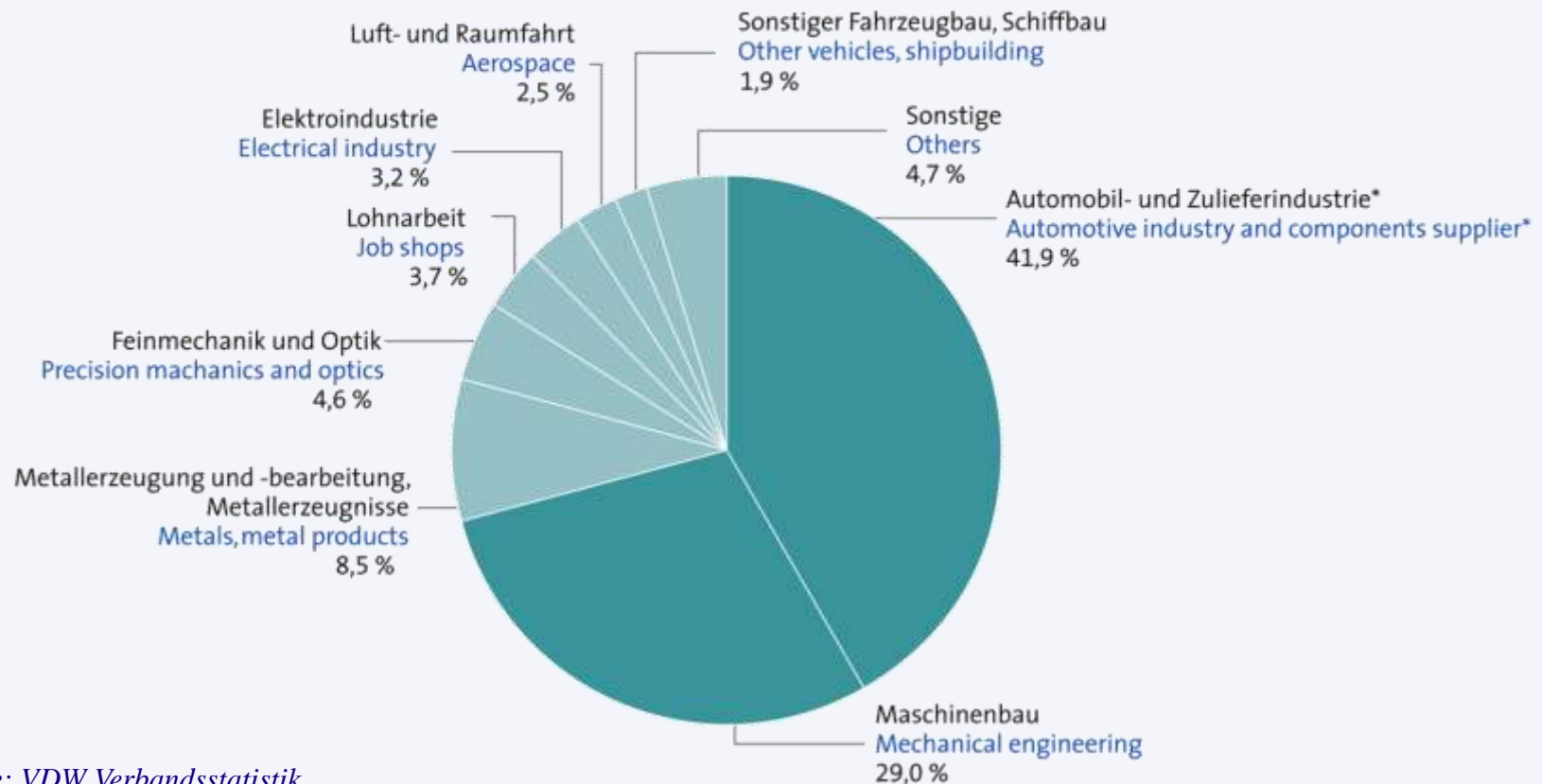
* based on reports from member companies of VDW and VDMA section Machine Tools

(VDW)

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

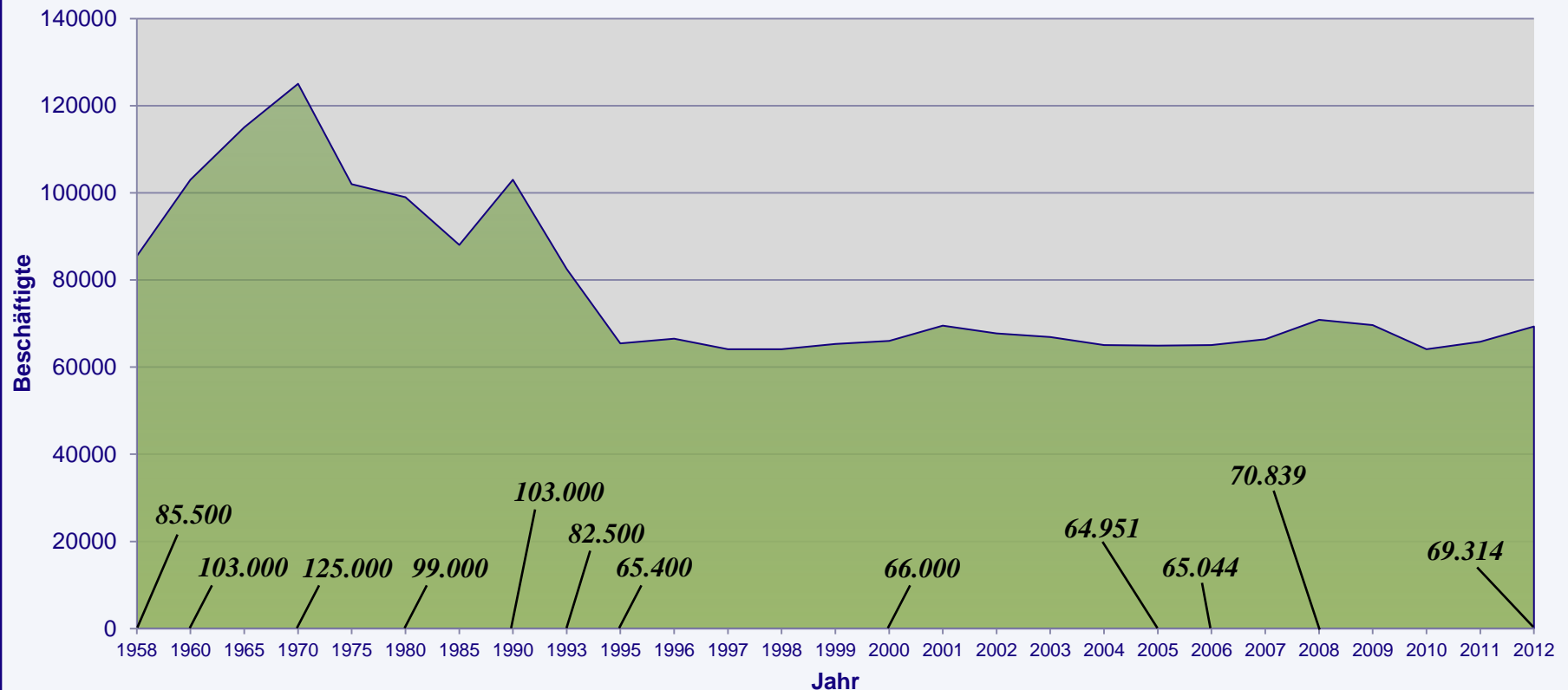


Quelle: VDW Verbandsstatistik

(VDW)

Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

Beschäftigungsentwicklung in der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie



Aus: Historische Zeitreihen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie

2012: Daten teilweise geschätzt

- Beschäftigte sind Jahresdurchschnitte

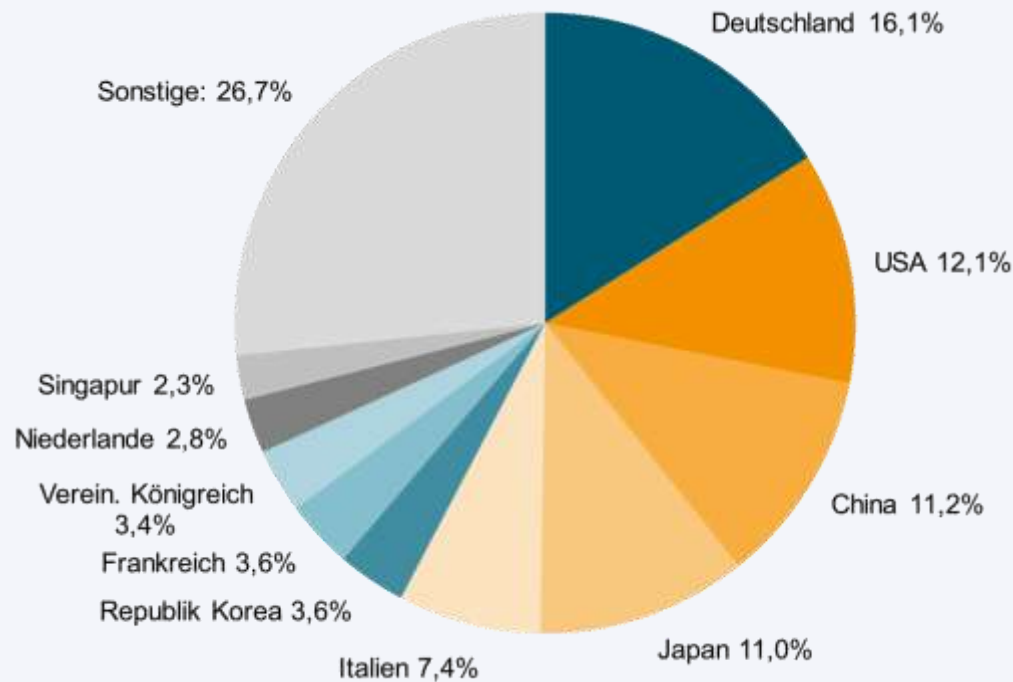
- Daten ab 1996 inkl. Neue Bundesländer (Beschäftigte ab 1996)

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.*



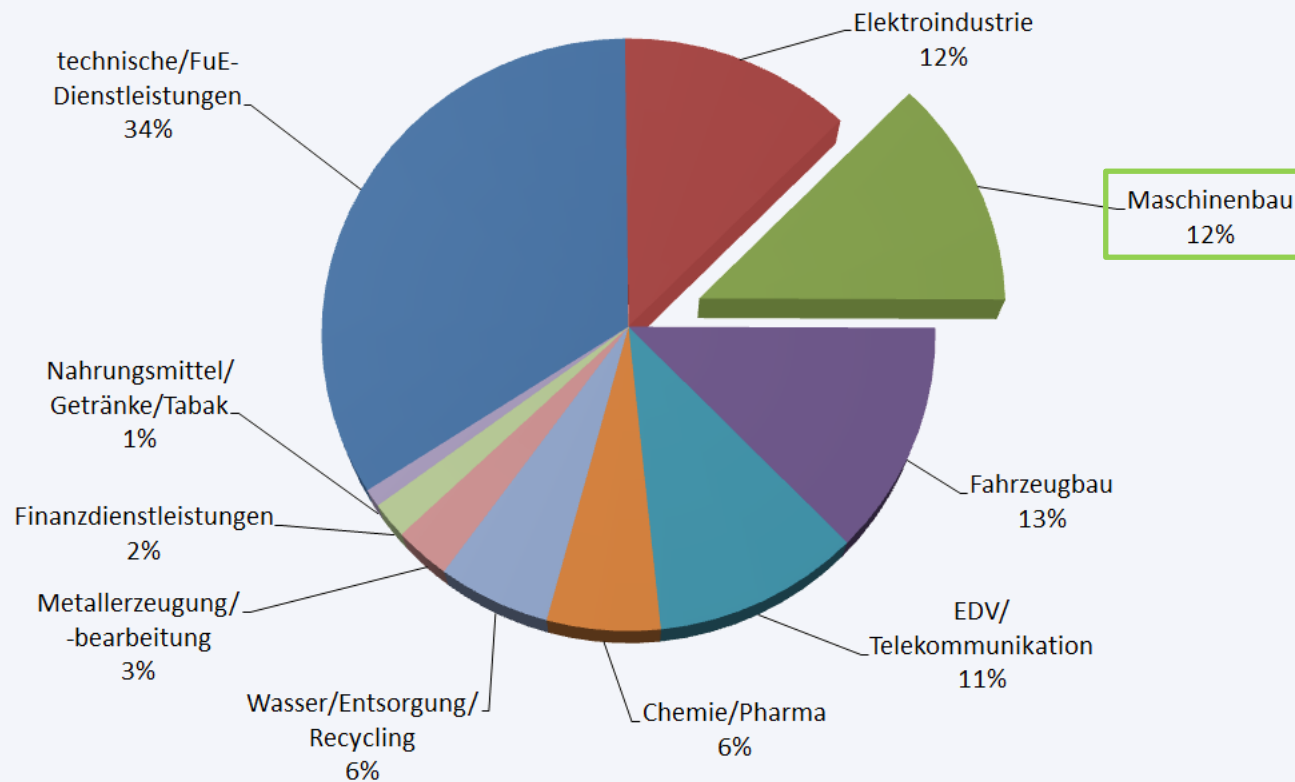
Maschinenexporte der wichtigsten
Lieferländer
Anteile in Prozent am gesamten
Maschinenexport¹⁾, 2012

1) 47 Berichtsländer, repräsentieren
98% des Welthandels mit Maschinen

Quelle: VDMA

Anteil der Ingenieure an den Beschäftigten

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

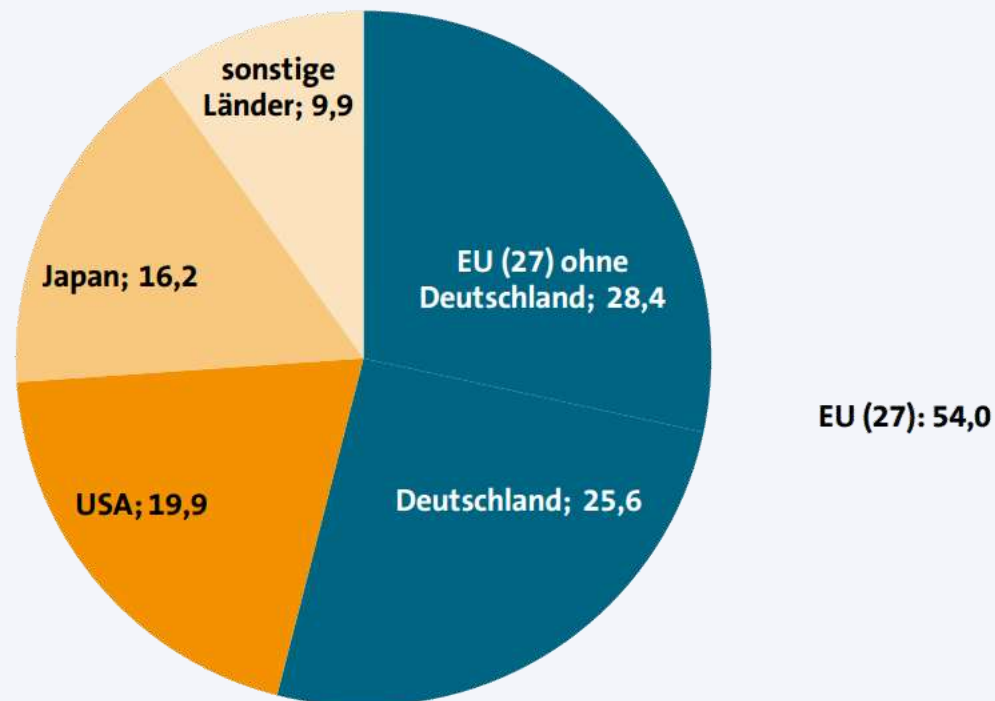


Quelle: 2012: Ingenieure auf einen Blick, VDI

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

■ vorläufig/preliminary

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

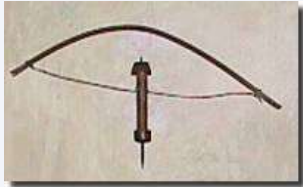
* based on reports from member companies of VDW and VDMA section Machine Tools

Quelle: VDMA

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

Steinzeit

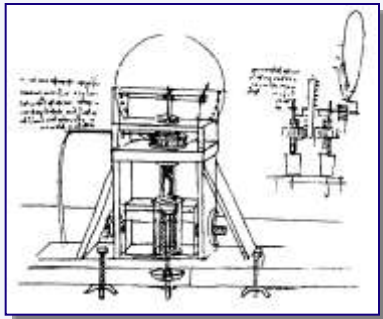
Meißel und Schabewerkzeuge
Bohrer (Antrieb über Fiedelbogen)



*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

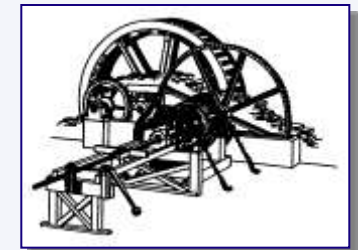
Weiterentwicklung der
Dampfmaschine. Die
Werkzeugmaschinen
konnten nunmehr
motorisch über Trans-
missionswellen ange-
trieben werden.



Werkzeugmaschinenhalle

1774 John Wilkinson

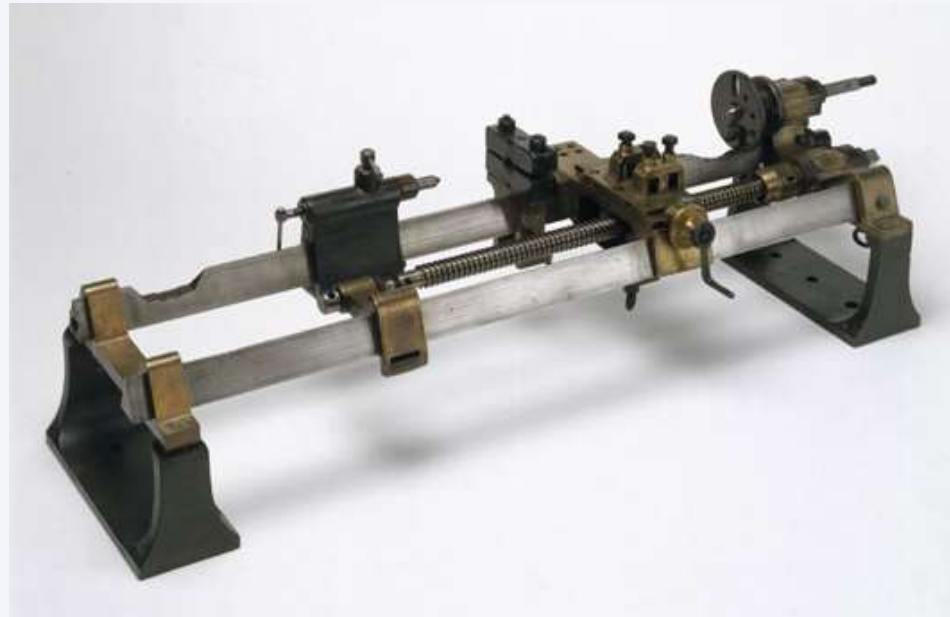
Erste richtige Metallbearbeitungs-
maschine bzw. Werkzeugmaschine. Diese
Maschine bot eine relativ gute
Arbeitsgenauigkeit, so daß Dampf-
maschinenzylinder für James Watt auf ihr
gebohrt werden konnten.



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

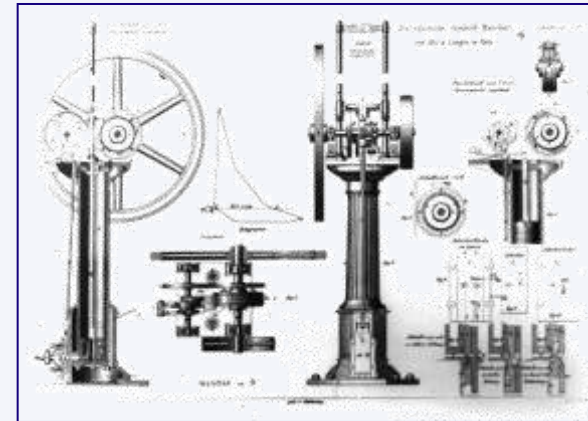
Die Entwicklung der Standardwerkzeugmaschinen, wie Dreh, Hobel-, Stoß-, Bohr- und Fräsmaschine war im wesentlichen abgeschlossen.

Nicolaus August Otto

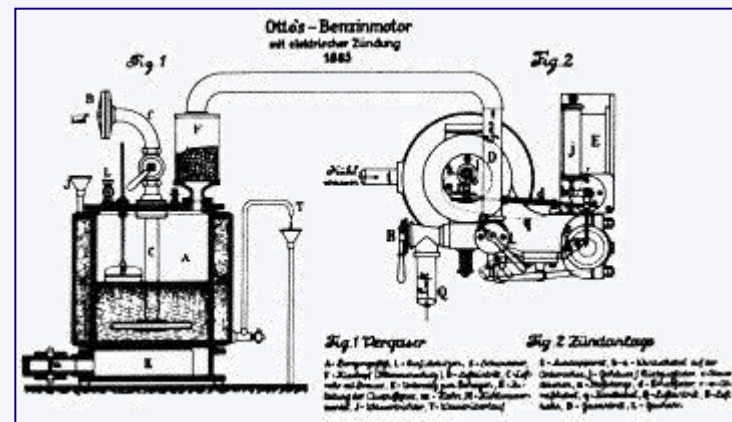
1864: Erfindung des atmosphärischen Gasmotors

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 Benzinmotoren 1885

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

1900 Frederic Winslow Taylor

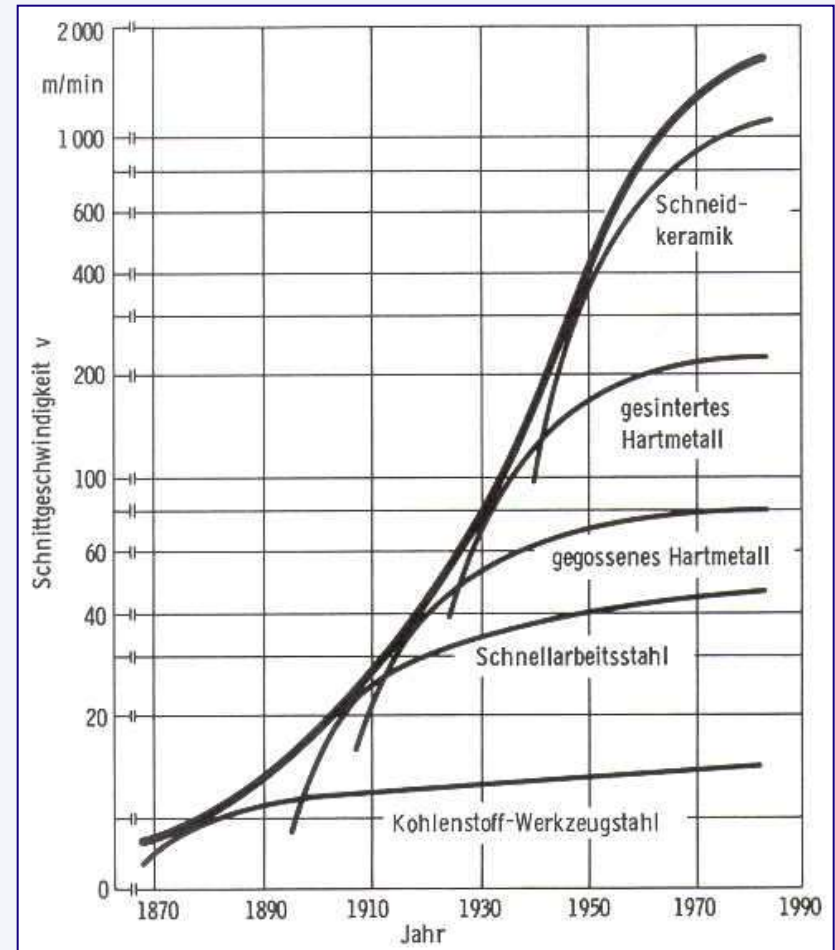
Entwicklung des Schnellarbeitstahls

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



Neue Anforderungen an Werkzeugmaschinen

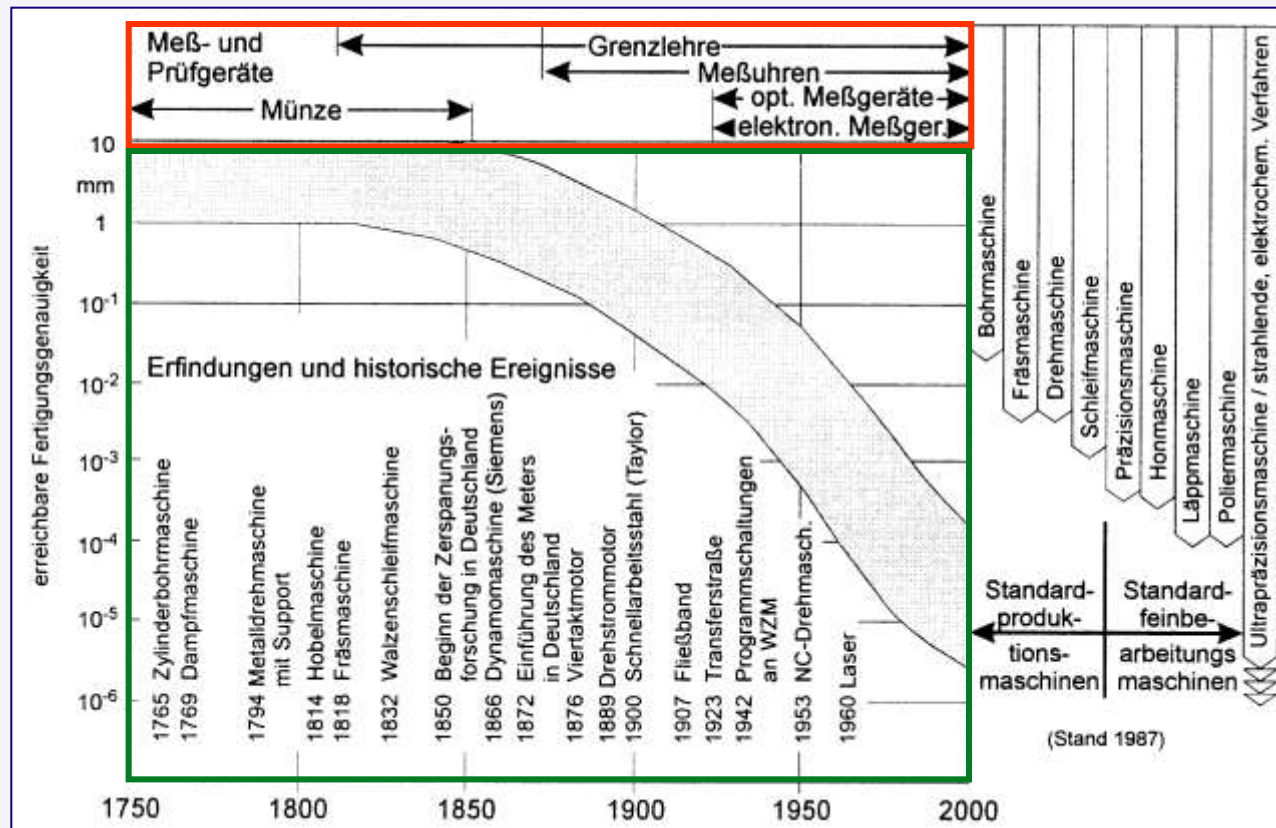
- höhere Antriebskräfte
- höhere Arbeitsspindeldrehzahl
- steifere, höher belastbare Führungen, Arbeitsspindeln und Gestellbauteile
- verbesserte Getriebe
- verbesserte Schwingungseigenschaften



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

Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

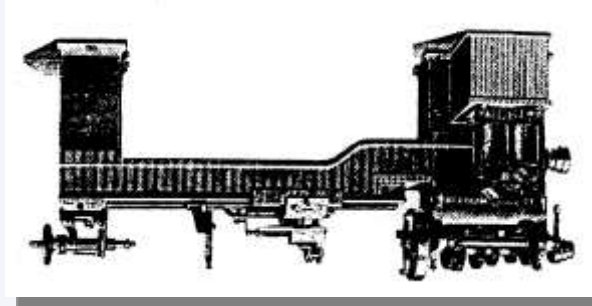
Parallel zur Verbesserung der **Fertigungsgenauigkeit** von Werkzeugmaschinen mussten auch entsprechende **Messmittel** zum Nachweis der Fertigungsqualität entwickelt werden.



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.



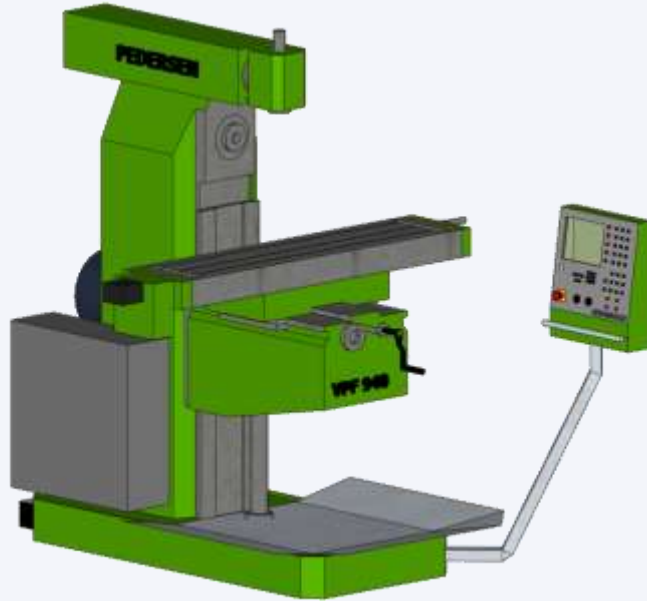
Drehmaschine mit eigenem Antrieb

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).

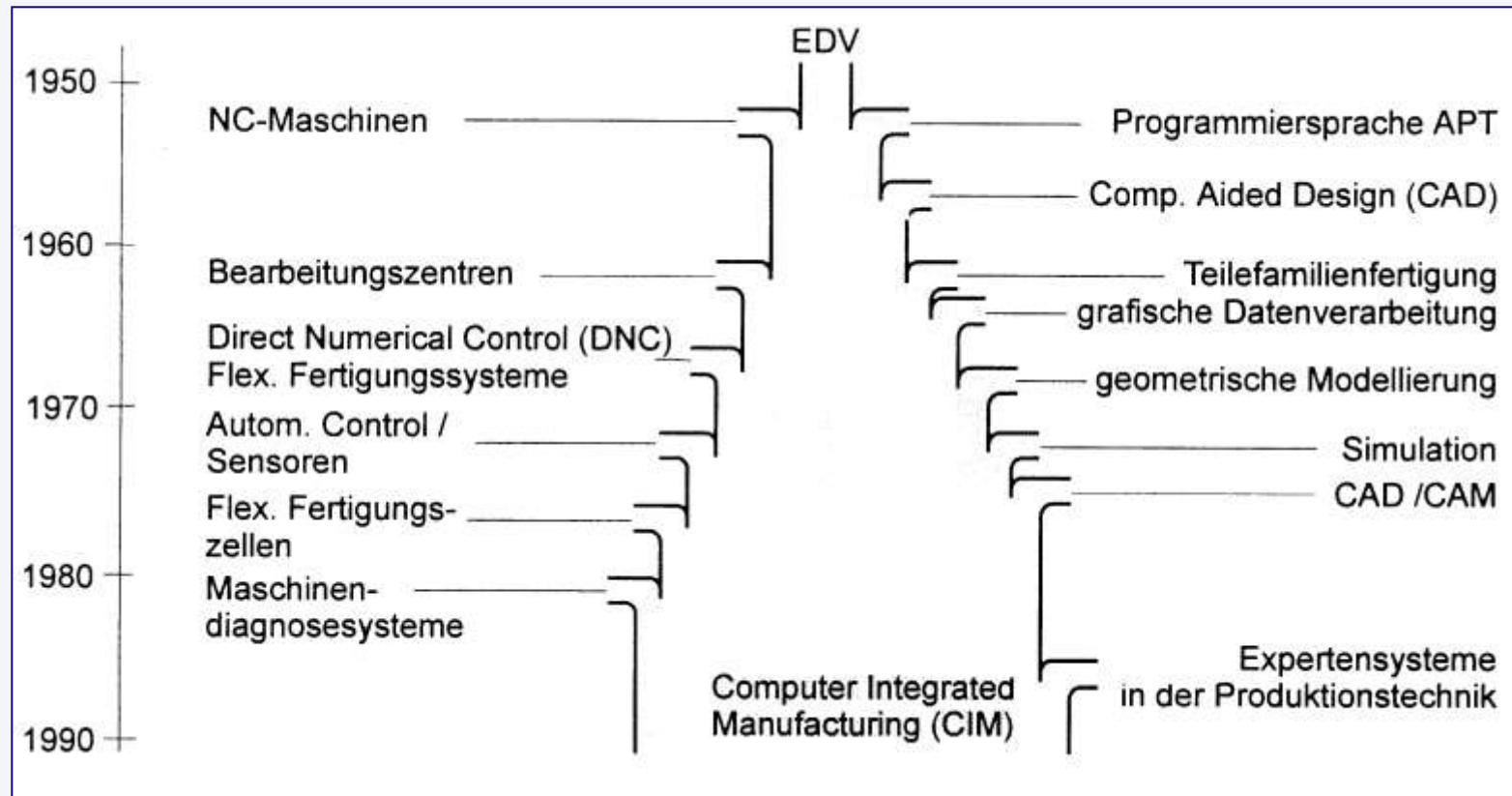
In den **siebziger Jahren** wurden die Werkzeugmaschinen zunehmend numerisch gesteuert. Die Maschinen erhielten über Lochstreifen oder Magnetkassetten ihre Steuerungsbefehle. Der Befehlsdatensatz (NC-Programm) konnte an einem separaten Arbeitsplatz offline oder an dem Bedienfeld der Werkzeugmaschine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

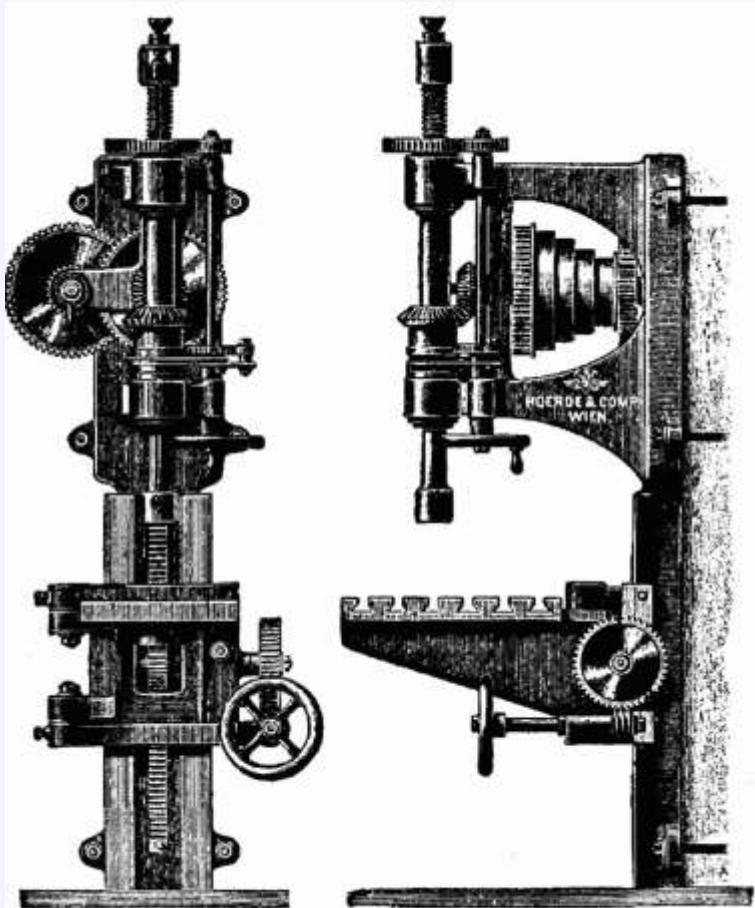


Fig. 6.

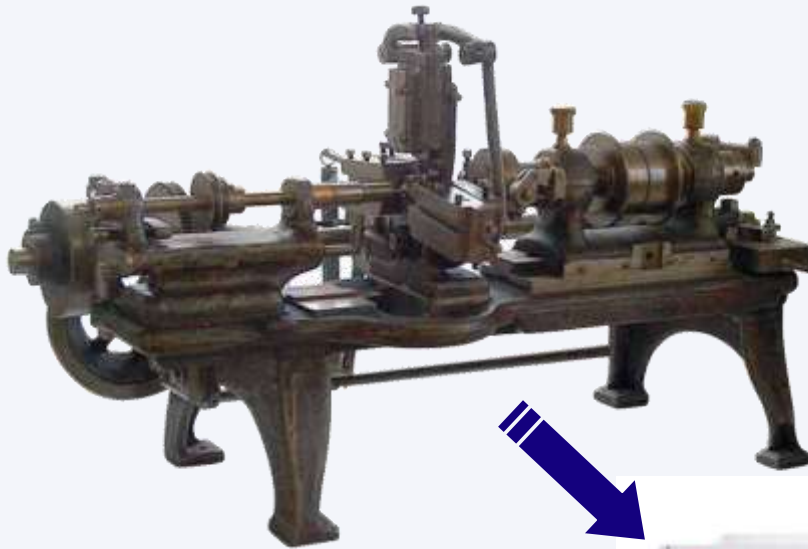
Historische Ständerbohrmaschine

Quelle: Wikipedia



Ständerbohrmaschine

Werkzeugmaschinen – Früher und Heute

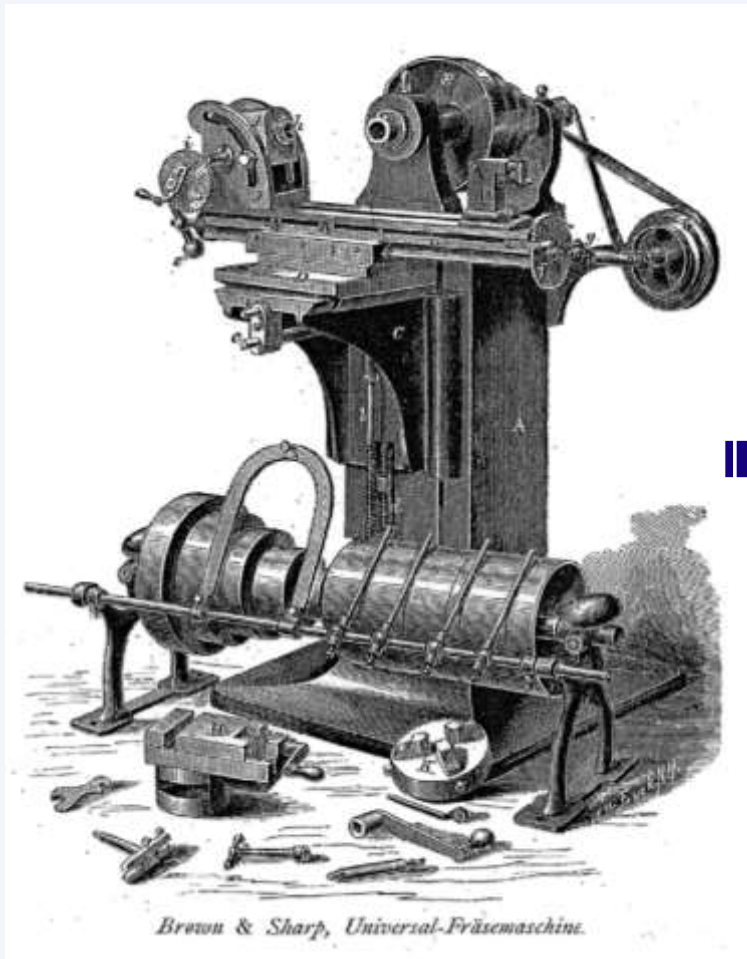


*Drehmaschine Junker 1900
Quelle: decomagazine (www.decomag.ch)*

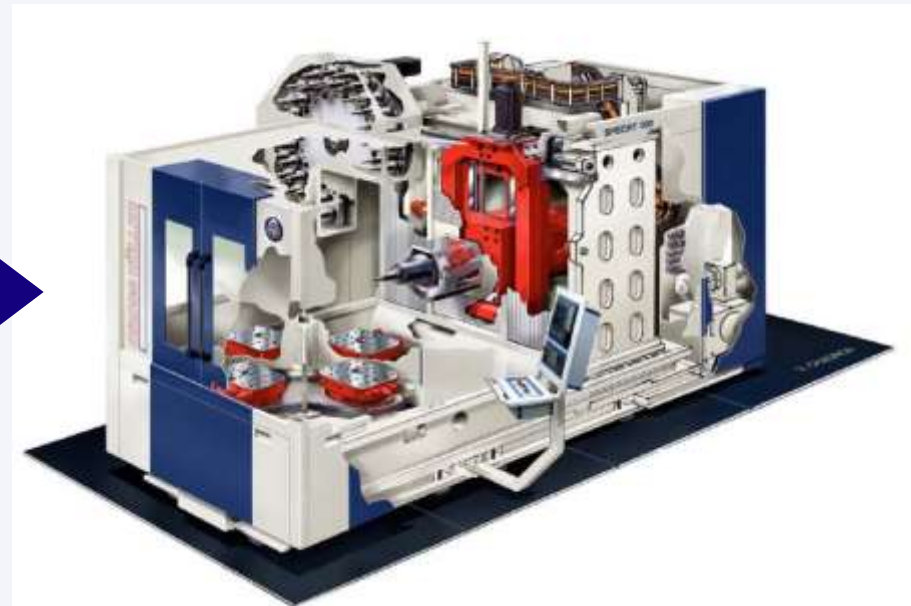
*Horizontaldrehmaschine MAG Boehringer
Quelle: www.mag-ias.com*



Werkzeugmaschinen – Früher und Heute



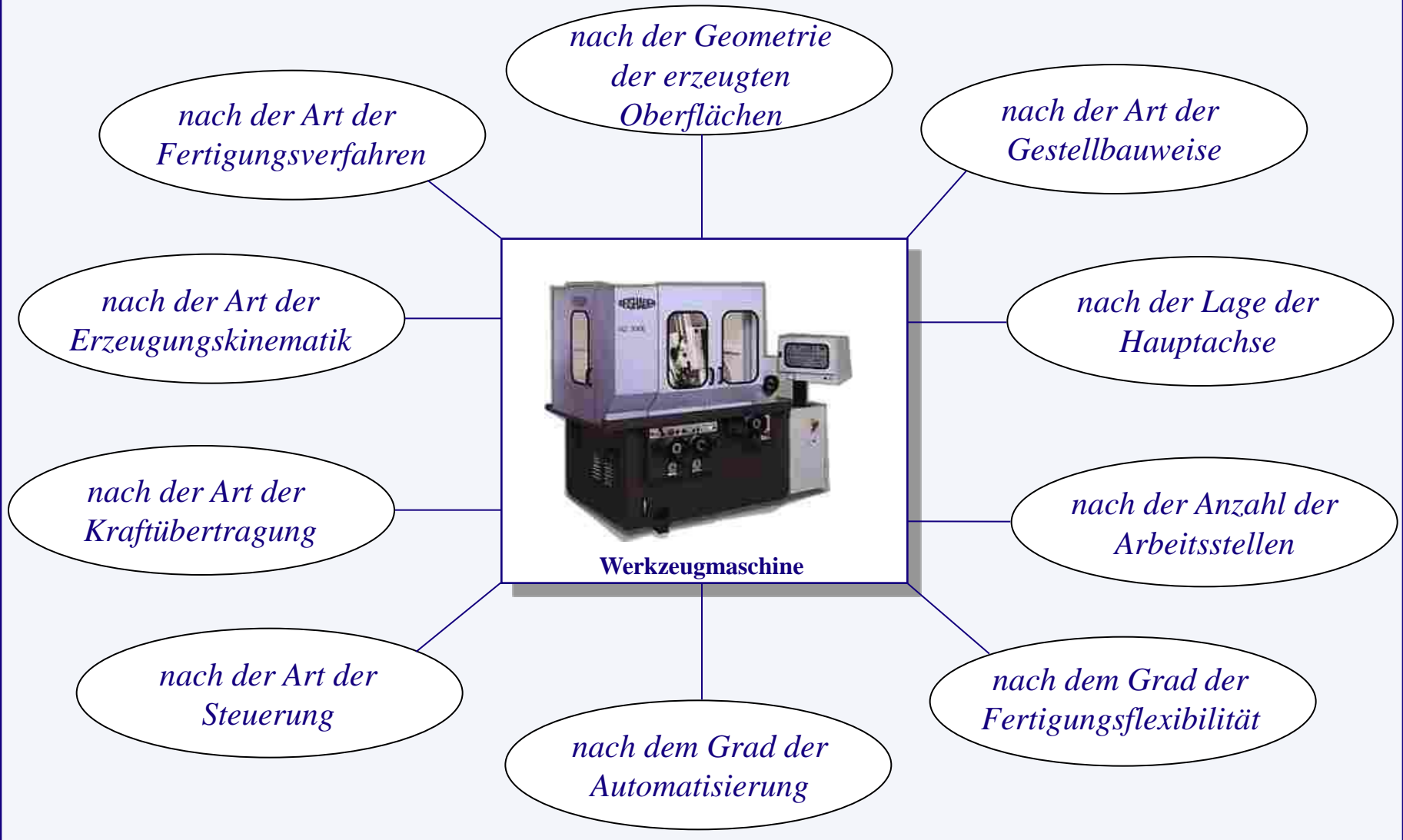
Universalfräsmaschine um 1870



Fräs-Bearbeitungszentrum (MAG Hüller-Hille)

Fragen

Einteilungskriterien von Werkzeugmaschinen



Einteilung nach *der Geometrie der erzeugten Oberflächen*

Planwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung ebener Oberflächen

Planfräs-, Planschleif-, Plandrehmaschinen

Rundwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung rotationssymmetrischer Oberflächen

Rundfräs-, Rundsleif-, Runddrehmaschinen

Schraubenwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung schraubenförmiger Oberflächen

Gewindeschneid-, Gewindefräs-, -schleifmaschine

Zahnflankenwerkzeugmaschinen

zur Erzeugung von Zahnflanken an Bauteilen

Zahnflankenfräs-, Zahnflankenstoß-, Zahnflanken-
schleifmaschinen

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-, Fräs-, Kreissägenmaschinen

WZM mit beliebiger Hauptbewegung

Honmaschinen, Läppmaschinen

Kinematik der Vorschubbewegung

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

Waagrecht-Werkzeugmaschinen

Senkrecht-Werkzeugmaschinen

Steuerung

Funktionaler Aufbau der Steuerung:

- mechanisch
- hydraulisch
- pneumatisch
- elektrisch

Art der Programmsteuerung

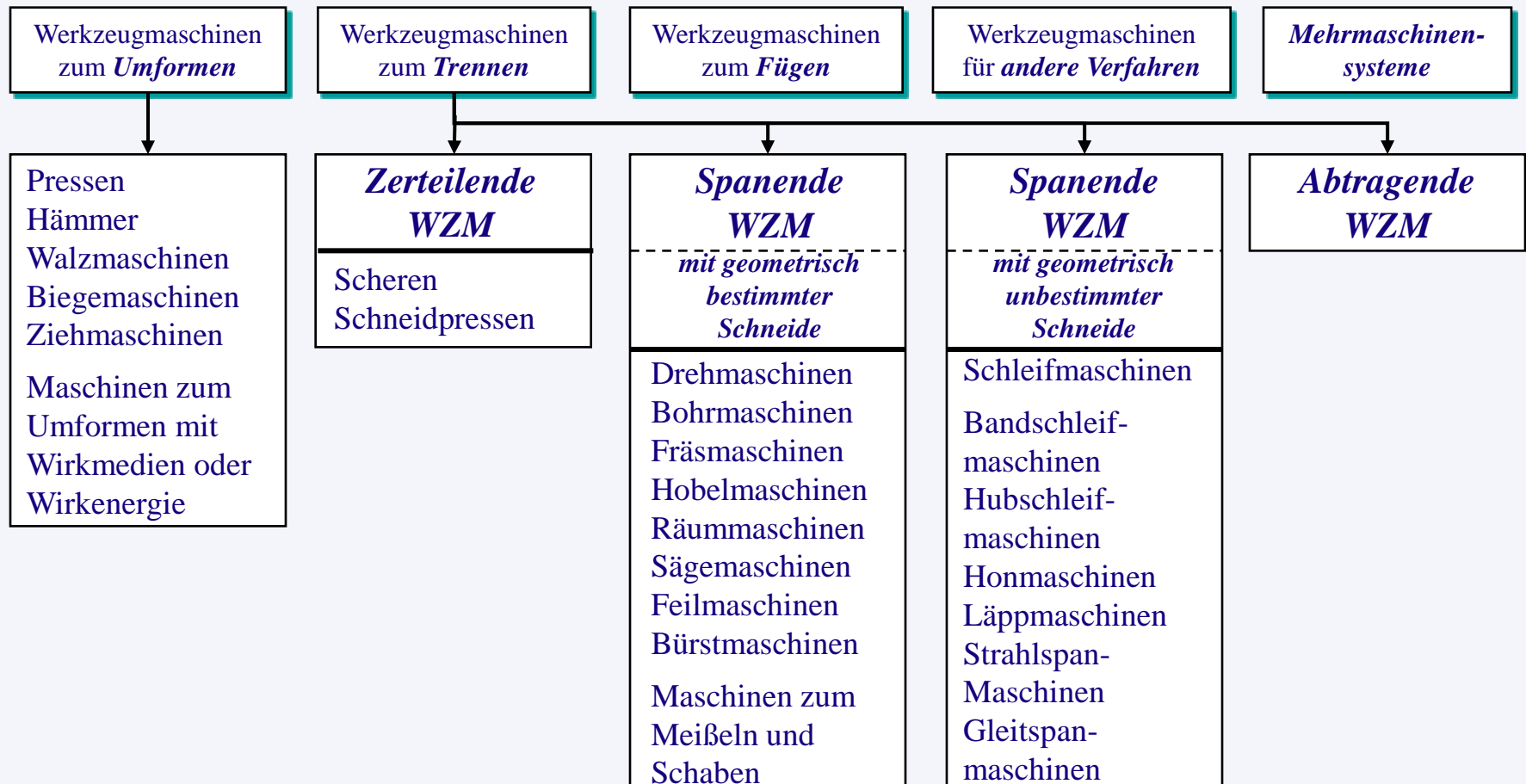
- Kurvensteuerung
- numerische Steuerung

Kraftübertragung

Trennung nach Haupt- und Vorschubantrieb,
Energie kann dem Wirkpaar zugeführt werden:

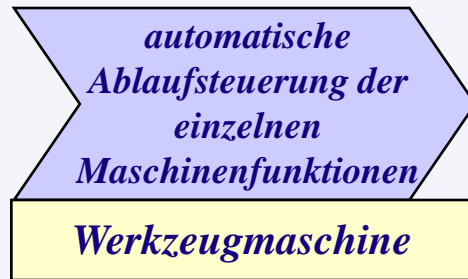
- mechanisch
- hydraulisch
- pneumatisch
- elektrisch

Einteilung nach *DIN 69651*

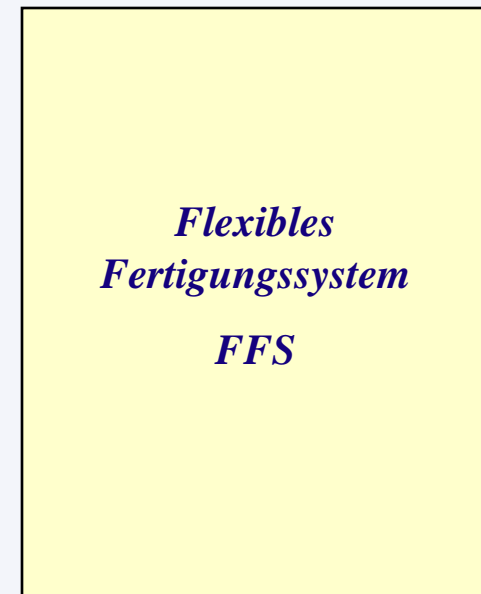
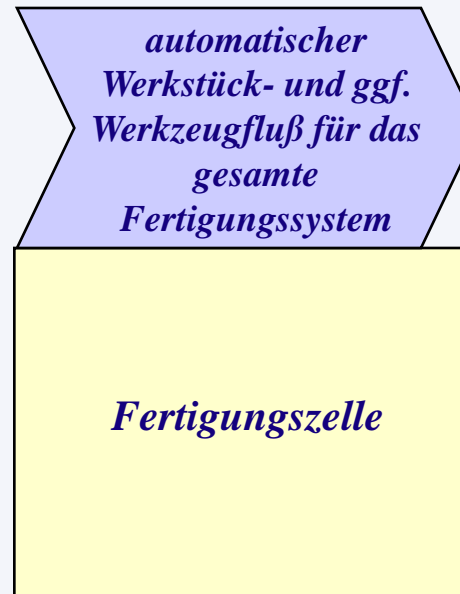
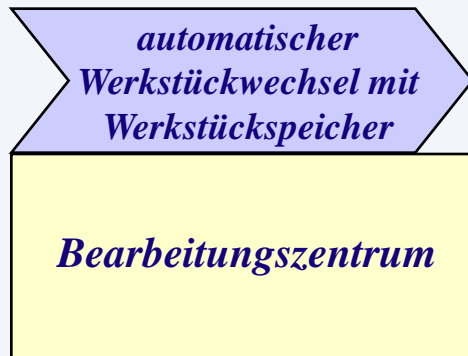


Einteilung nach *dem Automatisierungsgrad*

Einzelmaschinen

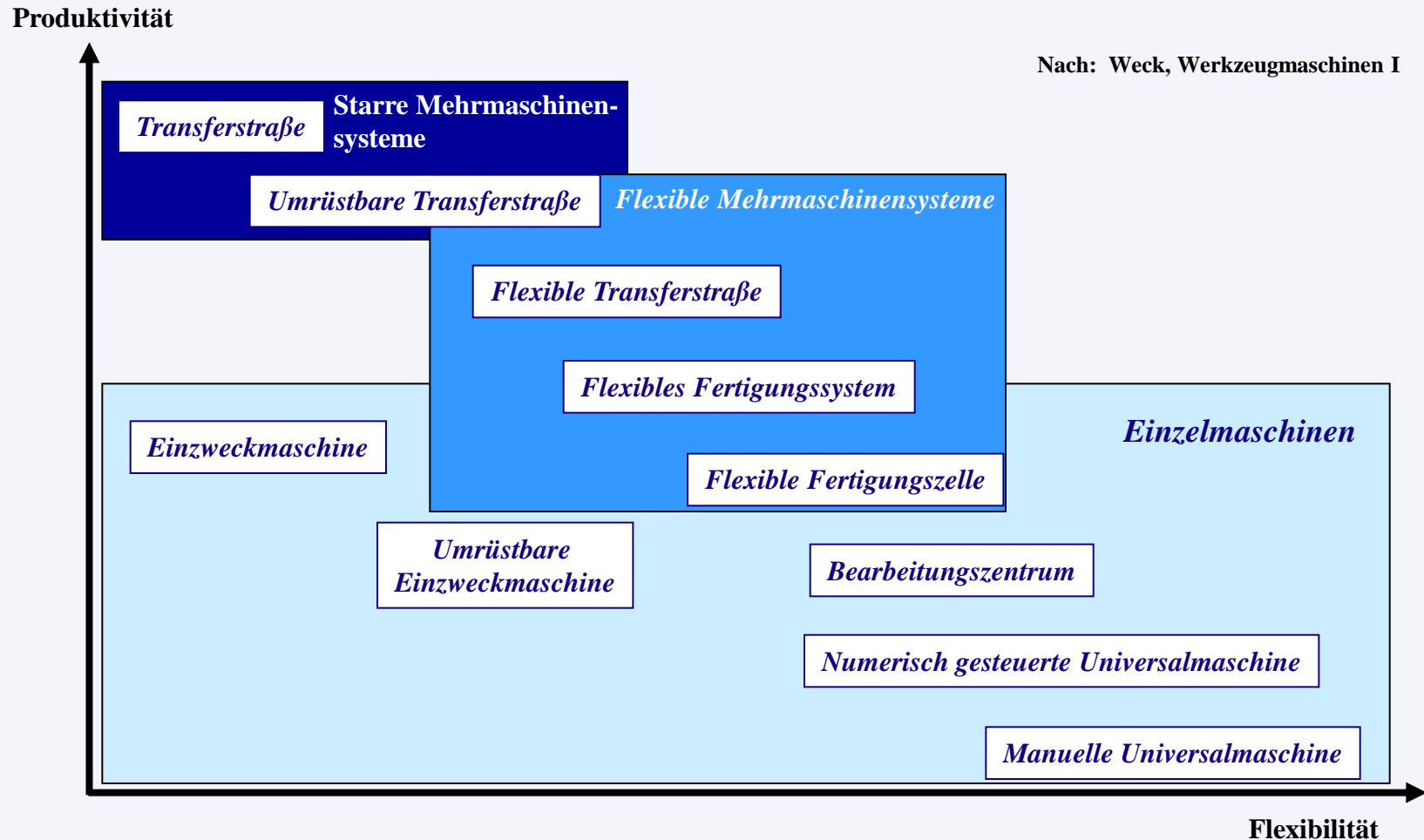


Mehrmaschinen-systeme



Einteilung nach *dem Grad der Flexibilität*

Nach: Weck, Werkzeugmaschinen I



Prinzipieller Aufbau einer Werkzeugmaschine

Hauptantrieb



Vorschubantrieb



Hauptspindel



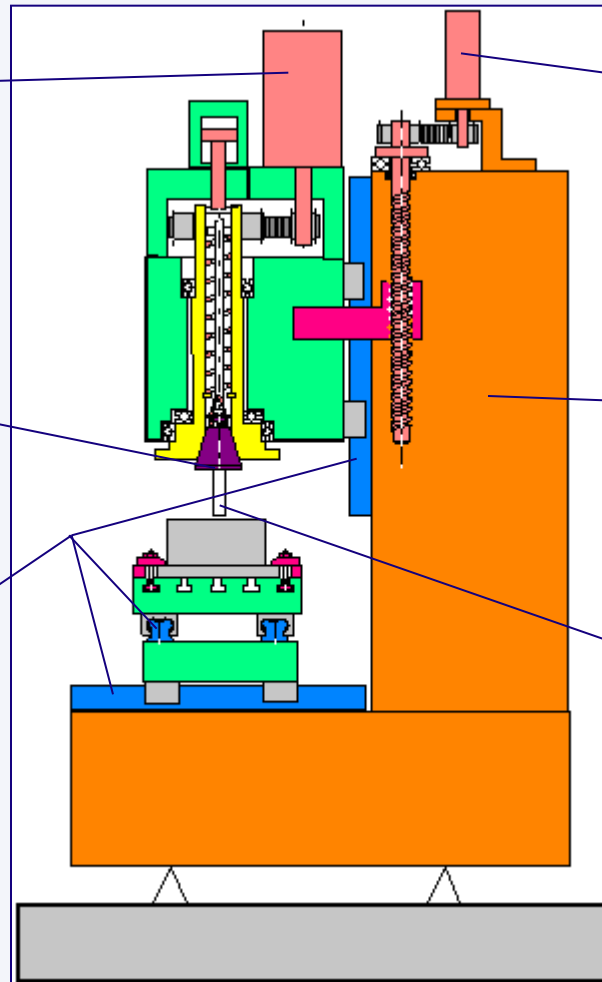
Gestell



Führungen



Werkzeug



Quelle: TU-Dresden

Aufbau einer Werkzeugmaschine am Beispiel eines Bearbeitungszentrums

A
→



Alzmetall



Bauraum

NC-Steuerung

Tellermagazin

Hauptspindelantrieb

Energieführungskette

Ständer

Schiebetür

Doppelgreifer

Z-Schlitten

Spindel

Führungsbahn-Abdeckung

Maschinentisch

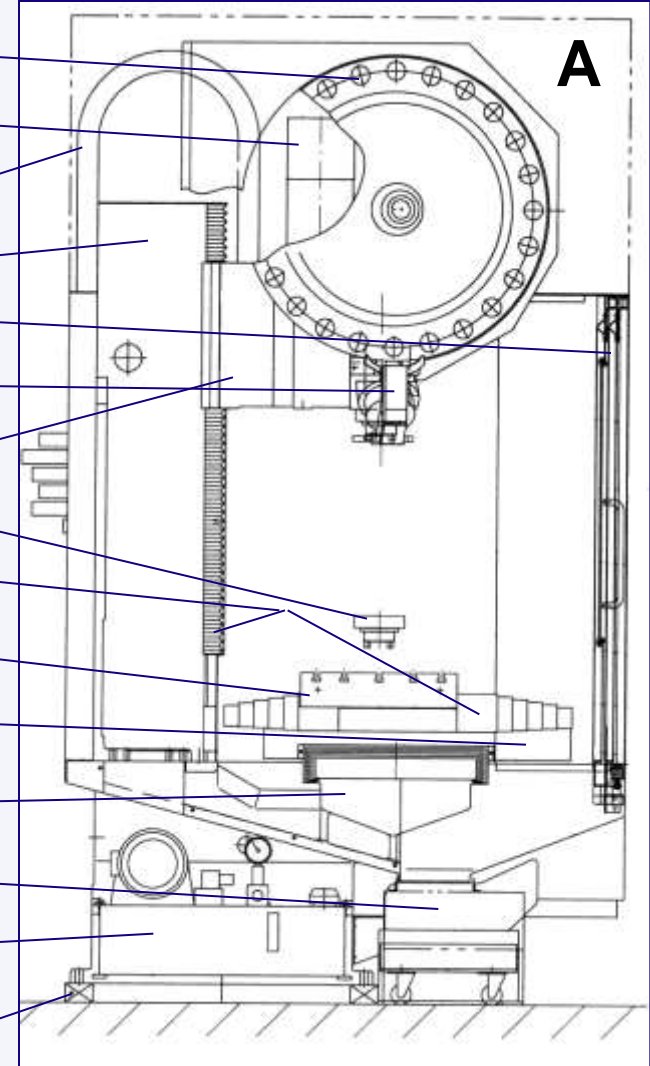
Kreuzteil

Konsole

Späneförderer

Hydraulik

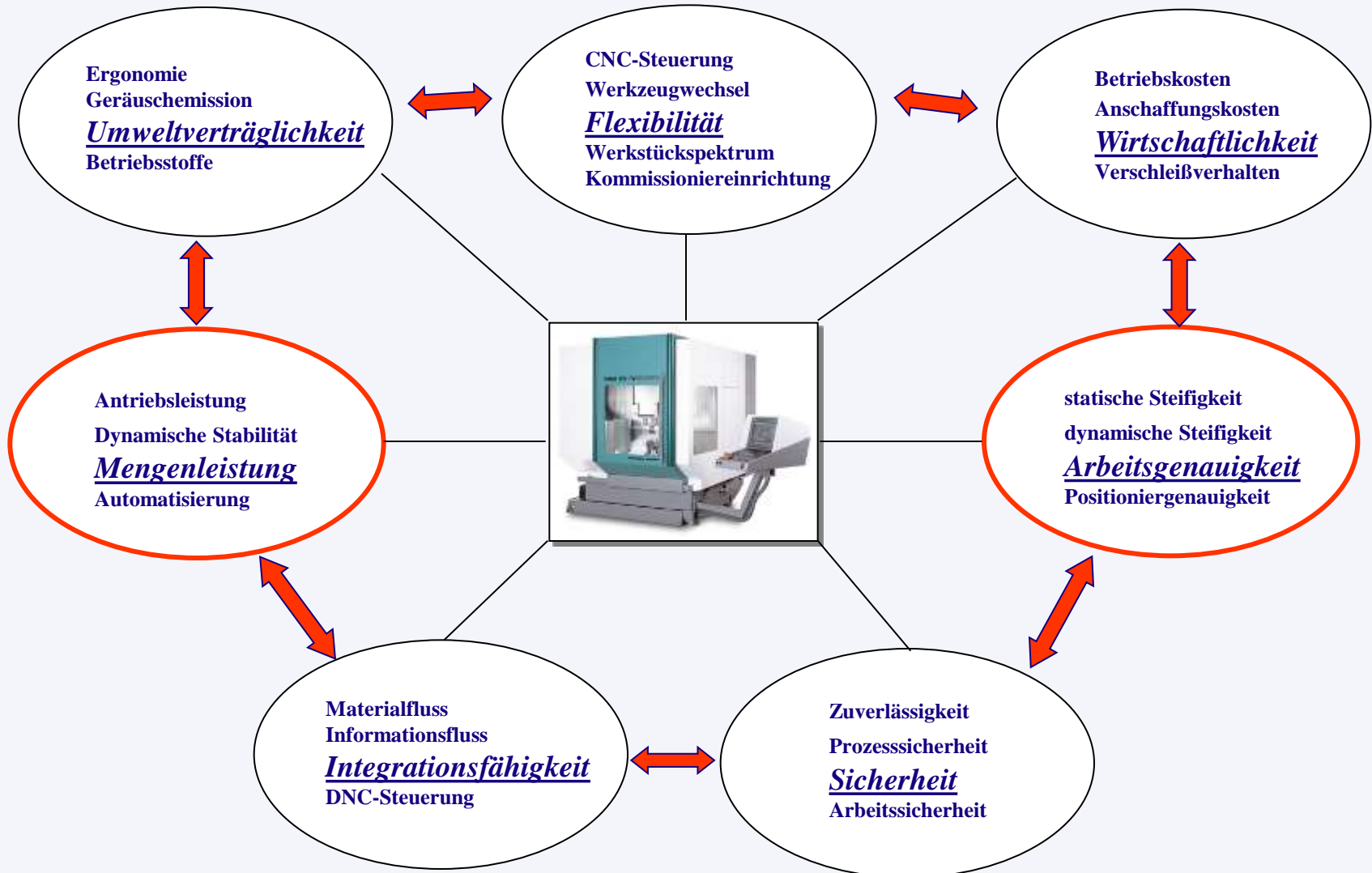
Nivellier-Element



A

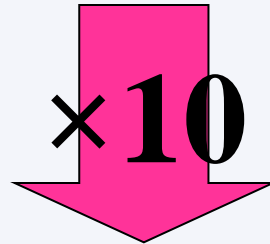
Anforderungen an Werkzeugmaschinen

Allgemeine Anforderungsschwerpunkte für Werkzeugmaschinen



Arbeitsgenauigkeit und Fertigungsgenauigkeit

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



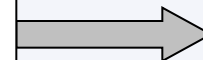
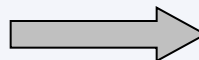
Die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine sollte um den Faktor 10 genauer sein, als die verlangte Fertigungsgenauigkeit des Werkstückes.

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

*Störeinflüsse auf die
Arbeitsgenauigkeit
einer WZM*

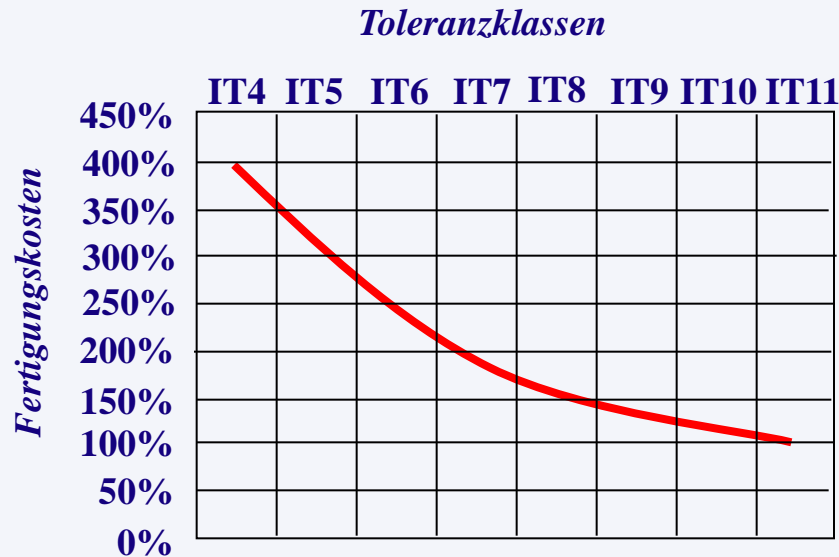


Material
Energie
Information



Material
Energie
Information

Arbeitsgenauigkeit: Einfluß der Toleranzbereiche auf die Fertigungskosten



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

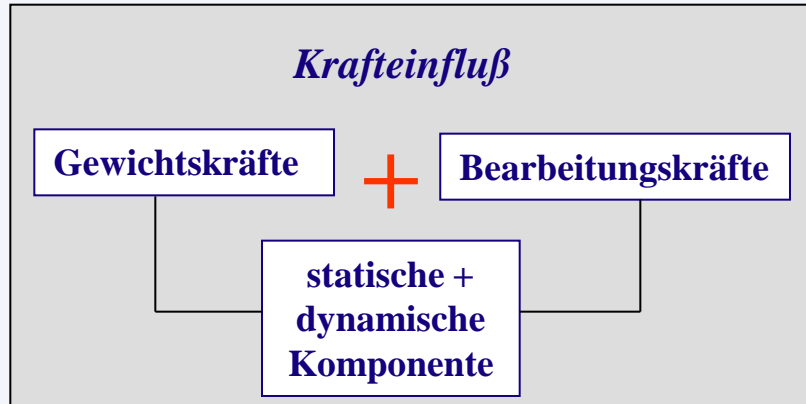
Toleranzklasse		IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11
Toleranz in mm bei Sollmaß 250 bis 315 mm		0,016	0,023	0,032	0,052	0,081	0,13	0,21	0,32
erreichbare Genauigkeit									
Hauptgruppe	Fertigungsverfahren								
	Umformen Gesenkformen								
Umformen	Walzen								
Umformen	Kaltfließpressen								
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:

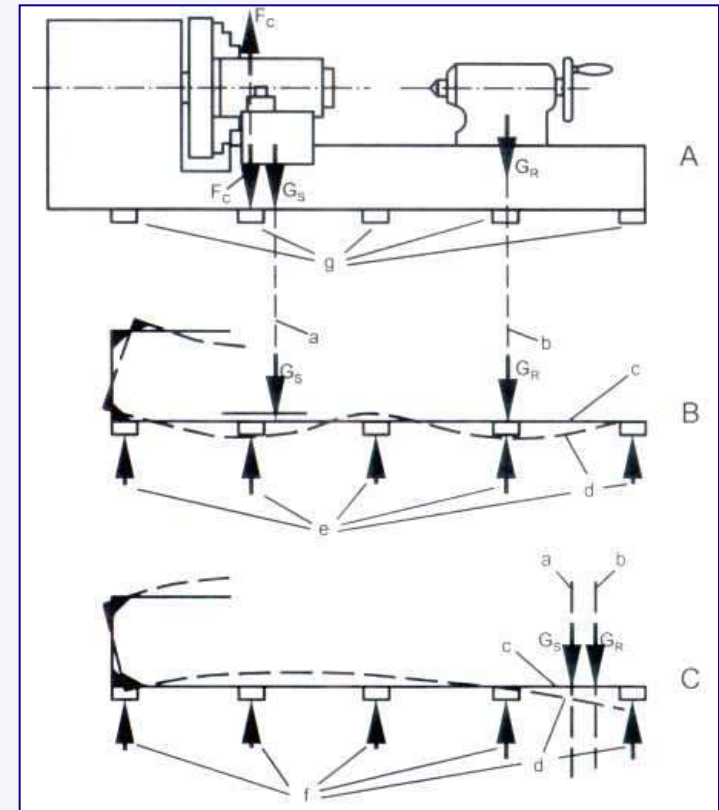
Folge:

- Geometriefehler

Dynamische Belastung (z.B. bei stoßartigem Meißeleingriff)

Folgen:

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



Verformung einer Schwerdrehmaschine durch Eigengewichte (Quelle: Salje)

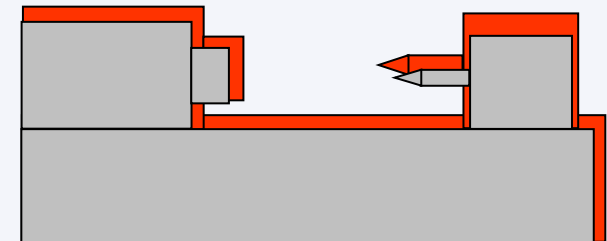
Arbeitsgenauigkeit: Verformung der WZM durch Wärmeeinfluss

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

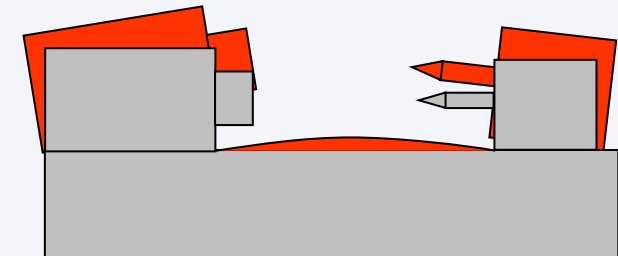
Durch konstruktive Maßnahmen muss die Verformung gefährdeter Bauteile so gering wie möglich gehalten werden.

Hauptwärmequellen

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



Gleichmäßige Erwärmung aller Bauteile



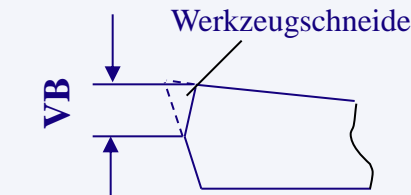
Ungleichmäßige Erwärmung mit maximalen Temperaturen an der Spindellagerung und am Maschinenbett

Quelle: nach Bruins

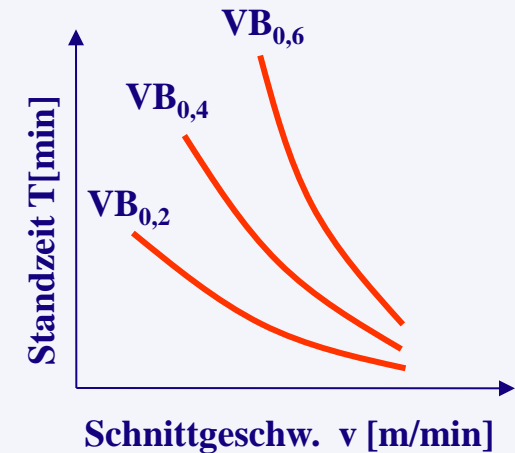
Arbeitsgenauigkeit: Verschleiß

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

Abhilfe: rechtzeitiges Austauschen des Werkzeugs bei Erreichen der Standzeit

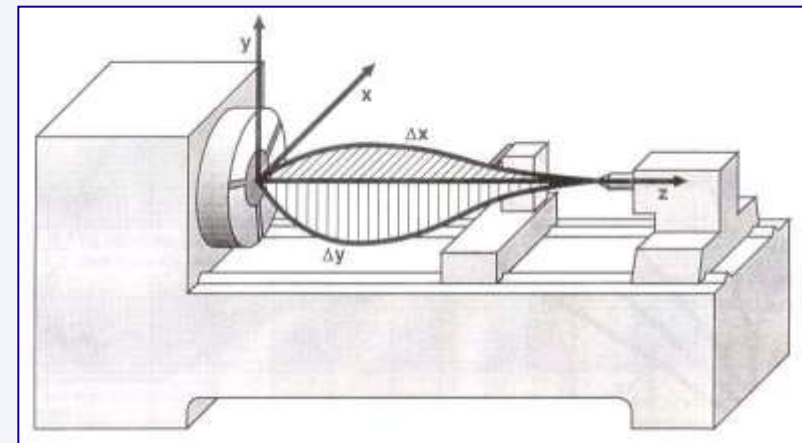


VB = Verschleißmarkenbreite



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

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



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)
- selbsttätiges Messen in der Maschine
- Messen nach der Bearbeitung und Korrektur der Maschineneinstellung
- Verwendung von Kompensationsalgorithmen

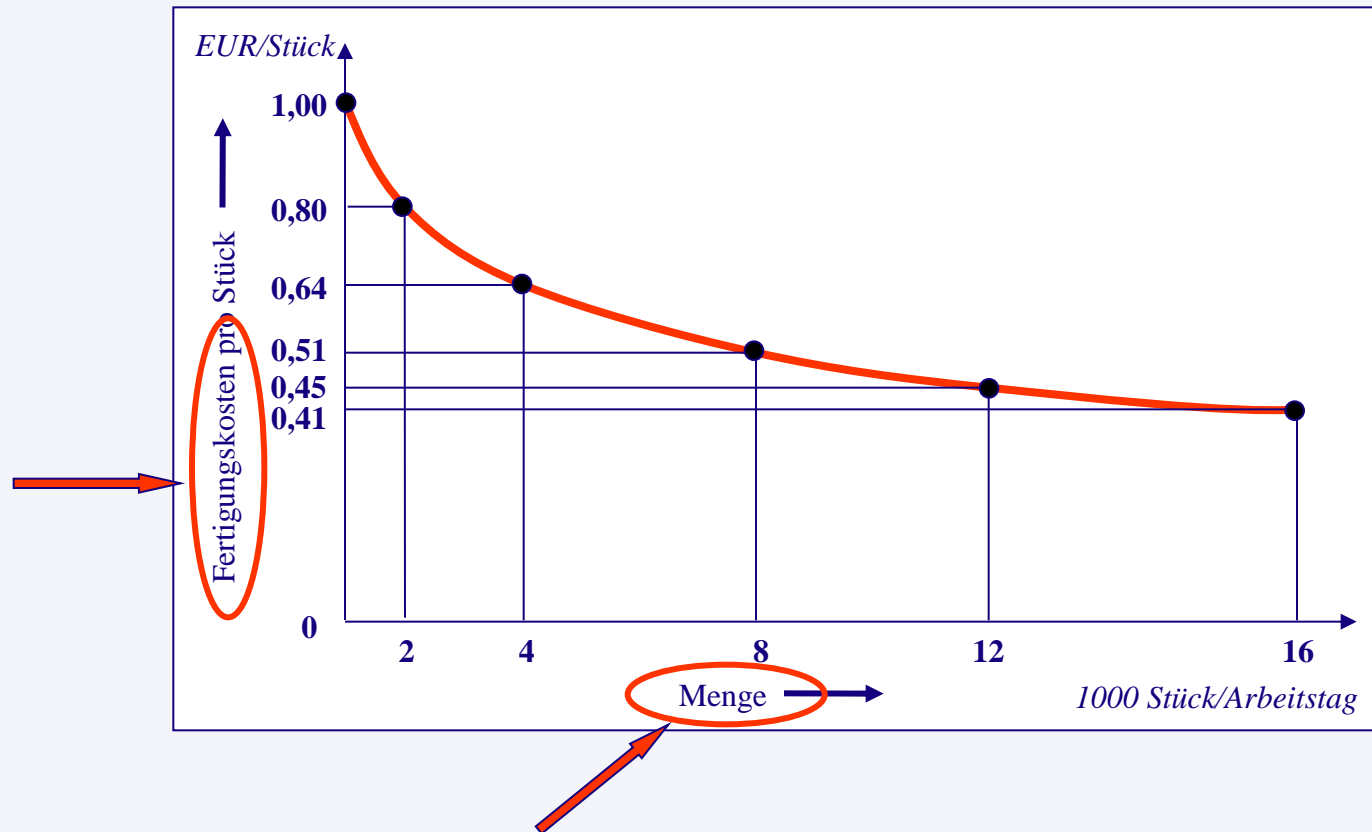


Maßnahmen zur Erhaltung der Arbeitsgenauigkeit

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

Mengenleistung

Mengenleistung und Fertigungskosten

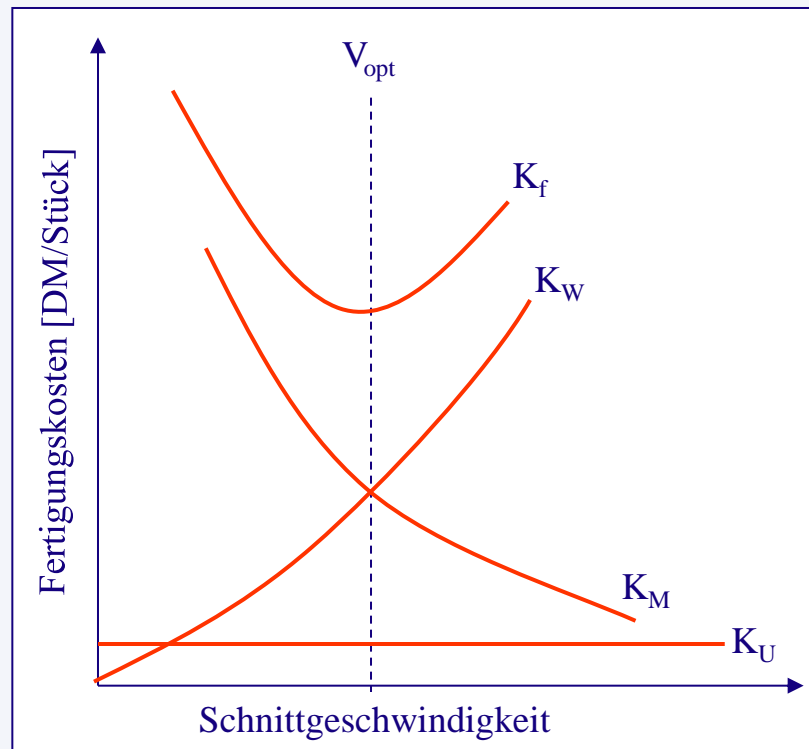


Quelle: Prof. Reinhart, iwB

Mengenleistung: Fertigungskosten

Die Fertigungskosten werden hauptsächlich durch folgende Faktoren beeinflusst:

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

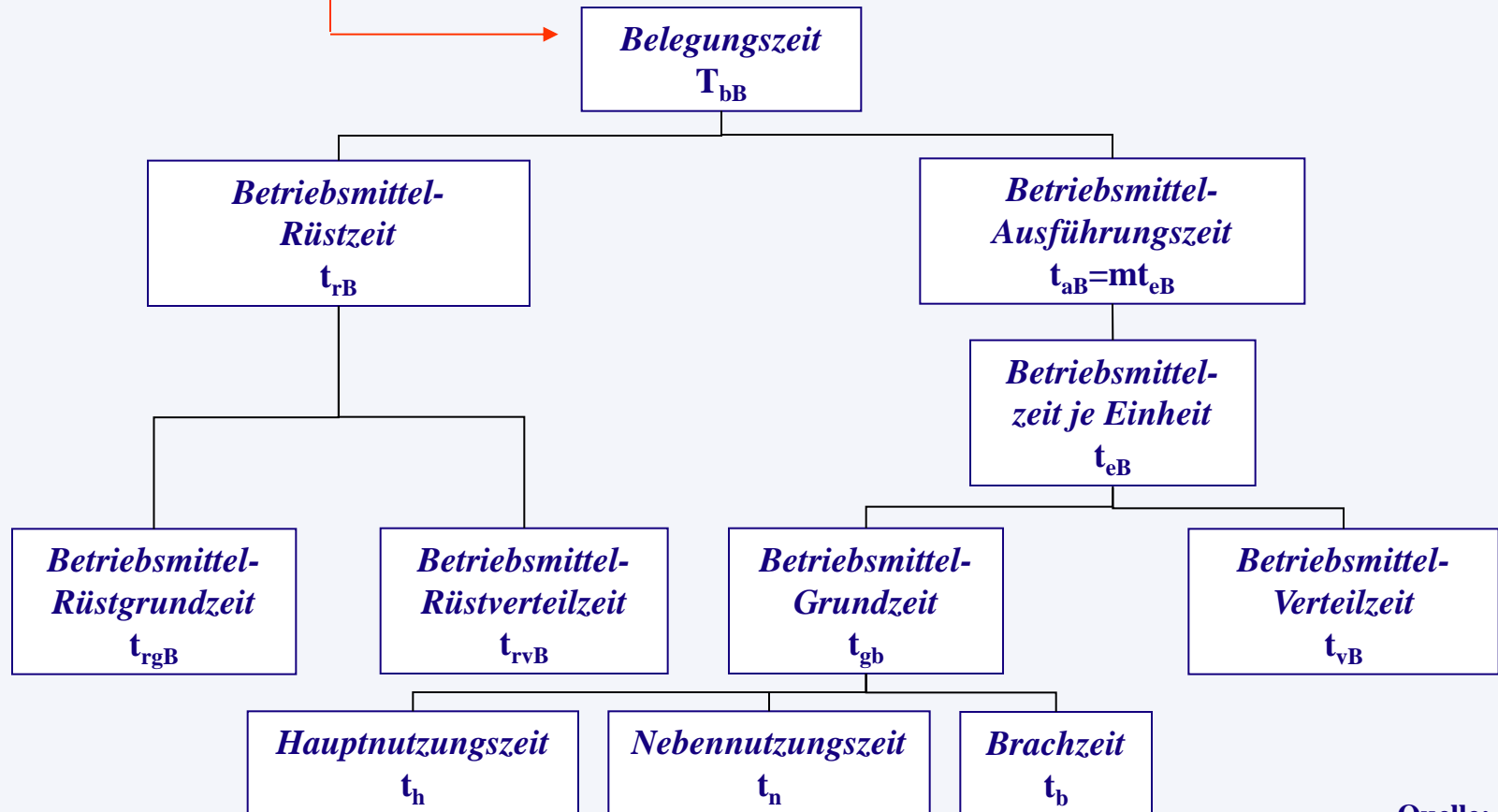


K_f : Fertigungsgesamtkosten
 K_w : Werkzeugkosten
 K_M : Lohn- und Maschinenkosten
 K_U : von der Schnittgeschwindigkeit
 unabhängige Kosten

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

Mengenleistung

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



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-Rüstverteilszeit 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 Spänerraum
- gute Reinigungsmöglichkeiten
- selbsttätige Schmierung

Nebenzeit

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

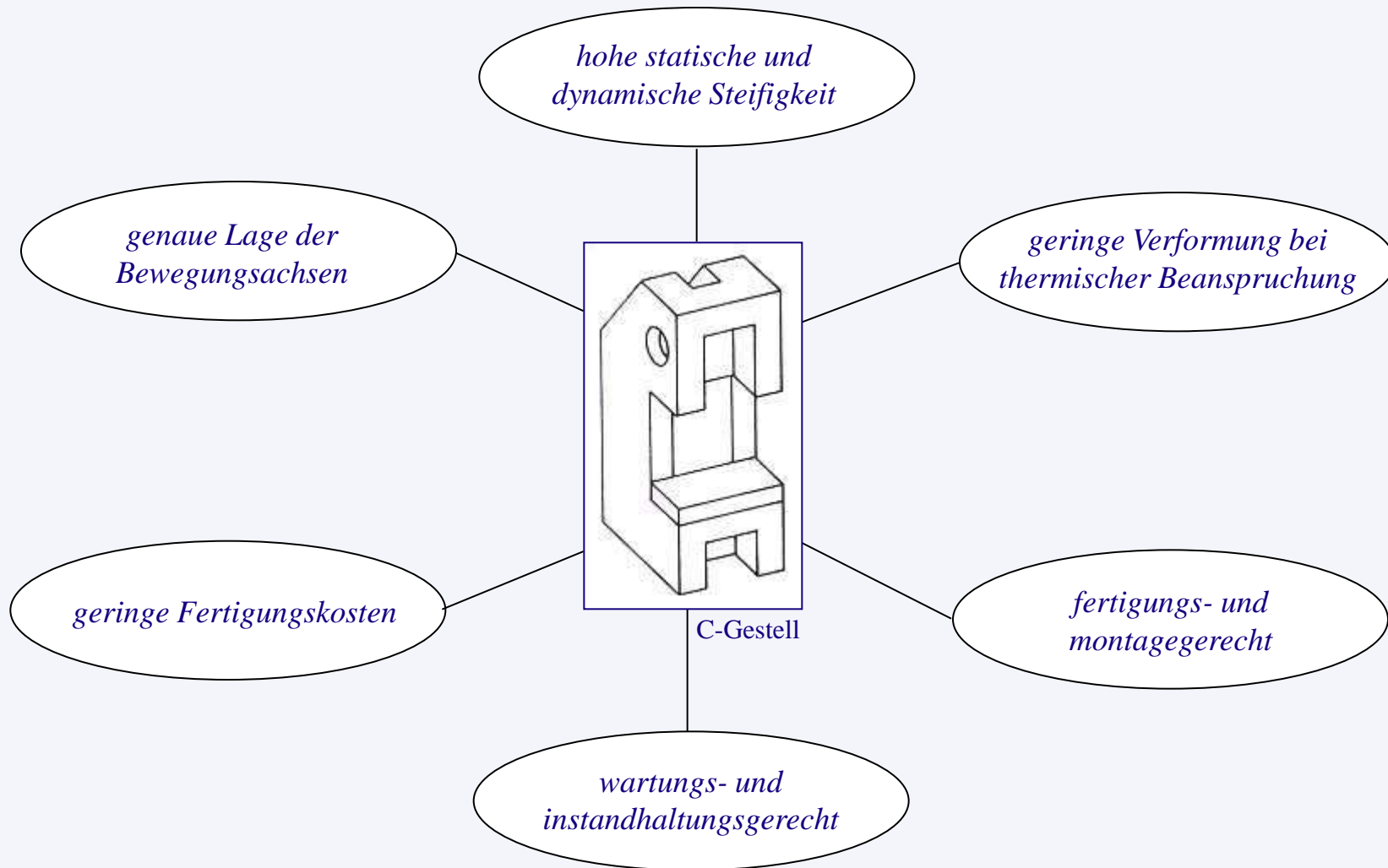
Rüstzeit

- 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

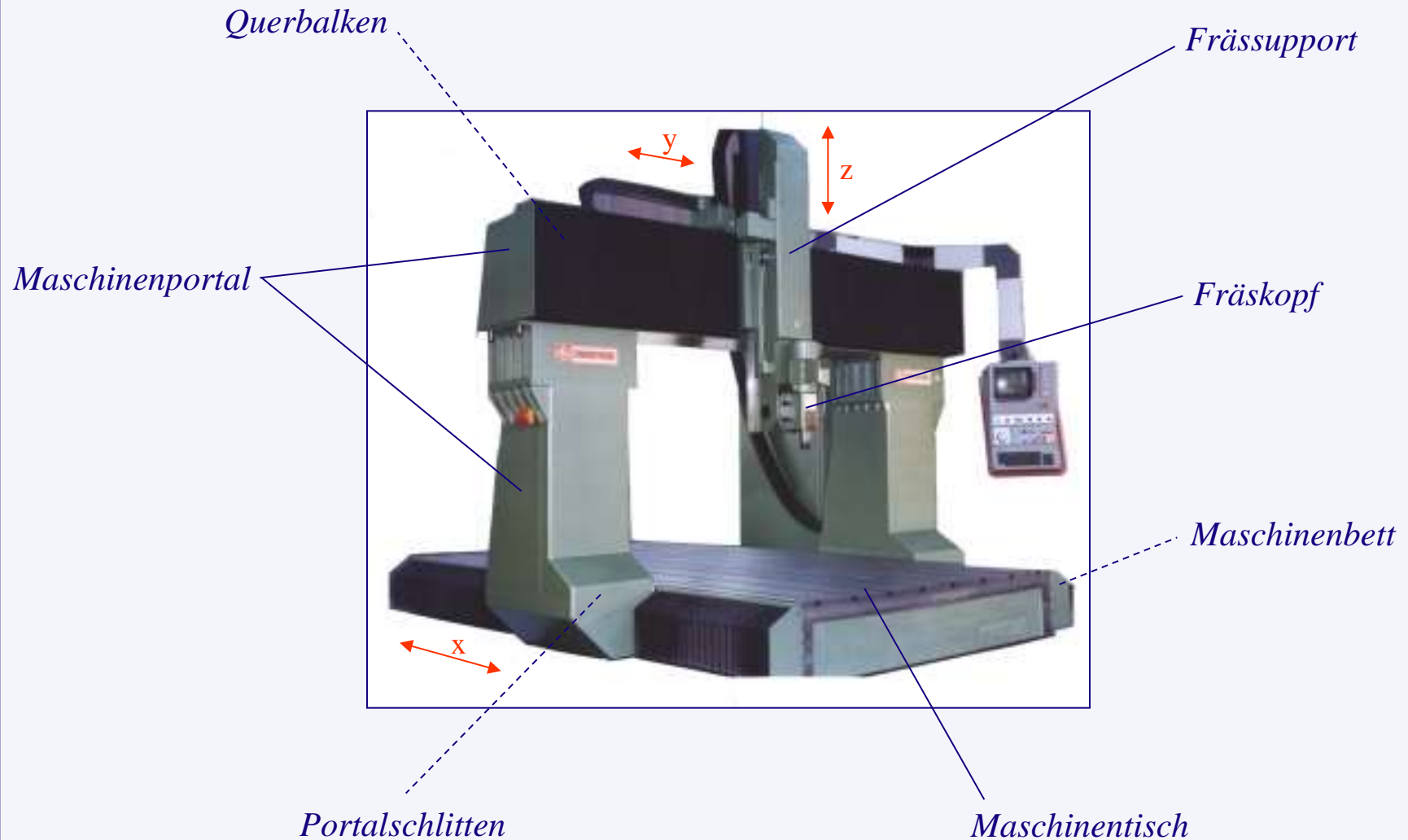
Gestelle und Gestellbauteile



Anforderungen

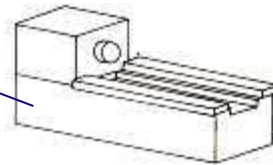


Gestellbauteile einer Portalfräsmaschine (Gantry-Bauweise)



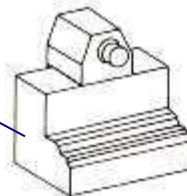
Gestellbauformen für Drehmaschinen (spanende Werkzeugmaschinen)

Flachbettausführung
(konventionell)

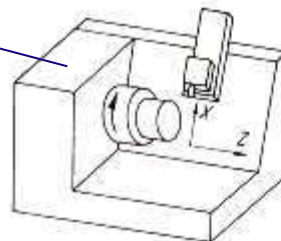


Frontbettausführung

Vorteil:
ein automatisierter Werkstückwechsel ist relativ einfach zu realisieren



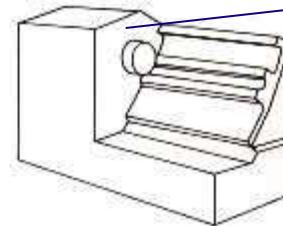
Waagrechtausführung
(Spindel liegt parallel zum Fundament)



Schrägbettausführung

Vorteil:

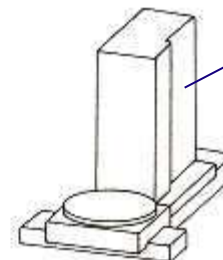
kein Späne- und Kühlmittelstau
(geringere thermische Belastung des Maschinenbetts)



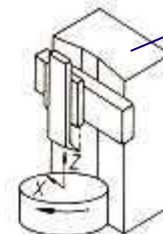
Senkrechtausführung

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

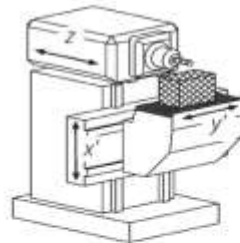
eins

zwei

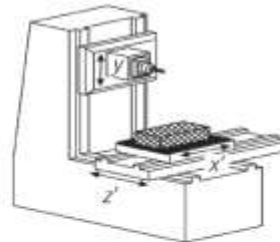
drei

Konsole

Bett



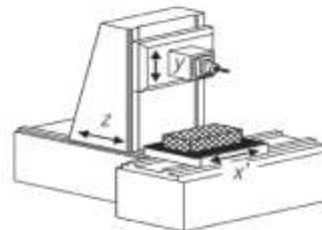
Konsolständerbauweise



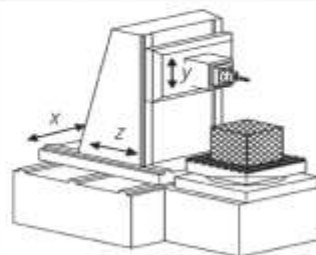
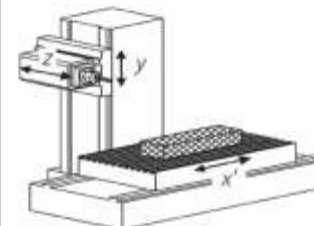
Kreuztischbauweise



Konsolbettbauweise



Kreuzbettbauweise



Fahrständerbauweise



Bohrwerkbauweise

Quelle: Dubbel 2007

Bauformen vertikaler Bohr- und Fräsmaschinen

Bauform

Konsole

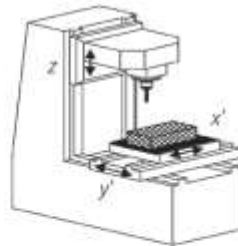
Bett

Portal

eins



Konsolständerbauweise

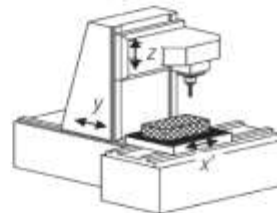


Kreuztischbauweise

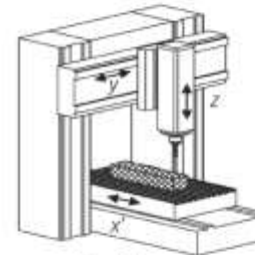
zwei



Konsolbettbauweise

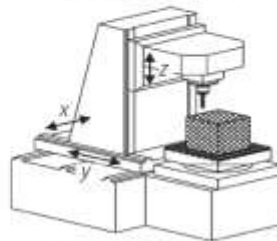


Kreuzbettbauweise

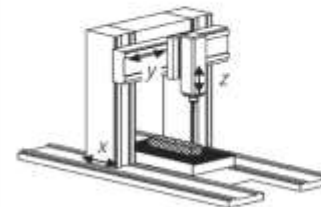


Tischbauweise

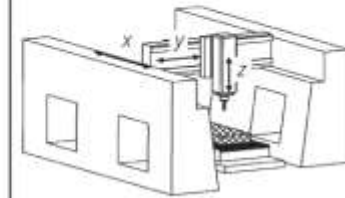
drei



Fahrständerbauweise



Gantrybauweise



obenliegende Gantrybauweise

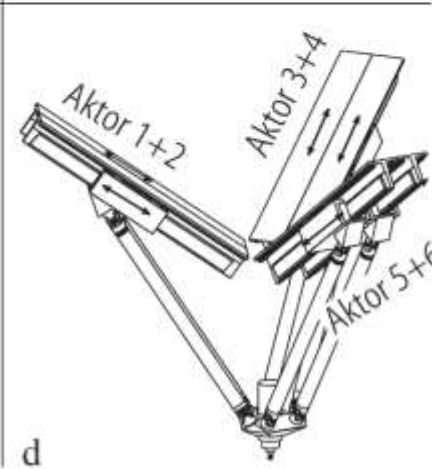
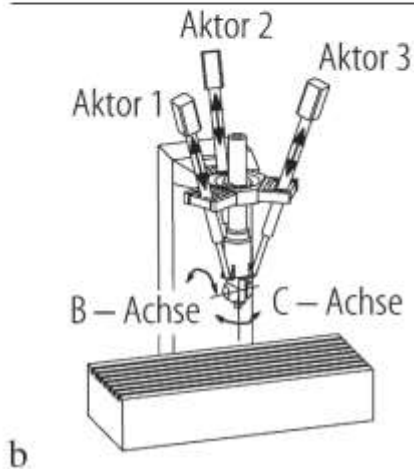
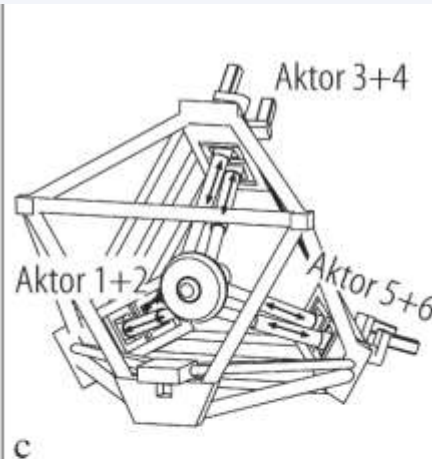
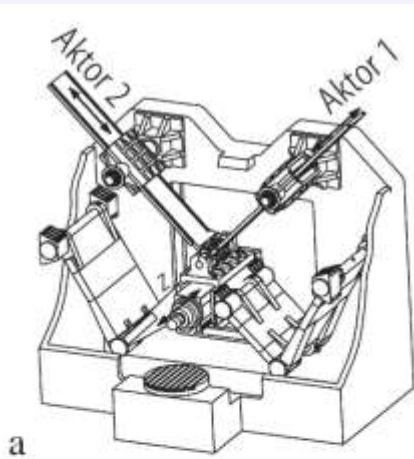
Quelle: Dubbel 2007

Bauformen paralleler Kinematiken

Bauform

Hybride Kinematiken

Vollparallele Kinematiken



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 sechsig sein.

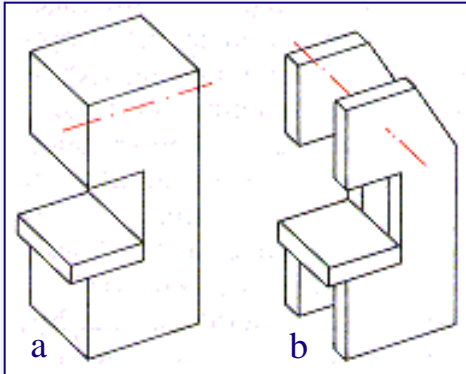
Bei den hybriden Kinematiken ist ein Teil der Achsen weiterhin seriell angeordnet, wobei die Bewegung des parallelen Anteils sowohl eben als auch räumlich sein kann. Die vollparallelen Kinematiken unterscheiden sich bezüglich der Antriebsform in Formen mit längenveränderlichen Streben und ortsfesten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



Quelle: Dubbel 2007

Grundgestellbauformen für Pressen (umformende Werkzeugmaschinen)

C-Gestelle



Einsatzbereich:

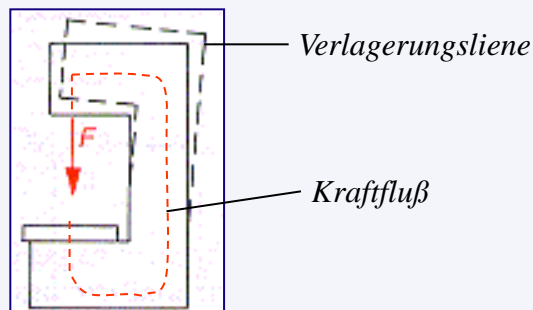
kleine bis mittlere Pressen

- a) 1-Ständer-Gestell
- b) Doppelständergestell

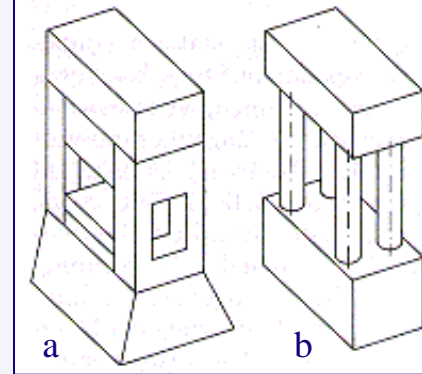
Vor- und Nachteil:

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

Verformung eines C-Gestells



O-Gestelle



Einsatzbereich:

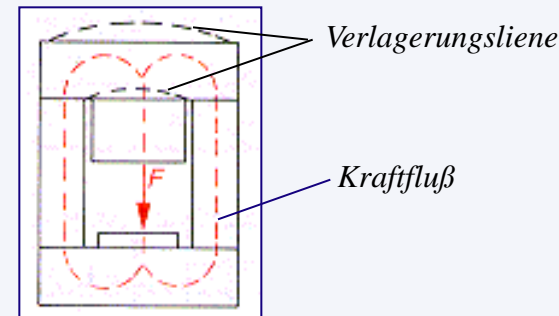
mittlere bis große Pressen

- a) 2-Ständer-Gestell
- b) Säulengestell

Vor- und Nachteil:

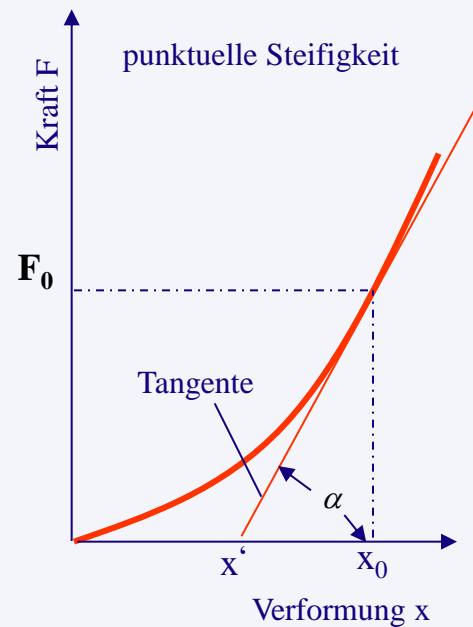
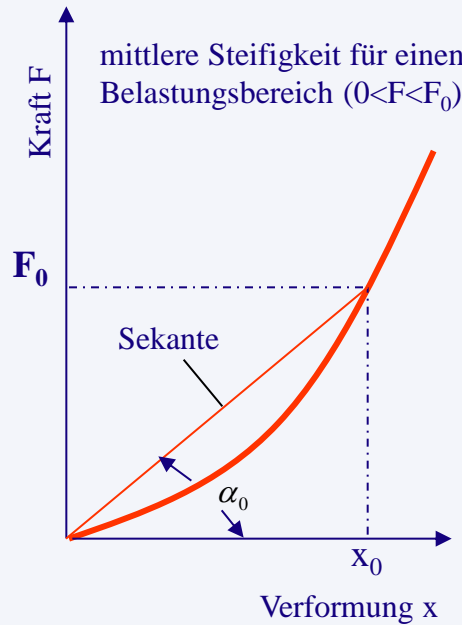
- + besonders gute Führung des Werkzeugs durch das steife O-Gestell
- schlechte Zugänglichkeit zum Arbeitsraum

Verformung eines O-Gestells



Quelle: Hesse, Umformmaschinen

Statische Kenngrößen: Steifigkeit und Nachgiebigkeit



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

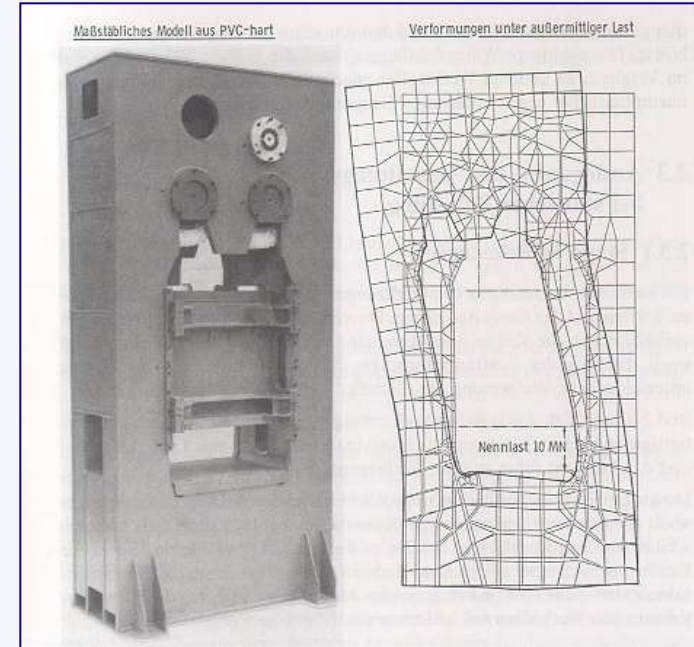
$$k = \tan \alpha_0$$

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

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

Die Nachgiebigkeit d ist der Kehrwert der Steifigkeit k

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



Statische Verformung eines Pressengestells bei außermittigem Kraftangriff (Quelle: Weck)

Kraftfluß- und Verformungsanalyse

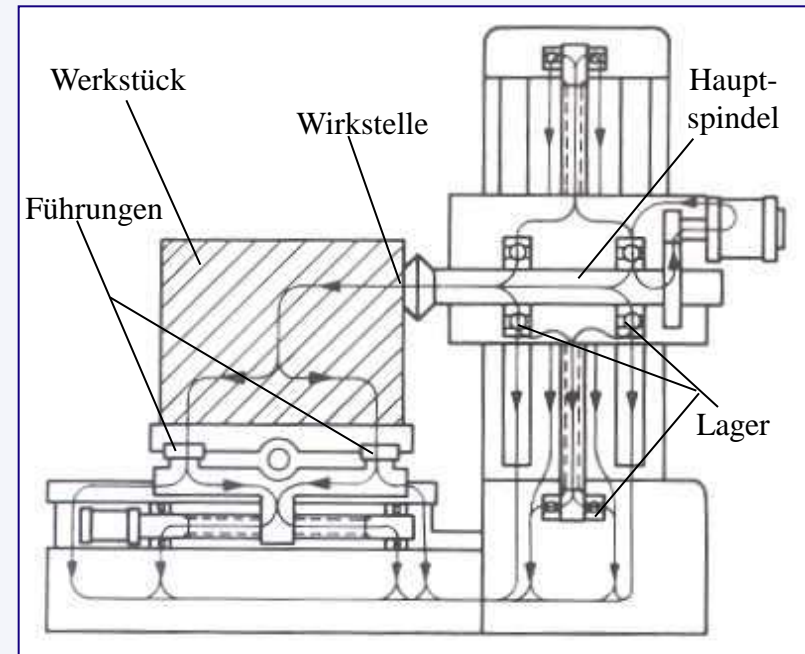
Die Gesamtverformung einer Werkzeugmaschine setzt sich aus den Deformationen aller im Kraftfluß liegenden Maschinenelemente (Lager, Führungen, Gestelle, Spindeln usw.) zusammen.

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.

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

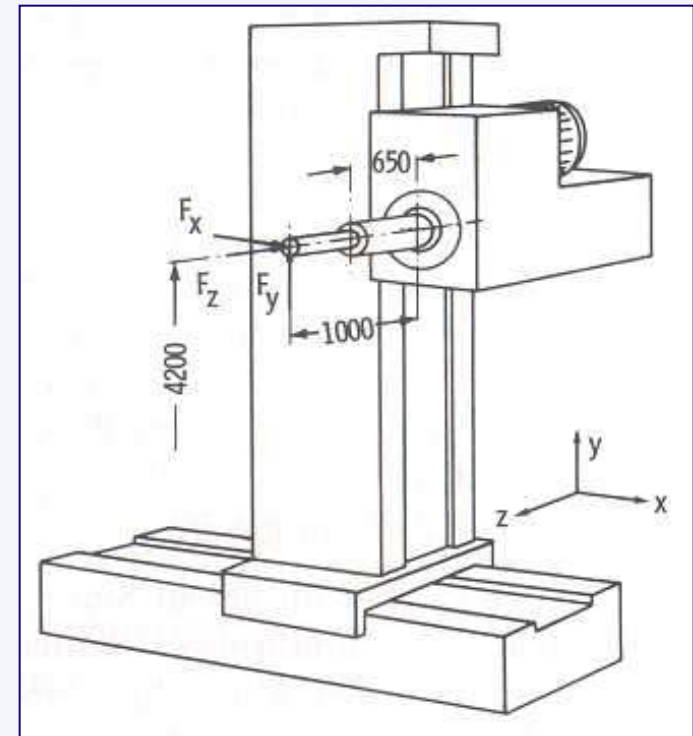
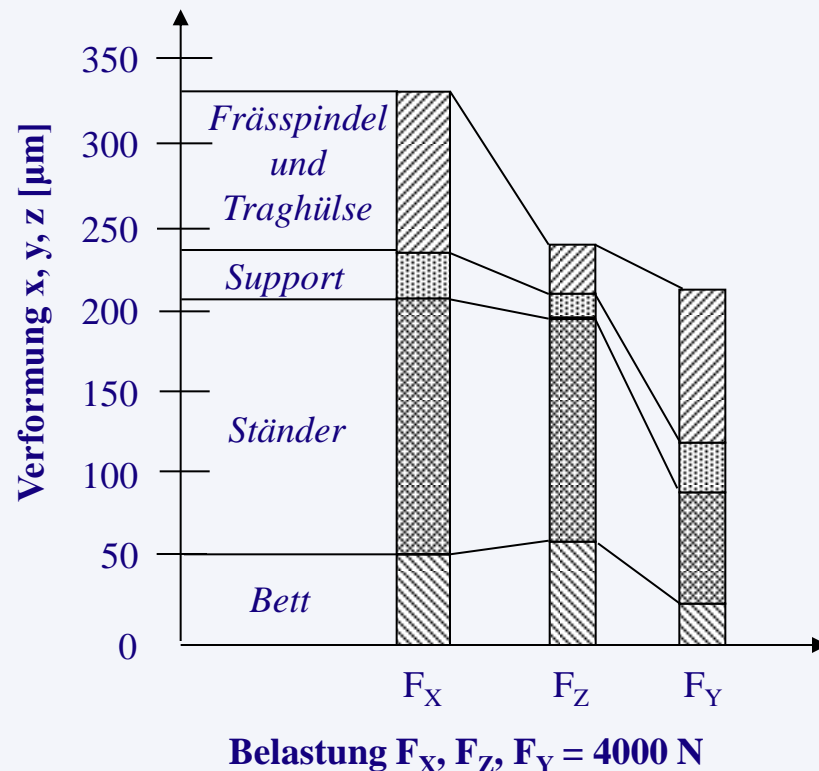
Die Werkzeugmaschine ist also stets „weicher“ als ihr nachgiebigstes im Kraftfluß liegendes Bauteil.



Kraftfluß in einer WZM (Quelle: Weck)

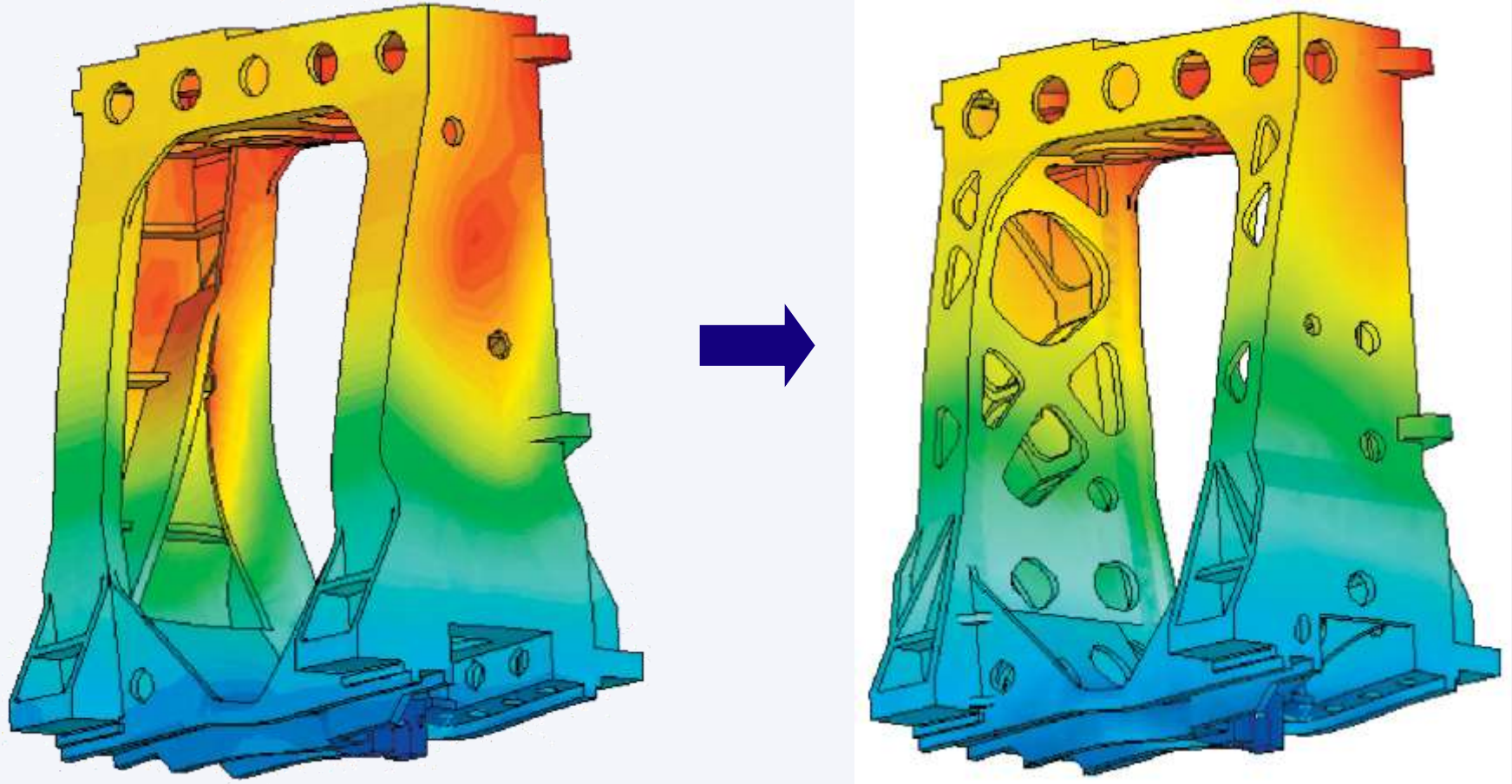
Verformungsanalyse an einem Bohr- und Fräswerk

Belastungsfall: 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.

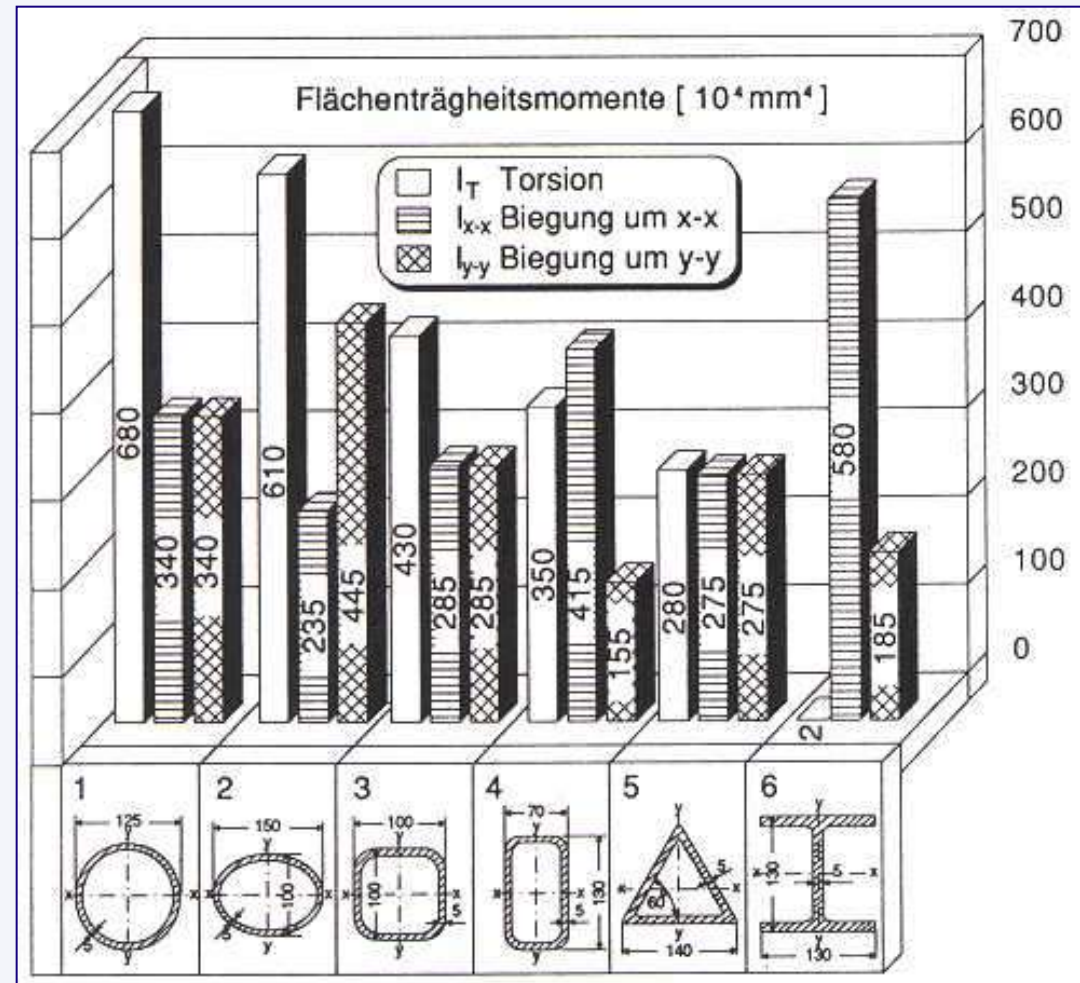
FAZIT

Biegebeanspruchung:

Verwendung von rechteckigen Querschnitten

Torsionsbeanspruchung:

Kreisquerschnitte, geschlossene Querschnitte



Quelle: Weck

Verrippung von Hohlkörpern

	rel.Biegesteifigkeit $F/2 \rightarrow$ $F/2 \rightarrow$ 50 % 100		rel.Torsionssteifigkeit $F \leftarrow$ $F \rightarrow$ 50 % 100		relatives Materialvolumen 100 % 150
	100% m.Kpl.		100% m.Kpl.		100% m.Kpl.
	100% o.Kpl.		9,4% o.Kpl.		93% o.Kpl.
	120%		101%		122%
	111%		12,1%		115%
	120%		101%		145%
	112%		18,2 %		138%
	118%		116%		132%
	118%		104%		125%
	142%		119%		163%
	142%		117%		157%
	100%		104%		107%
	100%		109%		115%

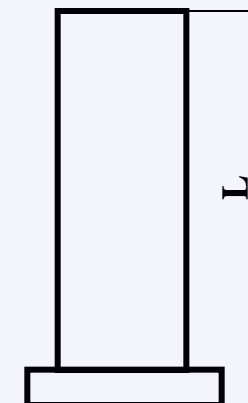
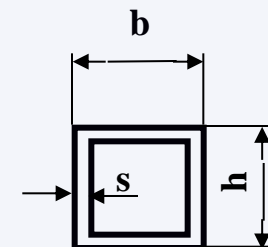
Abmessungen:

$L = 455 \text{ mm}$

$b = 154 \text{ mm}$

$h = 154 \text{ mm}$

$s = 4 \text{ mm}$



FAZIT

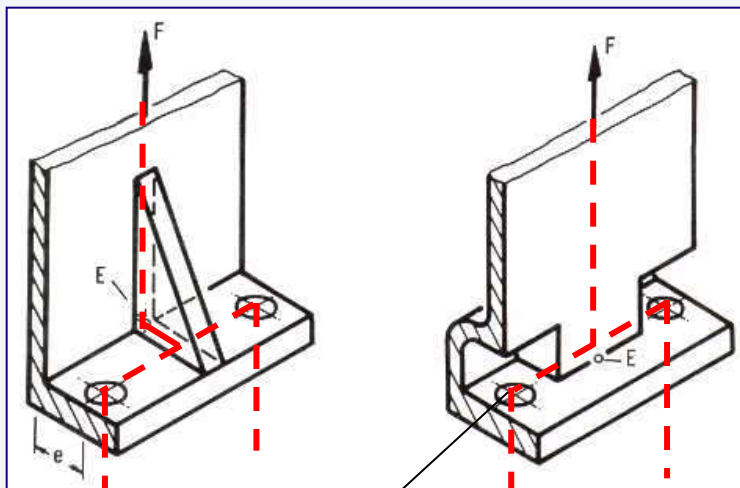
- geschlossene Bauweise (z.B.Kopfplatte)
- möglichst keine Wanddurchbrüche
- doppelt diagonale Längsverrippung

Quelle: Weck

Fügeverbindungen: Kraftflußgerechte Flanschgestaltung

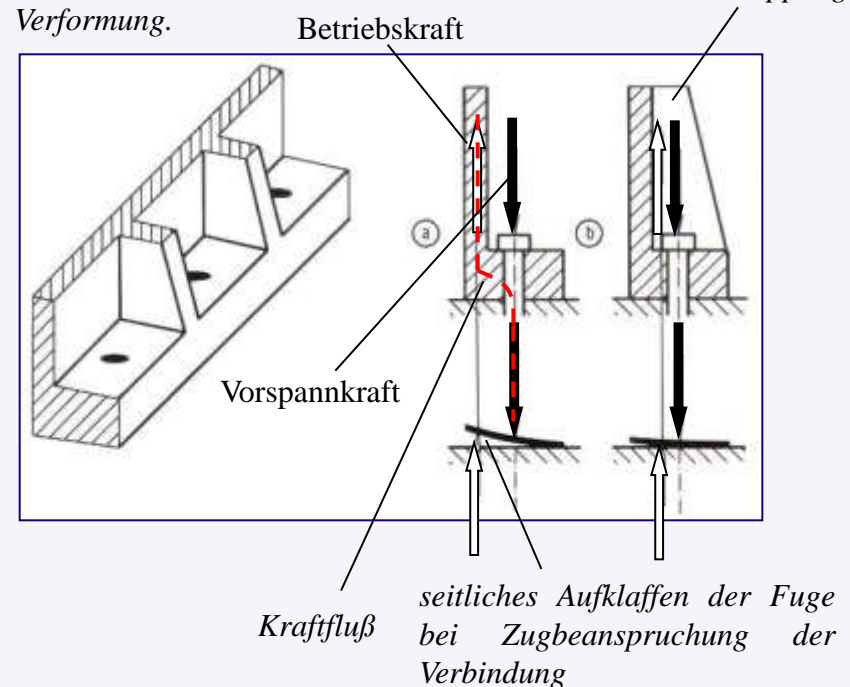
Gestellbauteile werden miteinander oder mit dem Fundament durch kraft- und formschlüssige Fügverbindungen gekoppelt. Die dabei entstehenden Fugen beeinflussen die Gesamtsteifigkeit der Gestelle nachhaltig, da diese meistens im Kraftfluss liegen.

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)

Quelle: Weck

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*

Reibungskräfte

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

Spann- und Klemmkräfte

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

Beschleunigungskräfte

- *Massen der zu bewegendenden 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 Flächenträgheitsmomentes wirkt
- große Bauteil Querschnitte

Torsionsbeanspruchung

- geschlossene Hohlprofile
- günstige Verrippung
- Durchbrüche vermeiden

Werkstoff mit einem hohen E-Modul verwenden

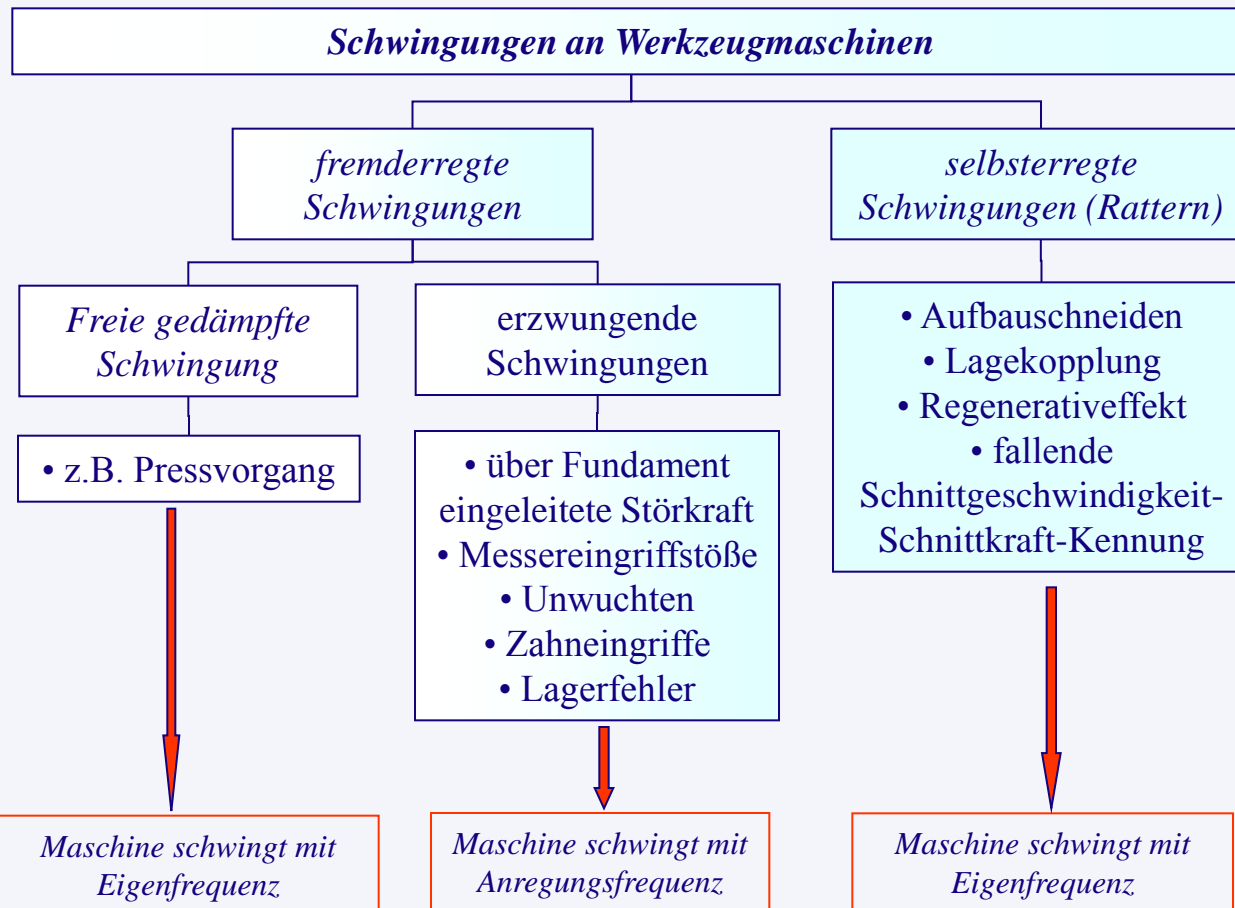
Gestellwerkstoffe

Werkstoff	Vorteil	Nachteil
<i>Grauguß</i>	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
<i>Stahlguß</i>	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
<i>Stahl</i>	große Festigkeit dadurch kleine Gestellquerschnitte, 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
<i>Beton</i>	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 Graugßkörper auf den Beton geschraubt	niedriger E-Modul (30.000 N/mm ²), unsicheres Langzeitverhalten, Zugempfindlichkeit, lange Aushärtedauer, teure Spannverfahren, aufwendige Oberflächenbeschichtung

Quelle: Charchut/Tschätsch

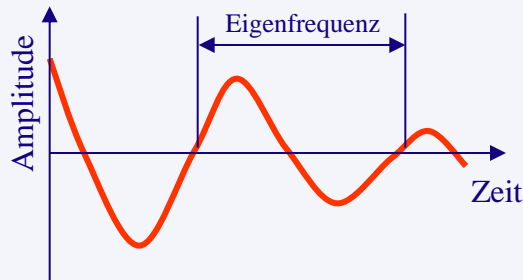
Dynamische Belastungen

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

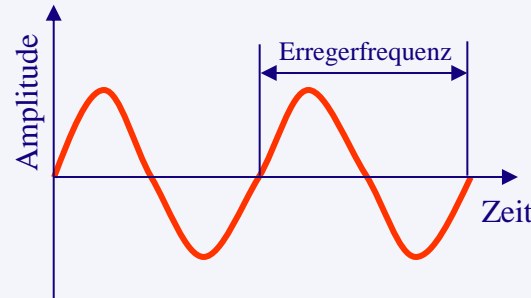


Schwingungsformen

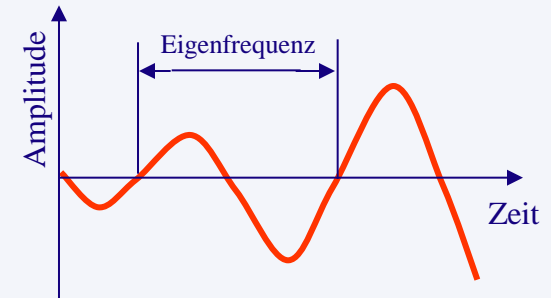
Freie gedämpfte Schwingung



Erzwungene (fremderregte) Schwingung



Selbsterregte Schwingung



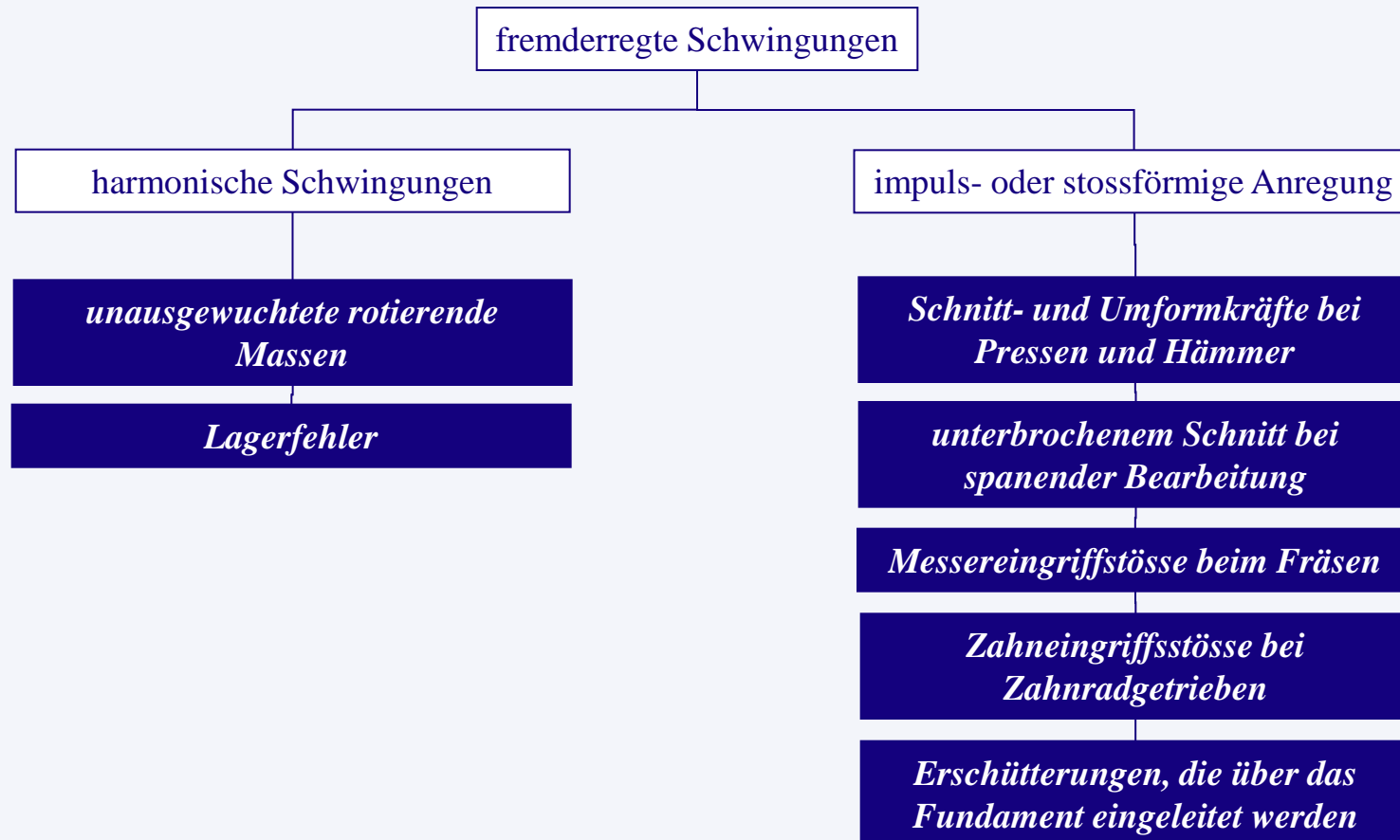
Die Eigenfrequenz ist die Frequenz, mit der ein schwingungsfähiges System bei einmaliger Anregung ausschwingt.

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

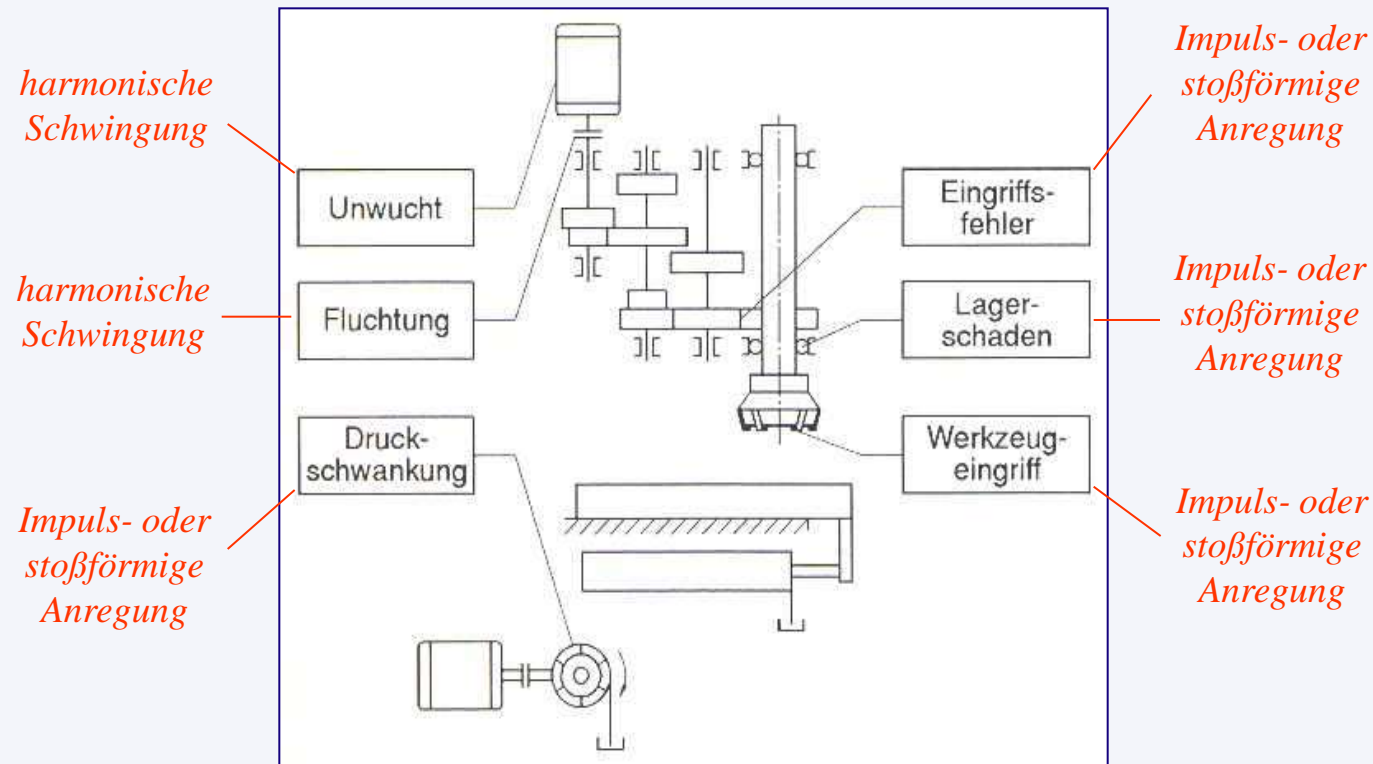
➔ *Liegt die Frequenz der Anregung im Bereich der Eigenfrequenz des Schwingungssystems, kann dies zu besonders großen Schwingungsausschlägen führen (siehe selbsterregte Schwingung). Das System wird instabil!*

Fremderregte Schwingungen

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



Schwingungsanregungen am Beispiel einer Fräsmaschine

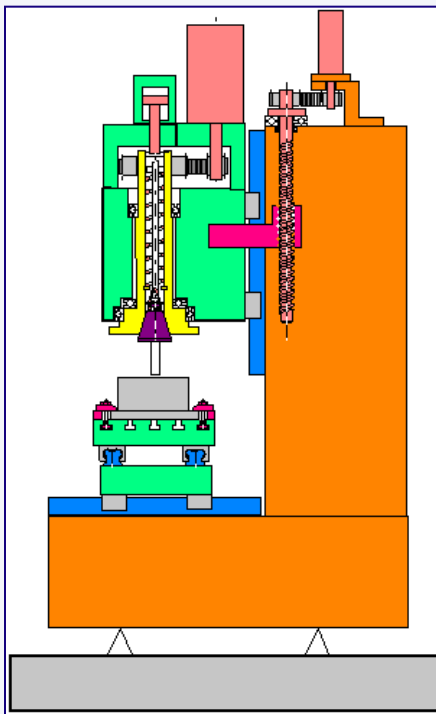


Erregung in Werkzeugmaschinen (Quelle: Tönshoff, WZM)

Schwingungssystem: Werkzeugmaschine

Werkzeugmaschine:

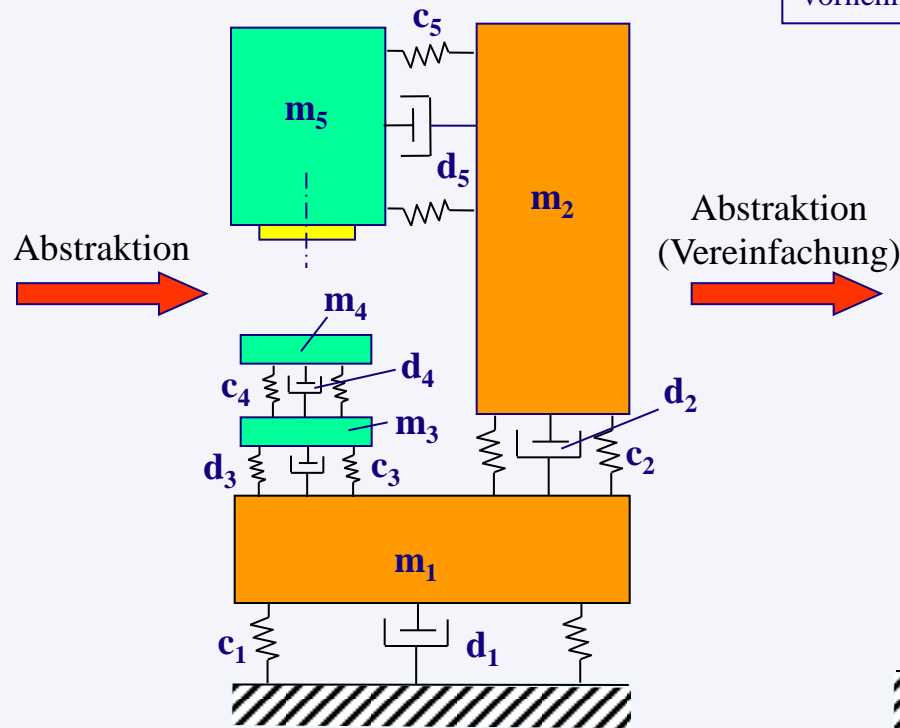
Sie verhält sich hinsichtlich des dynamischen Verhaltens wie ein Mehrmassenschwinger



Werkzeugmaschine
(Quelle: TU Dresden)

Mehrmassenschwinger:

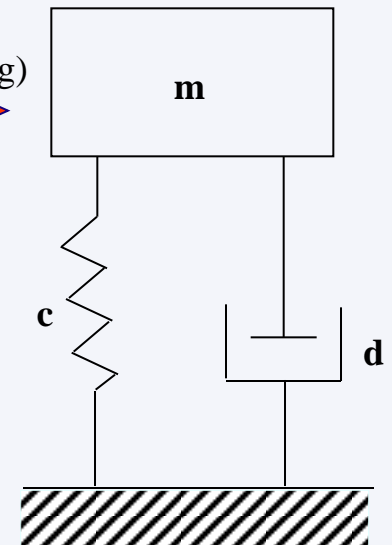
Die Schwingung eines Bauteils wird durch das benachbarte Bauelement beeinflusst. Dies führt zu einem sehr komplizierten Schwingungsgebilde



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

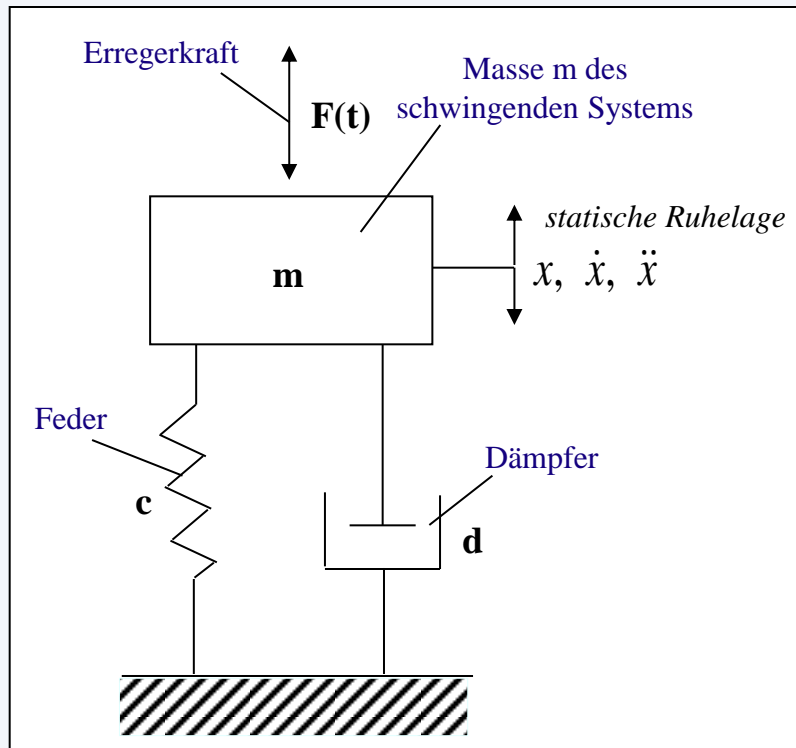
Einmassenschwinger:

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



Einmassenschwinger

Abstraktion: Modell eines Einmassenschwingers



Einmassenschwinger

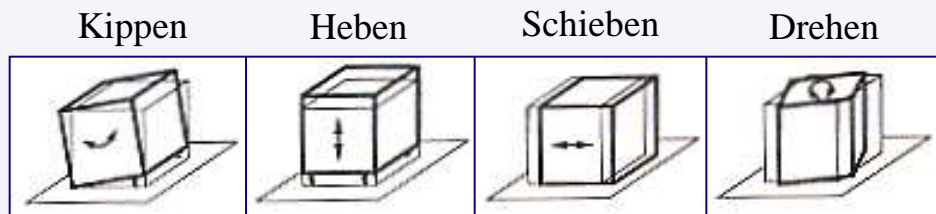
Aus dem Kräftegleichgewicht, für eine gedämpfte Schwingung mit Erregerkraft $F(t)$, in x -Richtung folgt eine (inhomogene) Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{Masse} & & \text{Dämpfung} & & \text{statische Steifigkeit} & & \text{Erregerkraft} \\
 | & & | & & | & & | \\
 m\ddot{x} & + & d\dot{x} & + & cx & = & F(t) \\
 \underbrace{\phantom{m\ddot{x}}} & & \underbrace{\phantom{d\dot{x}}} & & \underbrace{} & & \\
 \text{Massenkraft } F_m & & \text{Dämpfungskraft } F_d & & \text{Federkraft } F_c & &
 \end{array}$$

Dämpfung in Gestellbauteilen

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

Starrkörperschwingung

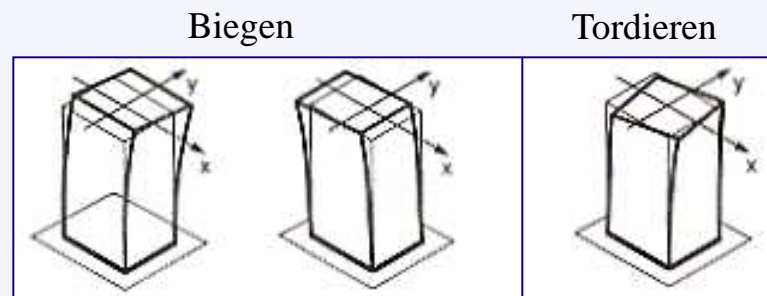


Dämpfung wird beeinflusst durch:

- Verschraubungen
- Führungen
- Schweißfugen
- Massenverteilung

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

Biege- und Torsionsschwingung



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 Gestellquerschnitte, 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

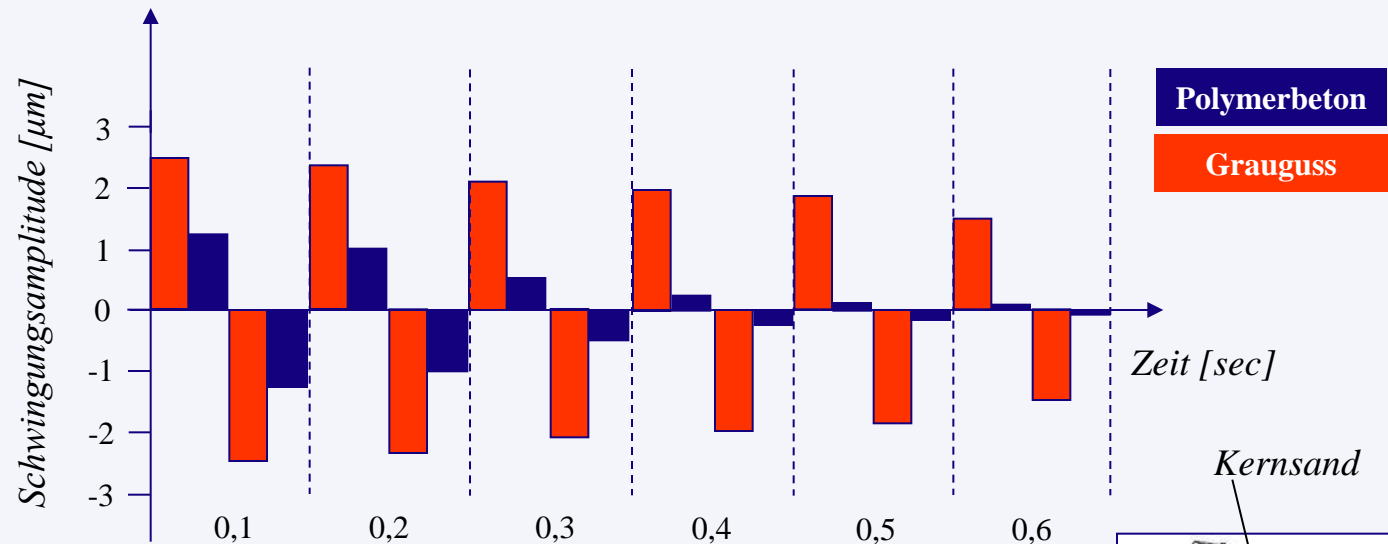
Obwohl Stahl eine wesentlich schlechtere Dämpfungseigenschaft als Grauguss besitzt, wird dieses Defizit in der Regel durch die hohe Dämpfung in den Koppelstellen (Schweißfugen) kompensiert.

Quelle: Charchut/Tschätsch

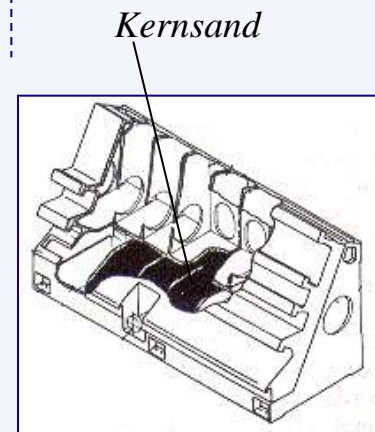
Dämpfung in Gestellbauteilen

Schwingungsdämpfung von Grauguss im Vergleich zu Polymerbeton

(Quelle: Koether, Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure)



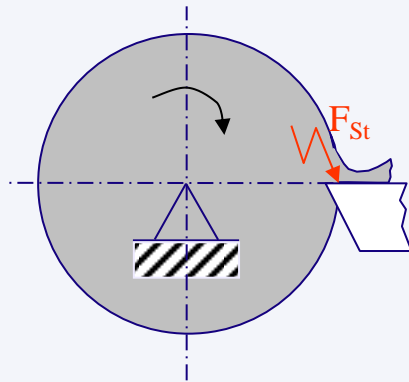
Um die Dämpfungseigenschaften von *Gussgestellen* zu verbessern, belässt man den Kernsand im Gestell (trockene Reibung).



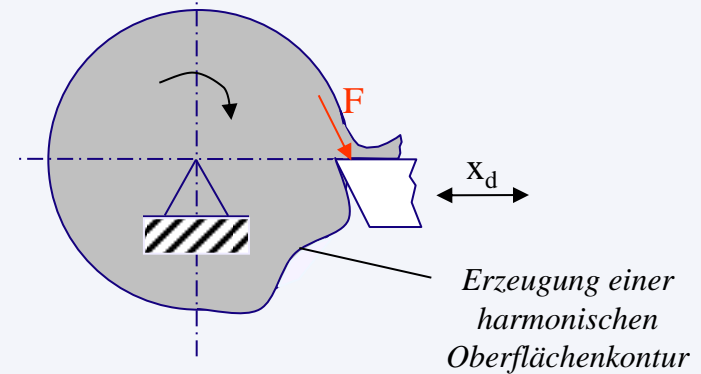
konventionelles Drehmaschinenbett aus Grauguss (Quelle: Weck)

Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Regenerativereffekt

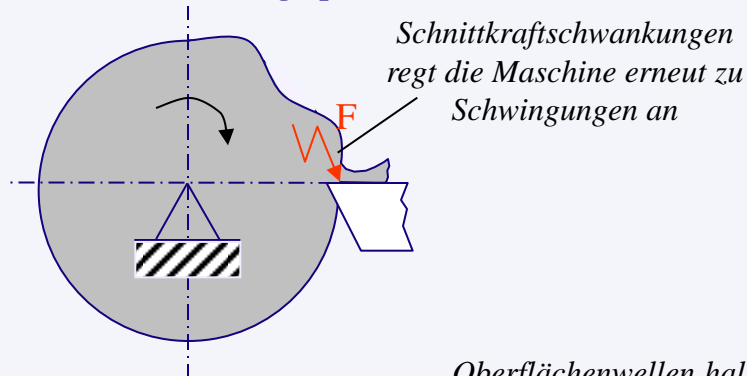
Impulsartige Schnittkraftänderung



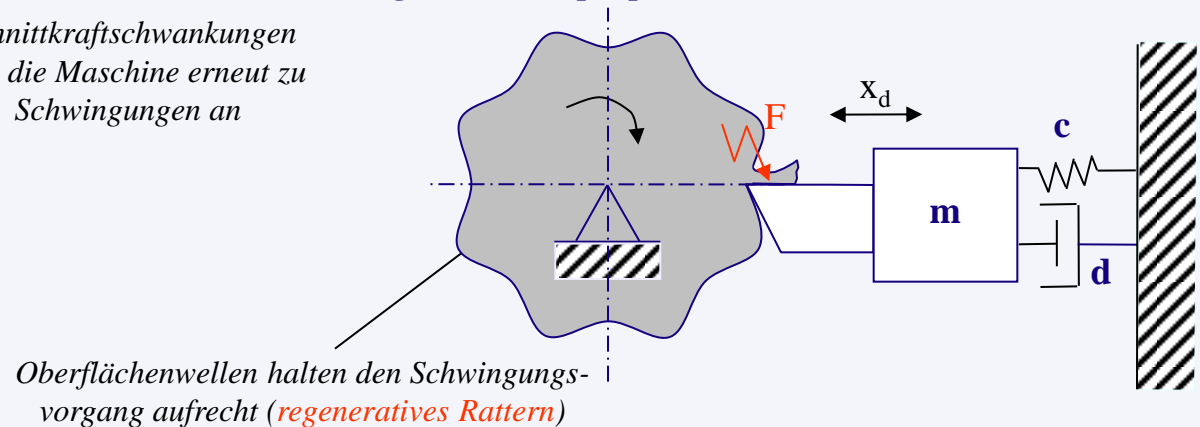
Relativbewegung zwischen
Werkzeug und Werkstück



Nach einer Werkstückumdrehung
wird die harmonische Kontur
durch den Meißel abgespannt



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



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

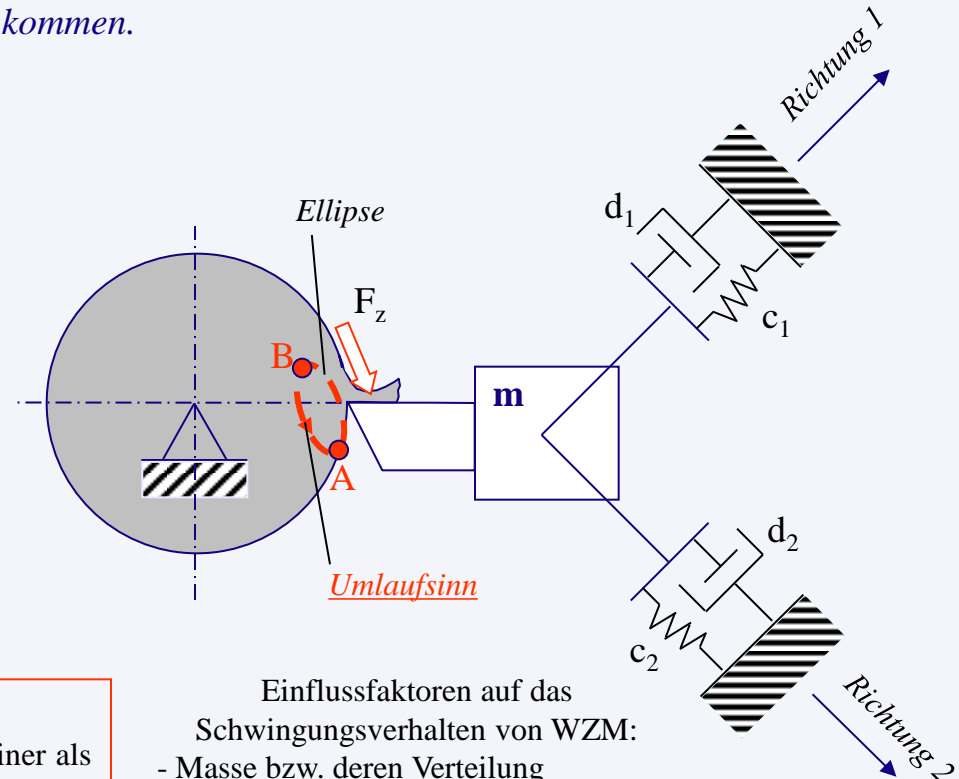
Während der Bewegung von A nach B muss gegen die Zerspankraft F_z Energie W_1 an den Zerspanvorgang abgegeben werden.

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.



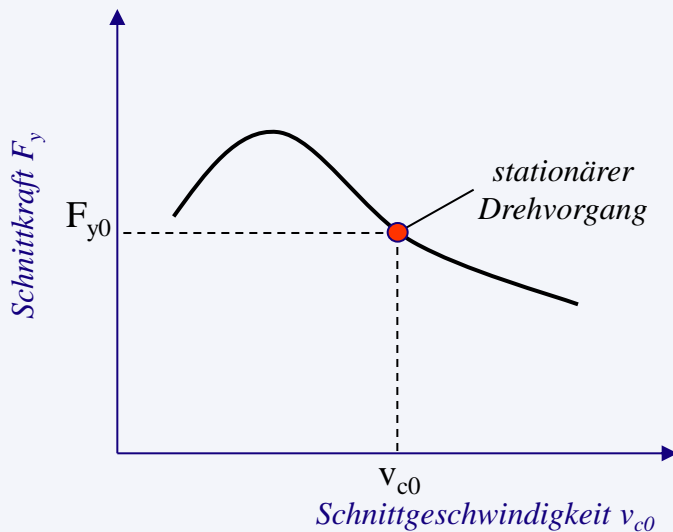
Einflussfaktoren auf das

Schwingungsverhalten von WZM:

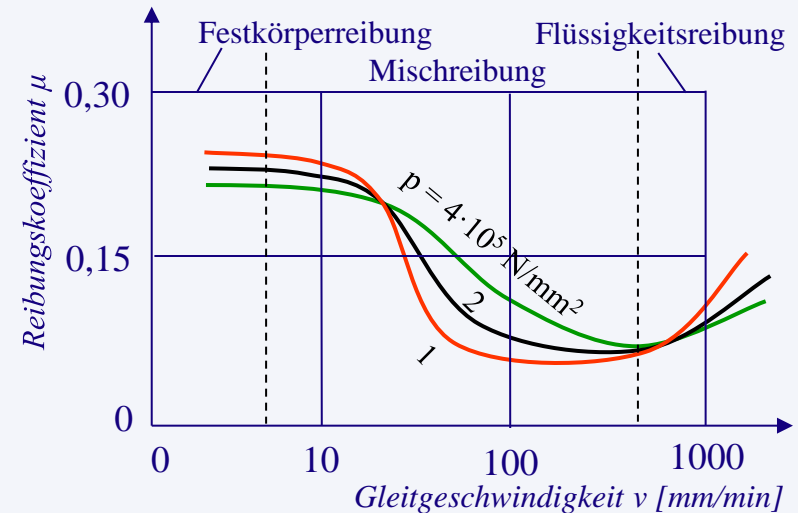
- Masse bzw. deren Verteilung
- Steifigkeit
- Dämpfung
- **Richtungsorientierung + Frequenzlage einzelner Eigenschwingungen**

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:

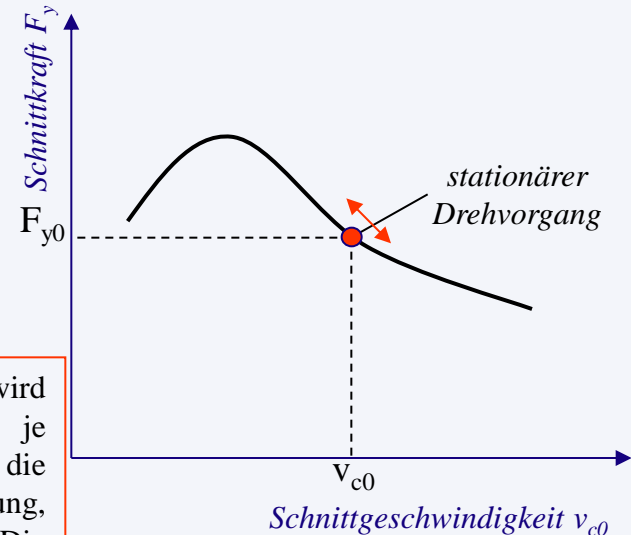
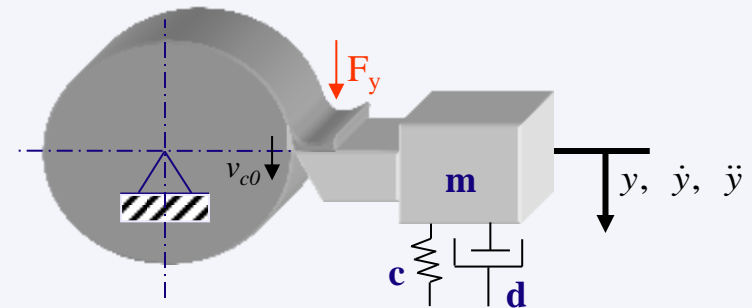
$$F_y > F_{c0}$$

Für das Rückschwingen gilt das Umgekehrte!

Energiebetrachtung

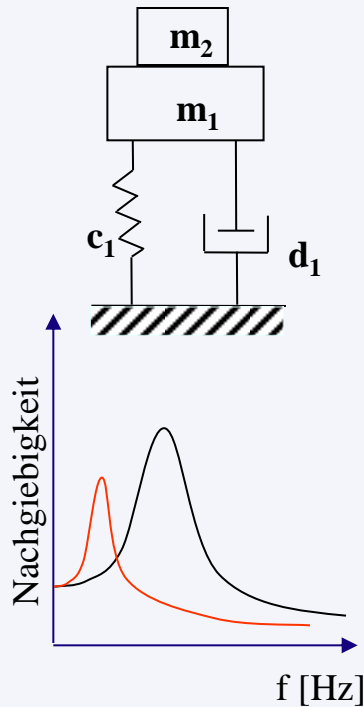
$$\Delta W = \int_{-y}^y F_{2y} dy + \int_y^{-y} F_{1y} dy$$

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!



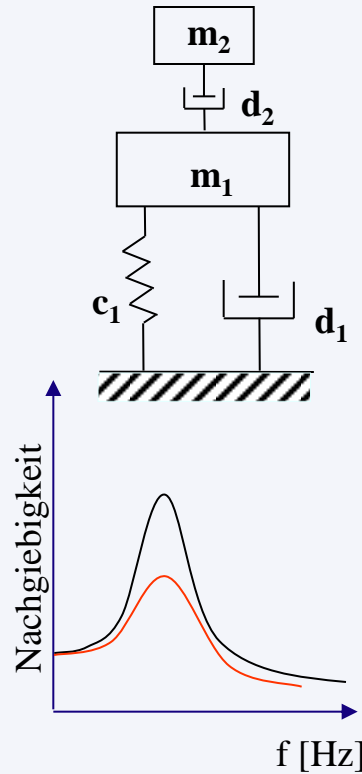
Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung: Dämpfungssysteme

Impakt-Dämpfer



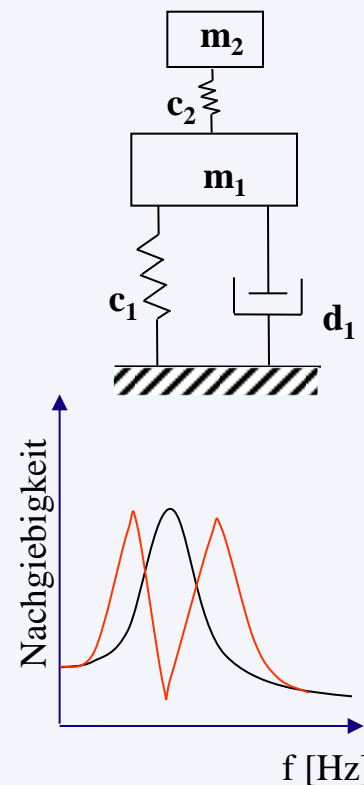
- keine zusätzliche Resonanzstelle (kein Energiespeicher „Feder“)

Lanchester-Dämpfer



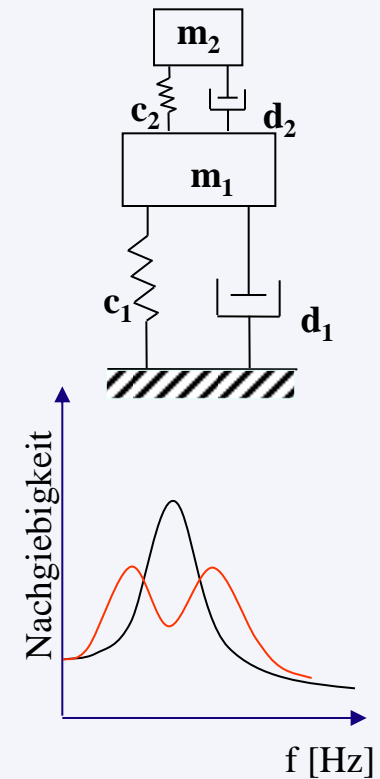
- keine zusätzliche Resonanzstelle (kein Energiespeicher „Feder“)
- das System benötigt eine relativ große Masse m_2

Tilger



- eine zusätzliche Resonanzstelle (wegen Energiespeicher „Feder“)

Hilfsmasse-Dämpfer



- eine zusätzliche Resonanzstelle (wegen Energiespeicher „Feder“)

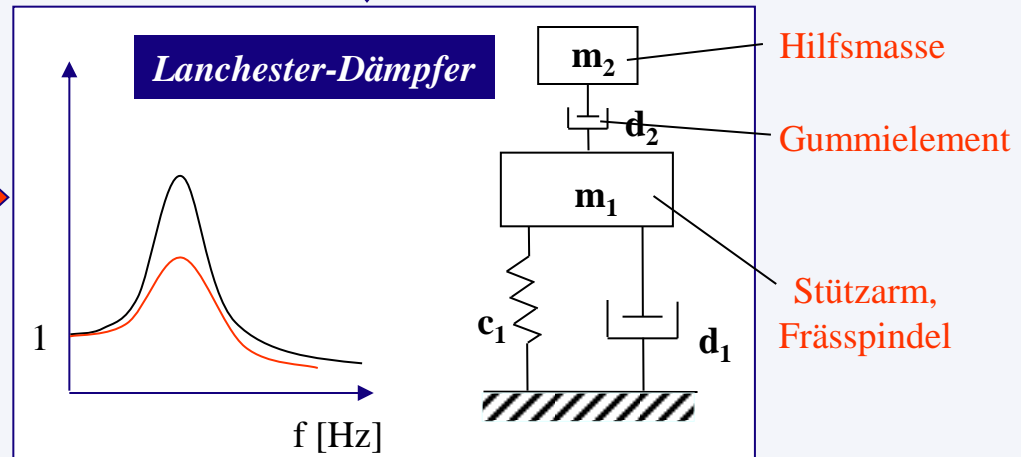
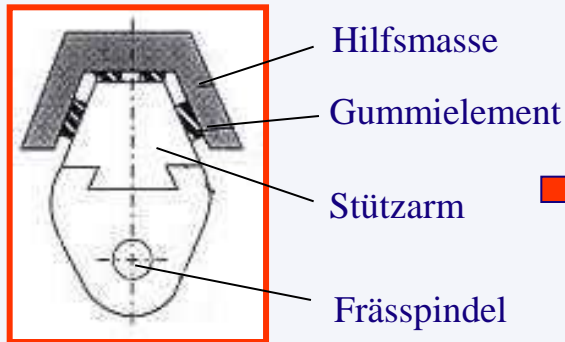
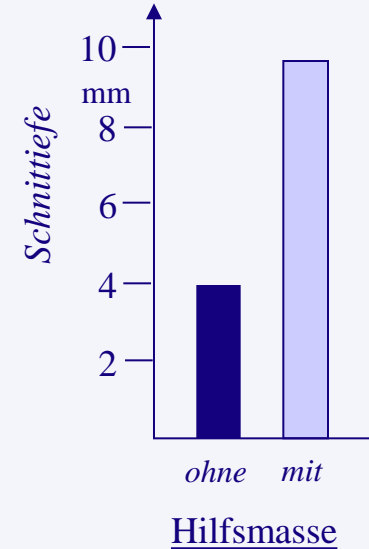
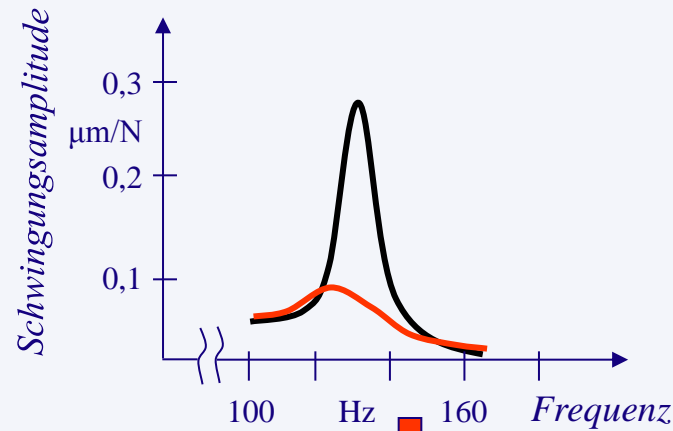
Quelle: Tönshoff, Werkzeugmaschinen

Dämpfungssysteme: Fräsmaschine (Beispiel)



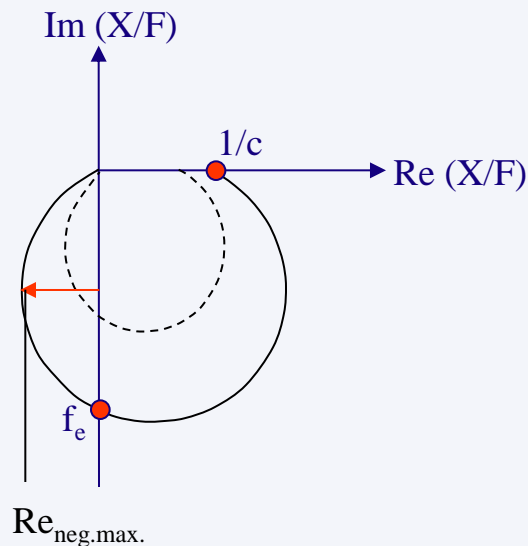
Quelle: Prof. Uhlmann, iwf

Waagrecht-Konsol-Fräsmaschine

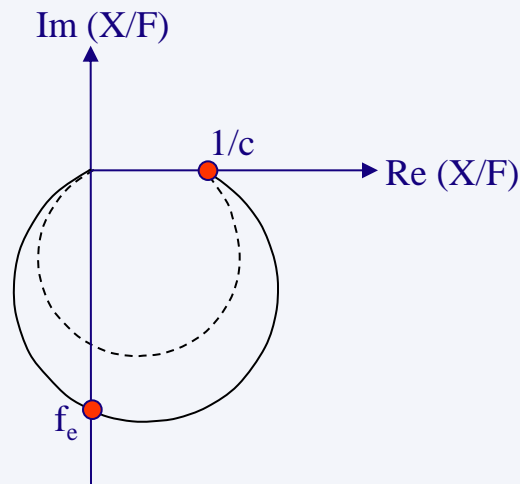


Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

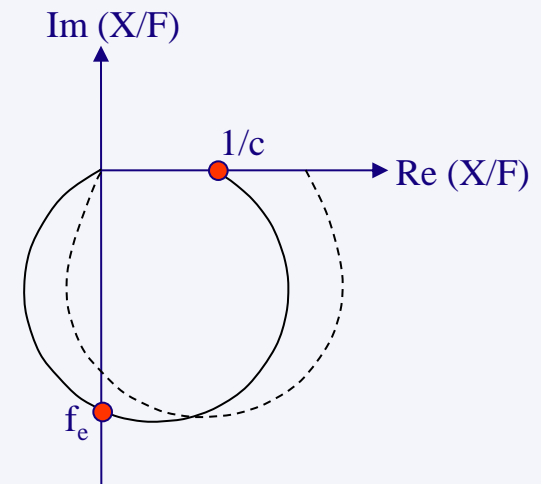
Zielrichtung bei allen Maßnahmen ist die Verringerung des negativen Realteils der Ortskurve, der ein direktes Maß für die Ratterneigung der Maschine ist.



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)

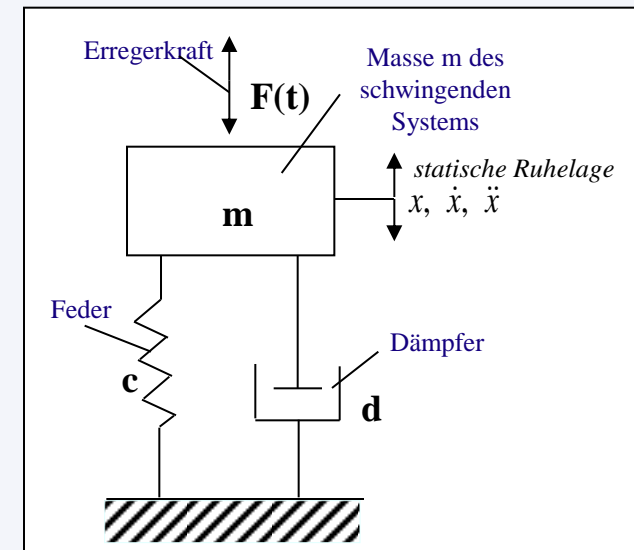
Schwanenhalsprinzip: Ein im Kraftfluss liegendes statisch weiches Element mit hoher Eigenfrequenz und Dämpfung verschiebt den gesamten Nachgiebigkeitsfrequenzgang in Richtung positiver Realanteile.

geschwächter Meißel

schwingende Masse
(linker Teile des
Schwanenhalses)

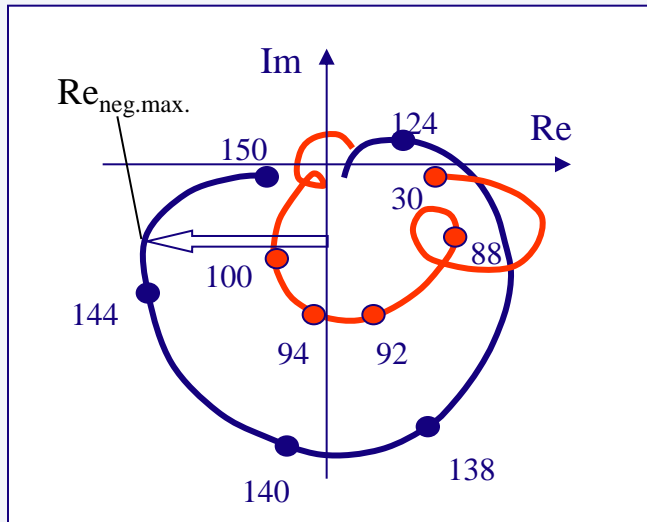
Feder (Einschnitt)

Dämpfer
(dämpfungswirksames
Material)



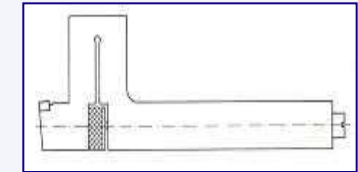
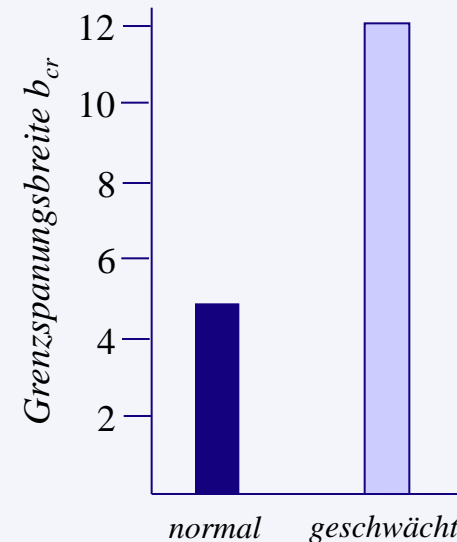
Einmassenschwinger

Verringerung des negativen Realteils: geschwächter Meißel (Beispiel)



— Ortskurve des ursprünglichen Systems
 — Ortskurve des Systems mit geschwächtem Meißel

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



geschwächter Meißel

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

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

Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

→ Werkzeug mit ungleicher Teilung

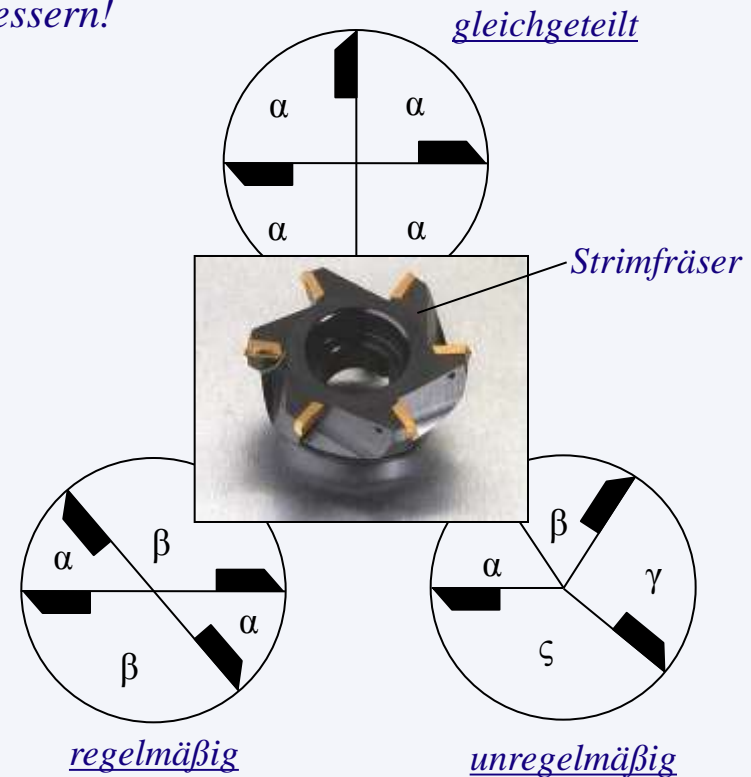
Das Stabilitätsverhalten eines Zerspanungsprozesses kann sich durch den Einsatz ungleichgeteilter Werkzeuge verbessern!

Das Wirkprinzip beruht

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

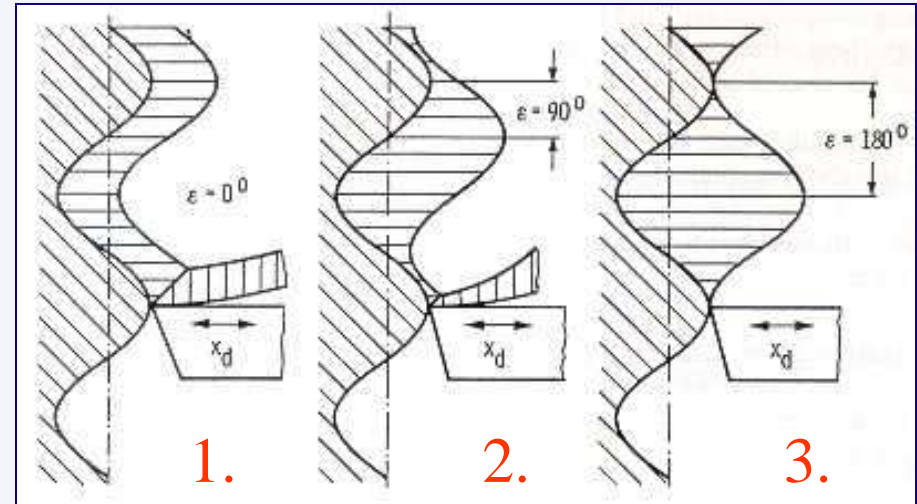


Die sich normalerweise einstellende stationäre Ratterschwingung wird durch die Phasenmodulation des Werkzeugs ständig gestört!



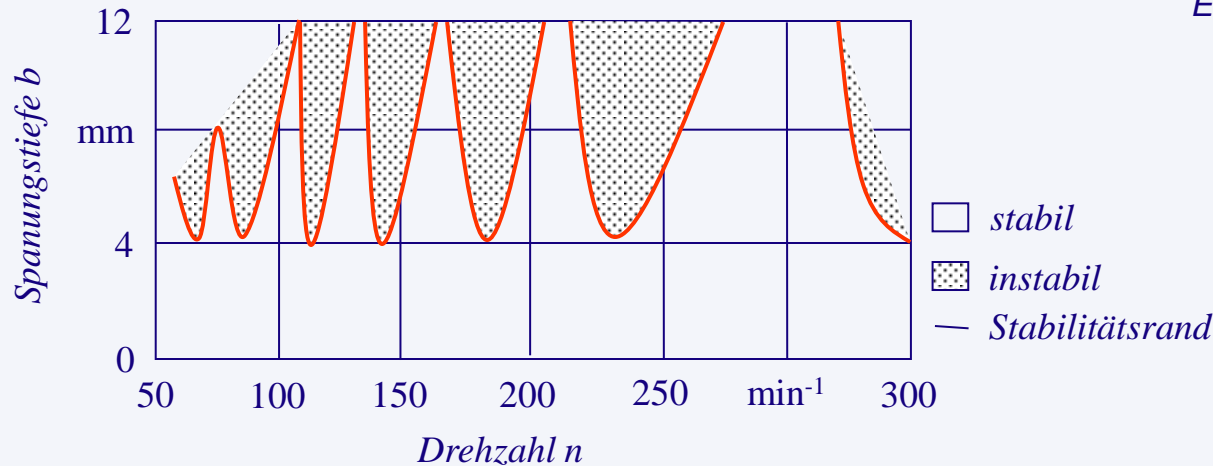
Einfluß des Phasenwinkels ε auf die Spandickenmodulation

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

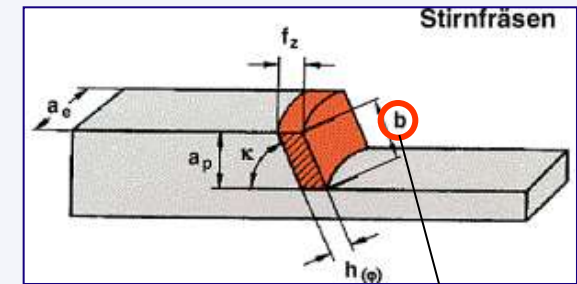


Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

gleichgeteilt

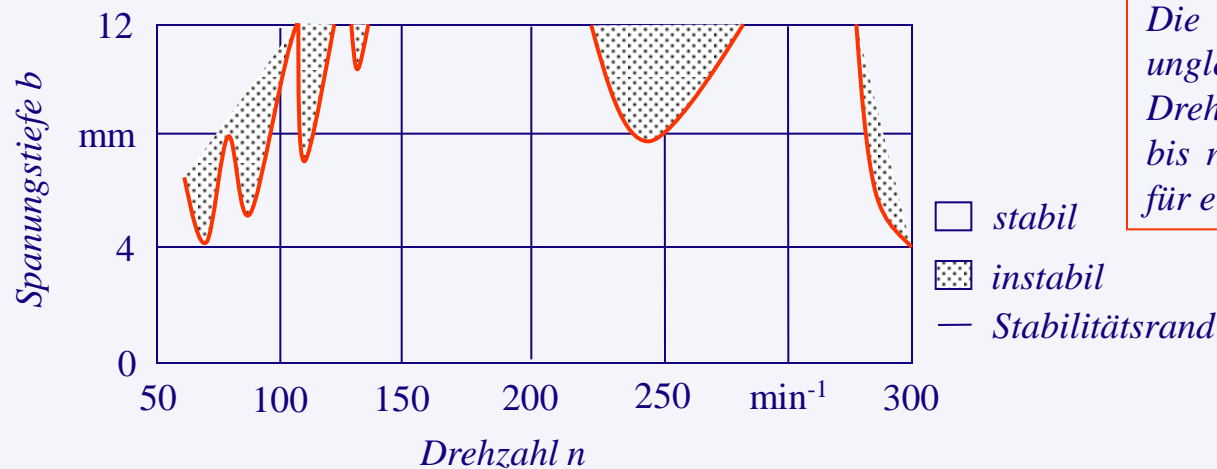


Eingriffs- und Spanungsgrößen beim Fräsen



Spannungstiefe

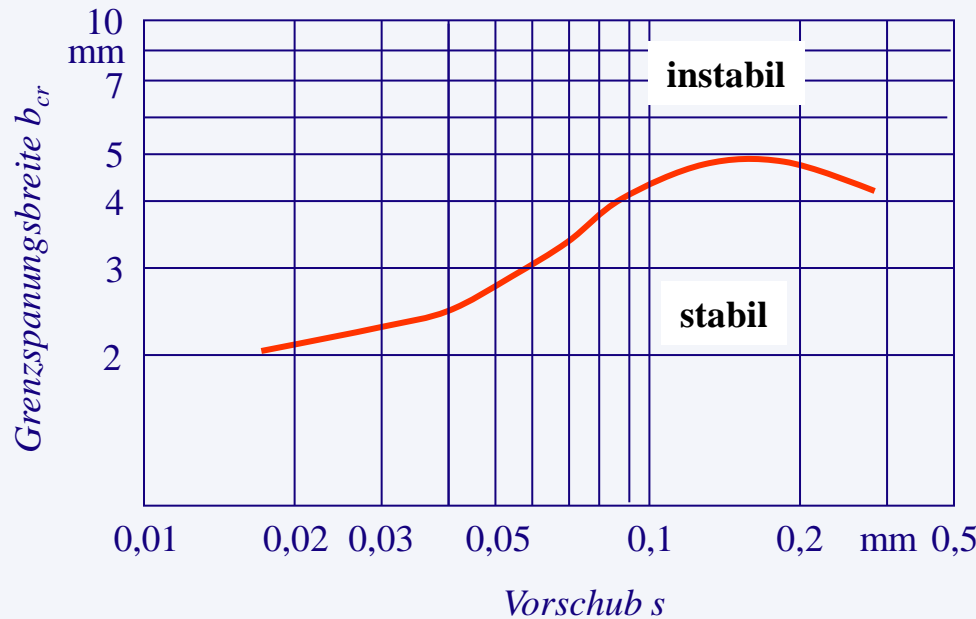
ungleichgeteilt



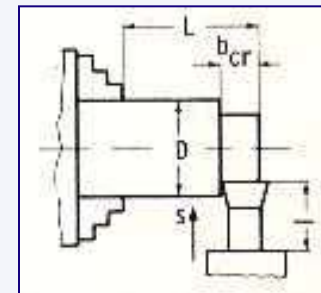
Die Stabilitätsgrenze für einen ungleichgeteilten Fräser liegt im Drehzahlbereich zwischen $n = 100 \text{ min}^{-1}$ bis $n = 225 \text{ min}^{-1}$ wesentlich höher als für eine gleichgeteilten Fräser.

Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

→ *Variation des Vorschubs*

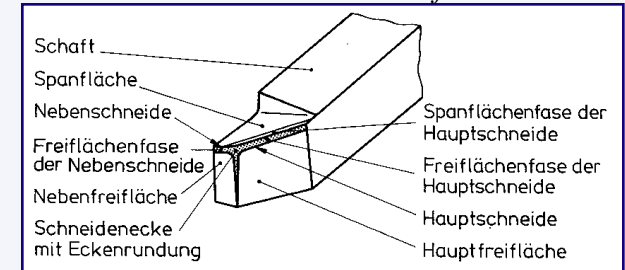


Werkstoff: Ck 45 N
Schneidstoff: HM P 10
Drehzahl: $n = 900$ 1/min
Schnittgeschw. $v_c = 127$ m/min



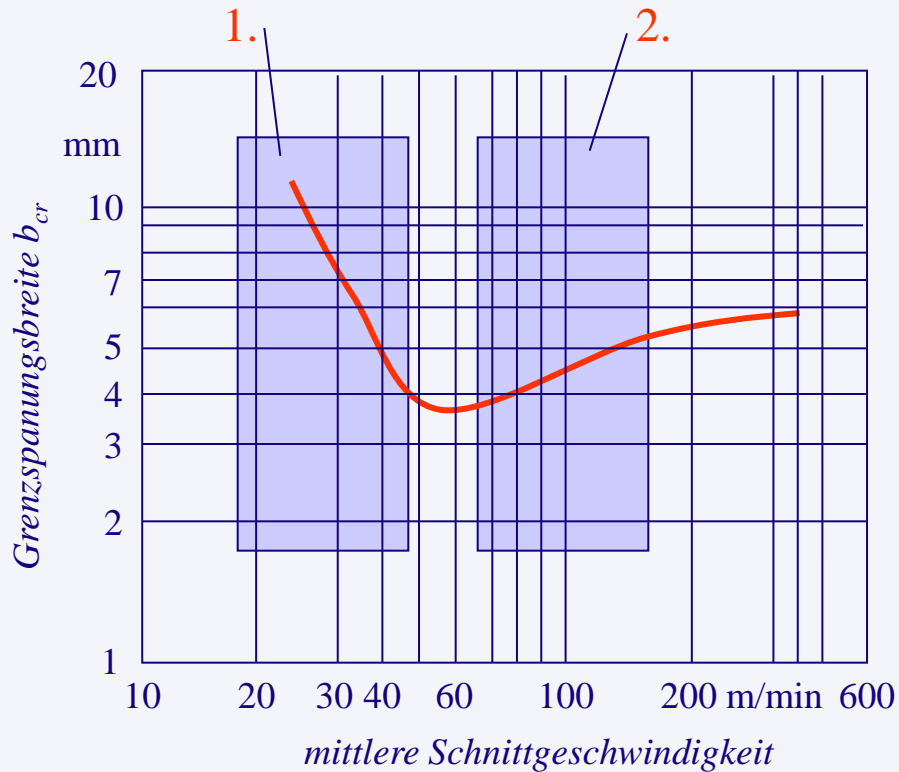
Effekt: Ein höherer Vorschub bewirkt einen größeren statischen Spandruck auf die Spanfläche. Dies führt zu einer größeren Reibung bzw. Dämpfung, welche sich positiv auf die Ratterneigung des Systems auswirkt.

Flächen und Fasen am Drehmeißel

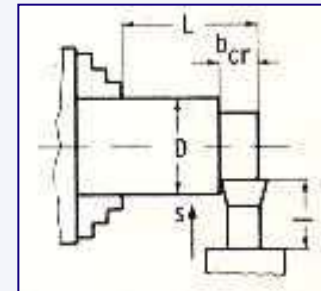


Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

➔ *Variation der Schnittgeschwindigkeit*



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

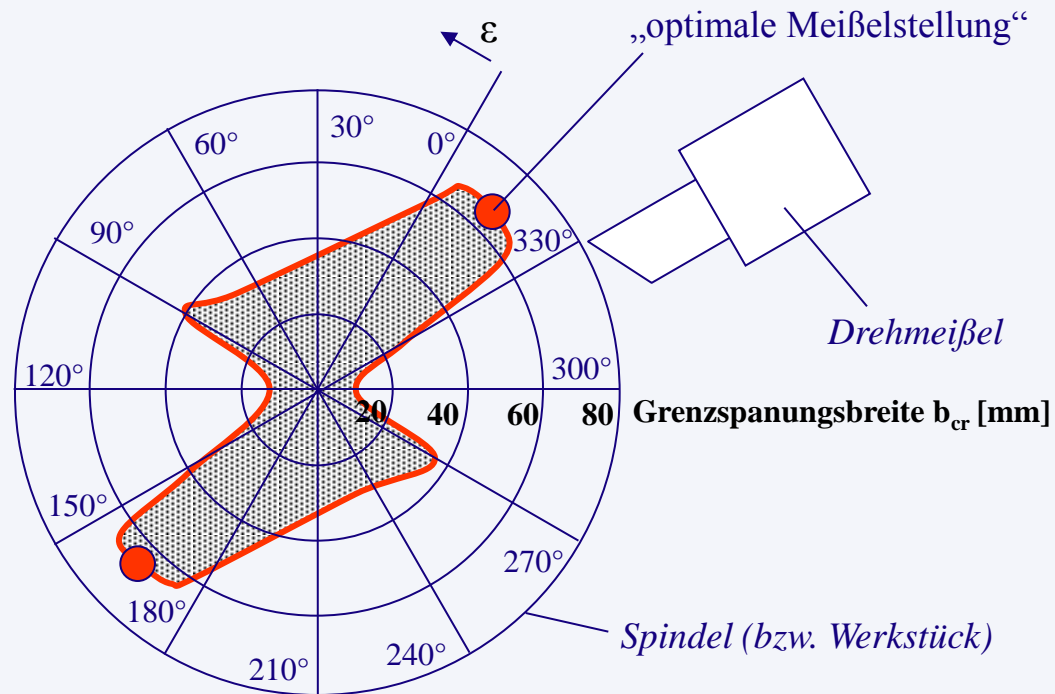


Effekt 1.: hoher Eindringwiderstand des Werkzeugs verursacht hohe Stabilitätsgrenze

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

innere Wärmequelle

Lager
Motoren
Getriebe
Hydrauliksystem
Kühlwasserkreislauf
Prozesswärme
Reibungsverluste in Führungen
Kugelrollspindel

thermische Umgebungseinflüsse

Hallenklima:

- vertikale / horizontale Temperaturverteilung
- Temperaturschwankungen (Tag / Nacht, Klimaanlage)
- Luftströmungen (Gebläse)

direkter Strahleneinfluss:

- Sonne
- Heizkörper
- benachbarte Anlage

Wärmesenken:

- Fundamente
- geöffnete Hallentore, Fenster

instationäre Temperaturverteilung über der Maschinenstruktur

thermische Materialeigenschaften

Wärmekapazität
Wärmeausdehnung
Wärmeleitfähigkeit

Bauform

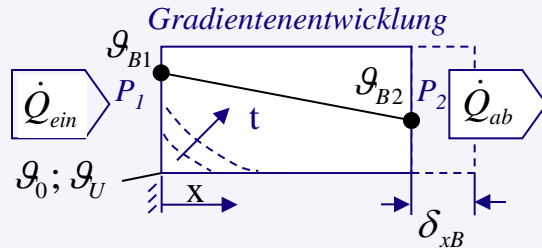
Größe der Maschine
Bearbeitungsposition



charakteristische Verlagerung an der Wirkstelle

Quelle: Weck, WZM)

Eindimensionales Wärmeleitmodell

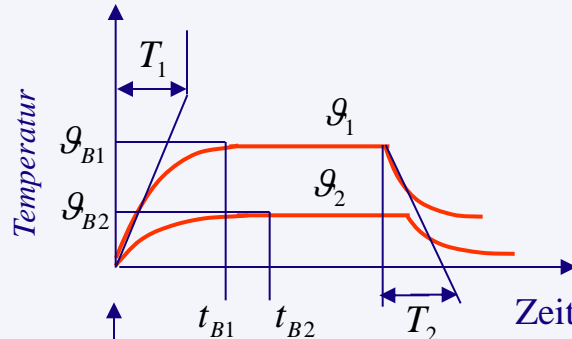


konstante Umgebungstemperatur

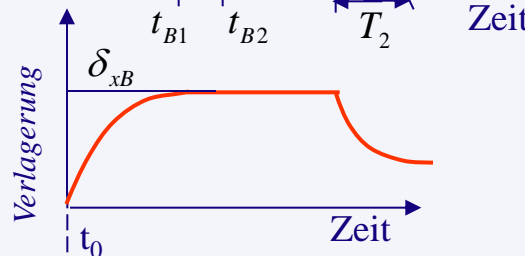
Verlauf der Wärmeströme



Temperaturverhalten der Punkte P_1 und P_2



Resultierende Längenausdehnung des Gesamtmodells



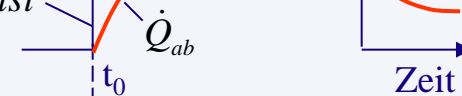
Maschinenverhalten:

Aufwärmphase

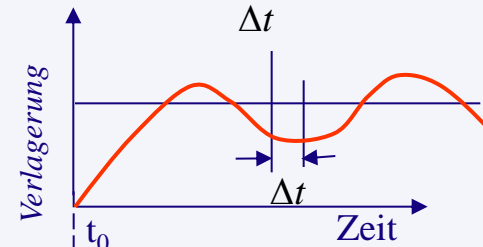
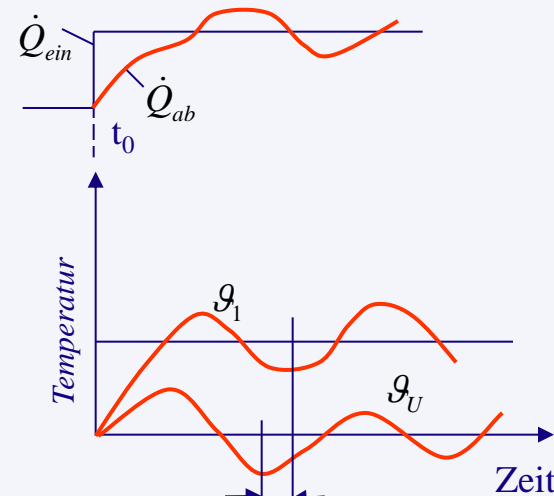
Beharrungszustand

$$\dot{Q}_{ein} = \text{const}$$

Abkühlphase



schwankende Umgebungstemperatur

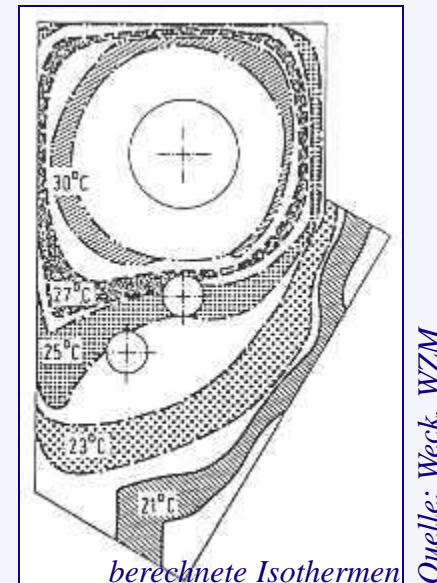
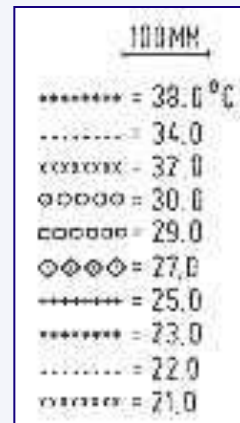
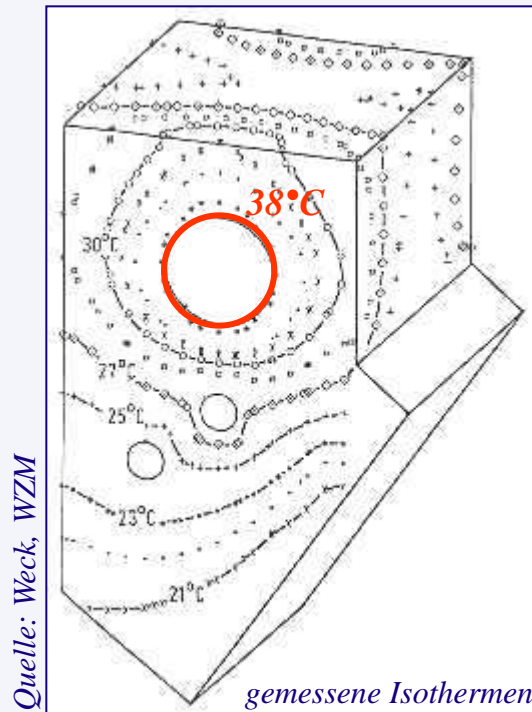


Quelle: Weck, WZM

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 Kühlschmierung

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

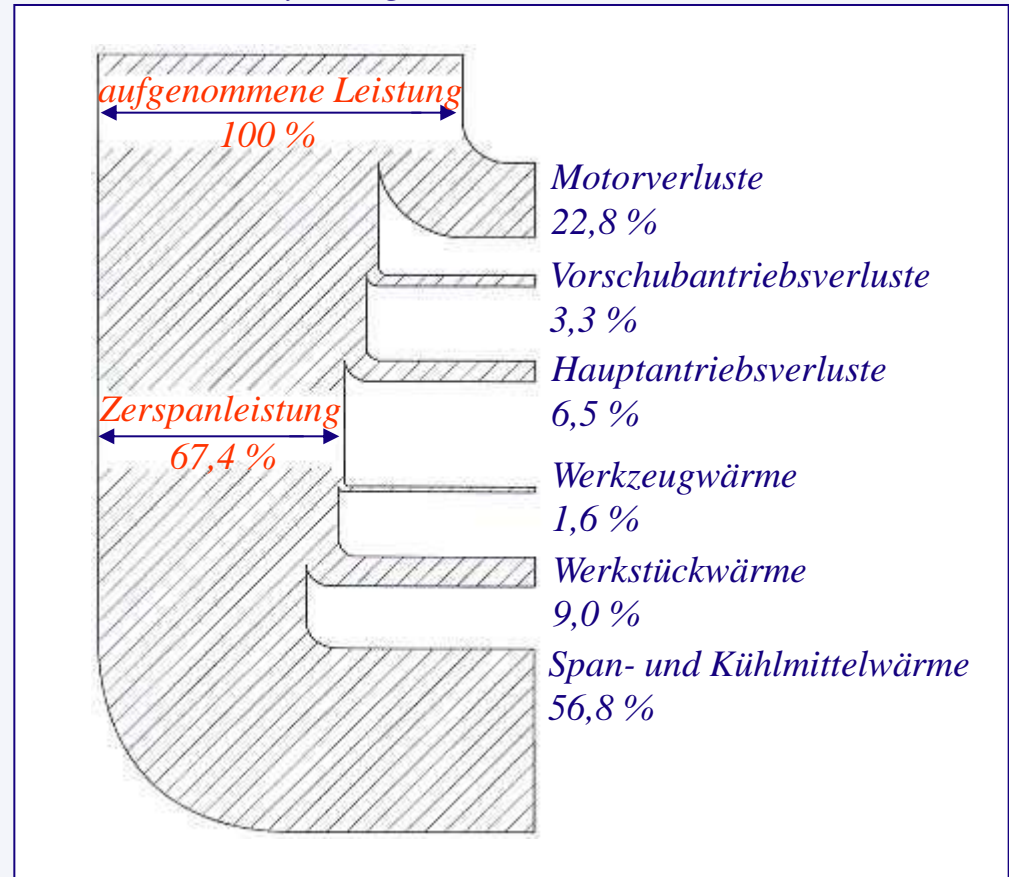
Von ca. 67 % der zur Verfügung stehenden Zerspanleistung werden ca. 57 % in Span- und Kühlmittelwärme umgesetzt.

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

Maßnahmen:

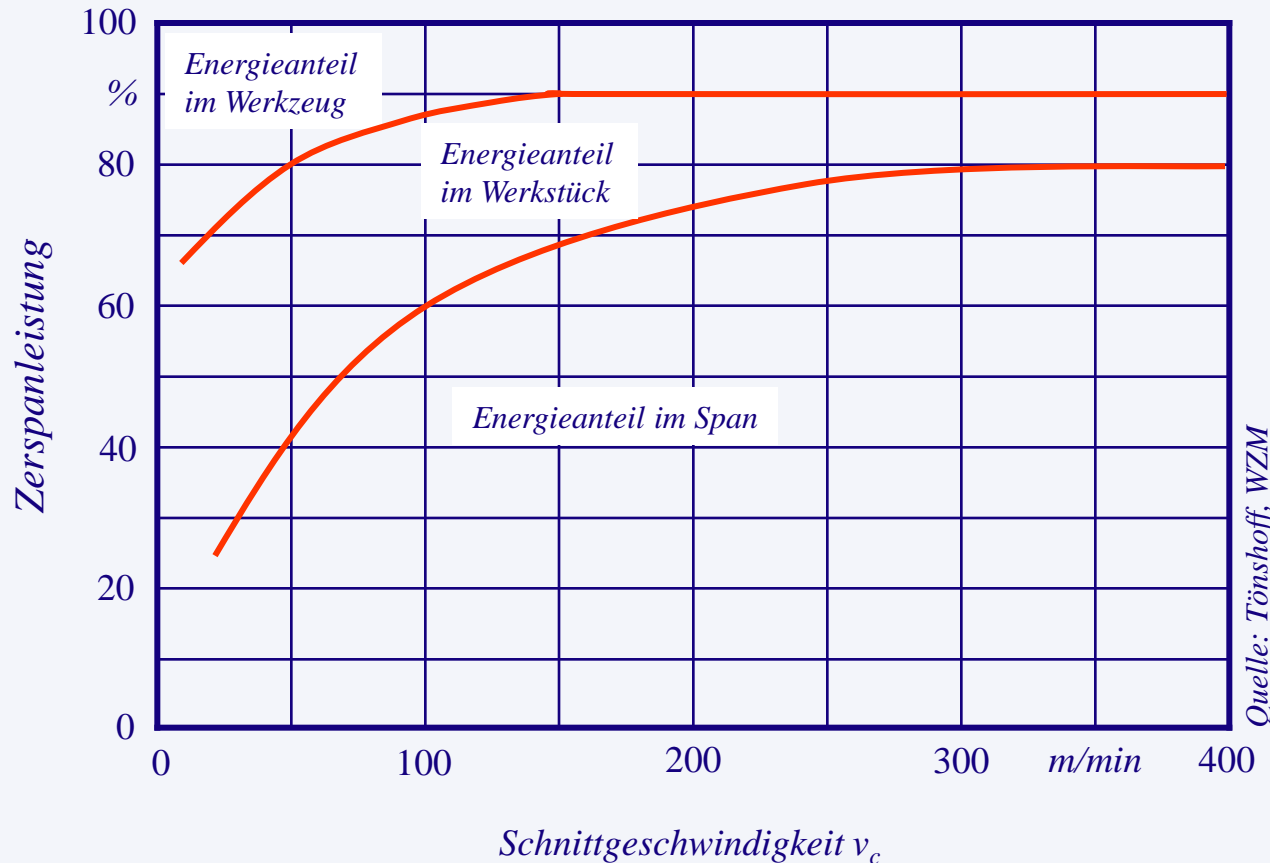
- Gestellteile gegen Späne abdecken
- Schrägbettmaschine
- Späneförderer

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

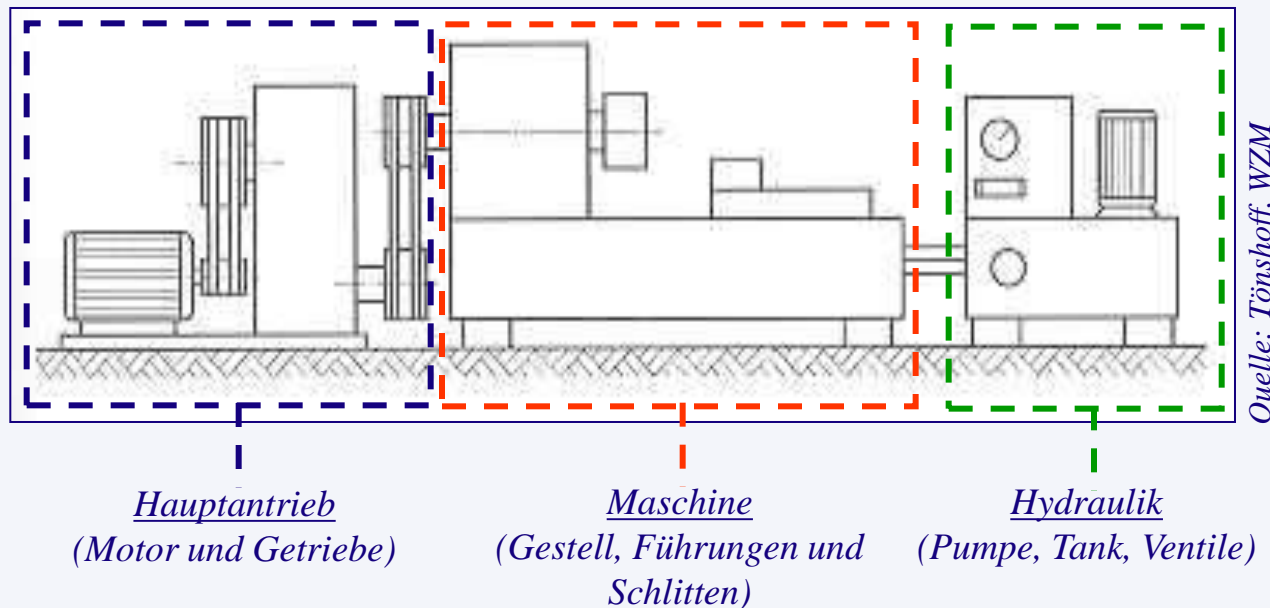
Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

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

Quelle: Prof. Uhlmann, iwf

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

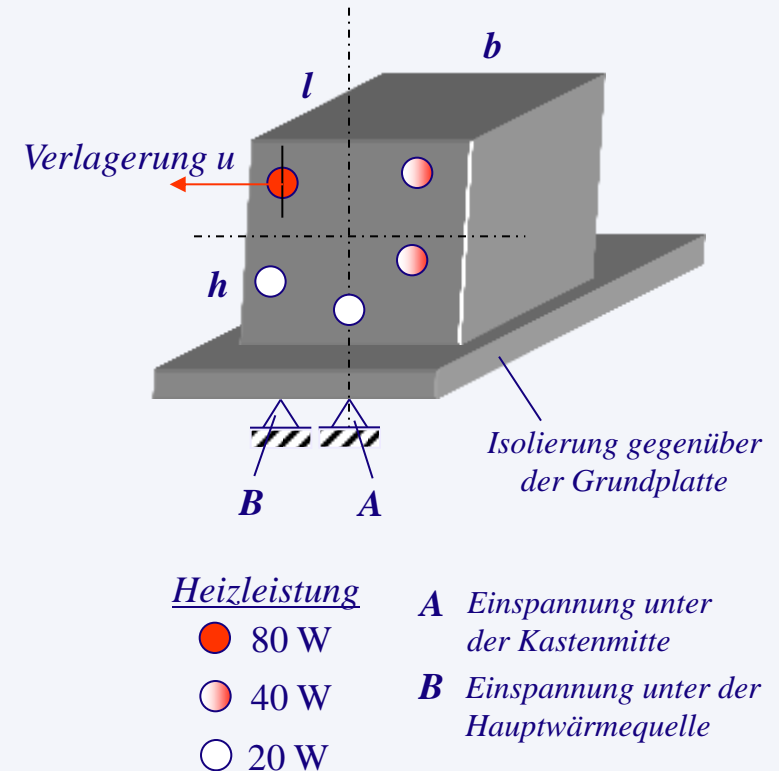
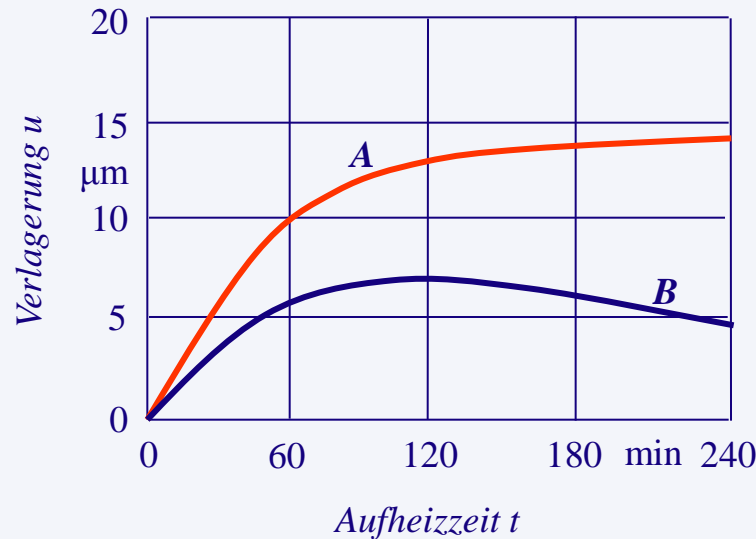
➔ *Auslagern von Wärmequellen*
(Trennung der Wärmequellen vom Gestell)



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

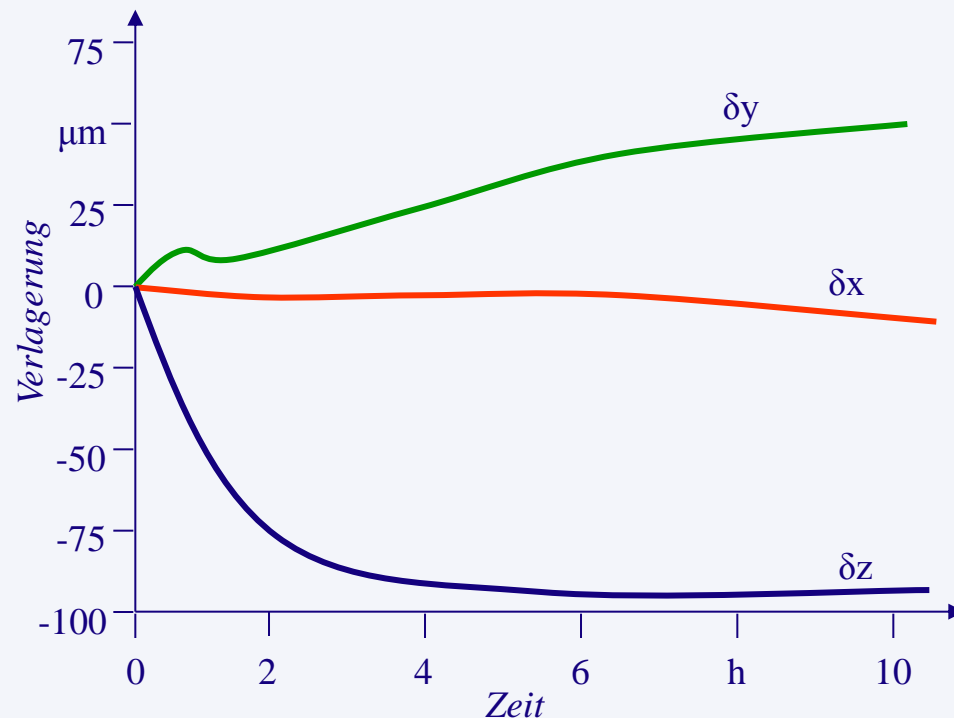
→ *thermosymmetrische Konstruktion*
(Einfluss der Einspannung auf die Verlagerung)



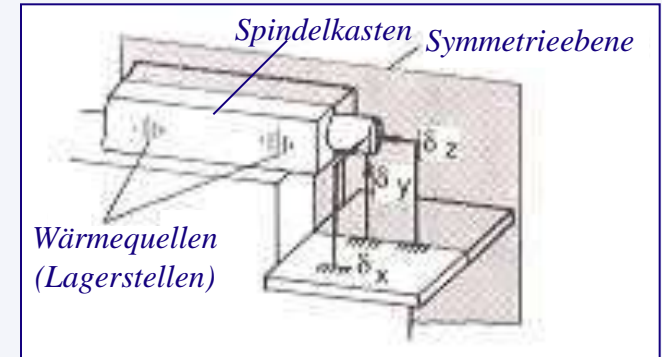
Durch die Variation des Befestigungspunktes konnte im gezeigten Beispiel die Verformung um ca. 50 % verbessert werden (Einspannung unter der Hauptwärmequelle). Die Baugruppenbefestigung spielt somit bei der Konstruktion einer Werkzeugmaschine eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

→ *thermosymmetrische Konstruktion*
(Thermosymmetrie bezüglich der y-z Ebene)



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



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

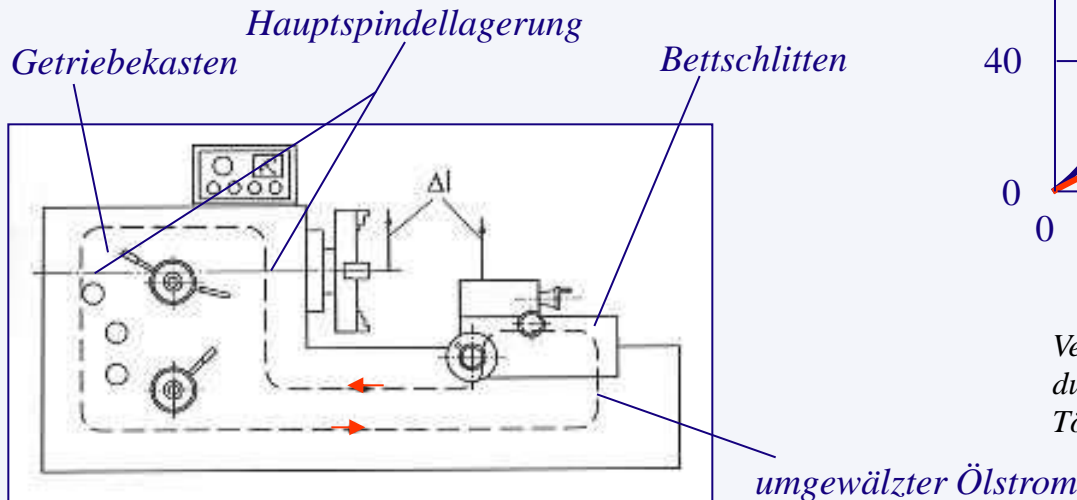
Normalerweise kann jedoch nur **eine** derartige Symmetrieebene in einer Maschine umgesetzt werden. Von großer Bedeutung ist dies für Maschinen mit nur **einer bevorzugten Achse** (z.B. x-Achse einer Drehmaschine)

Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

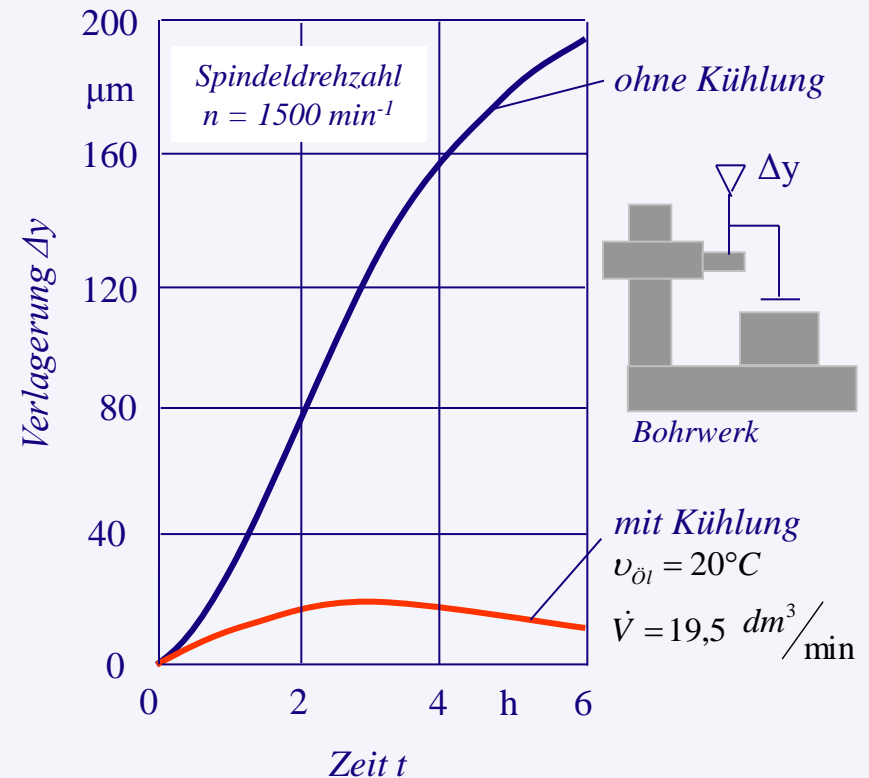
Kühlung/Erwärmung
(Temperaturausgleich durch Ölumlau)

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 Bettrehmaschine durch Ölumlau (Quelle, Tönshoff, WZM)



Verringerung der vertikalen Spindelverlagerung durch Ölkühlung 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.

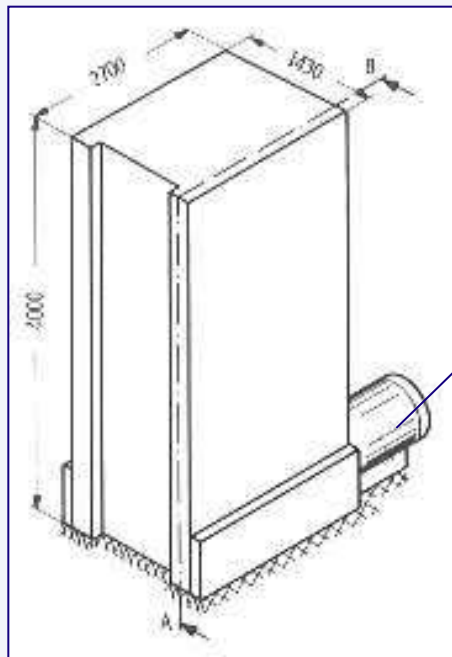
$$\text{innere thermische Verformungskraft} \quad F_T = \alpha \cdot A \cdot E \cdot \Delta \vartheta$$

Ausdehnungskoeffizient
Materialquerschnitt
Temperaturänderung
Elastizitätsmodul

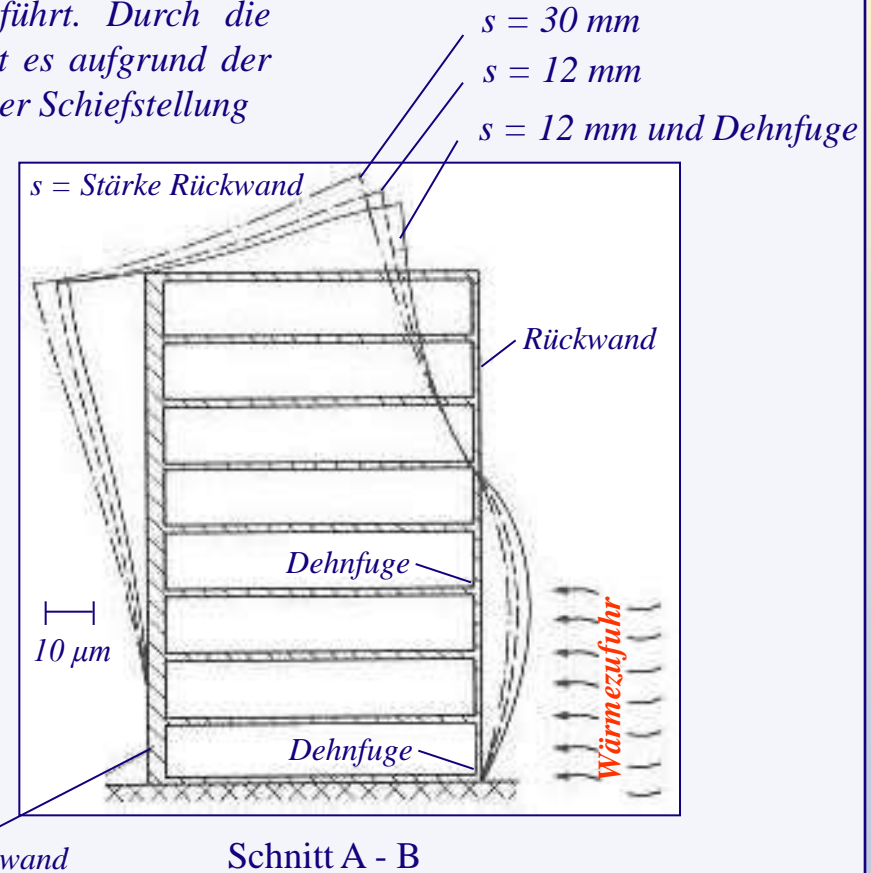
Bei einer Strukturschwächung ist darauf zu achten, dass die statischen und dynamischen Eigenschaften des Bauteils (Maschinengestell) keine unzulässigen Werte annehmen!

Gezielte Strukturschwächung: Maschinenständer (Beispiel)

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



3 KW Wärmezufuhr durch angeflanschten Antrieb



→ 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 λ [W/mK]	Wärmeausdehnungs- koeffizient α [$10^{-6}/K$]
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

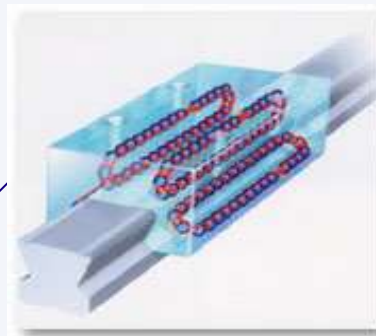
Die geringe Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit der hohen spez. Wärmekapazität führt zu einer relativ hohen thermischen Trägheit. Dies bedeutet, dass Lastschwankungen zu kleinen Temperaturänderungen und damit auch zu kleinen Temperaturverformungen führen.

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.



Linearführung mit
Kugellagerkette (Quelle: THK)

geringe Betriebskosten

Betriebssicherheit
geringe Schmutzempfindlichkeit
geringer Wartungsbedarf
Überlastbarkeit

niedrige Herstellkosten

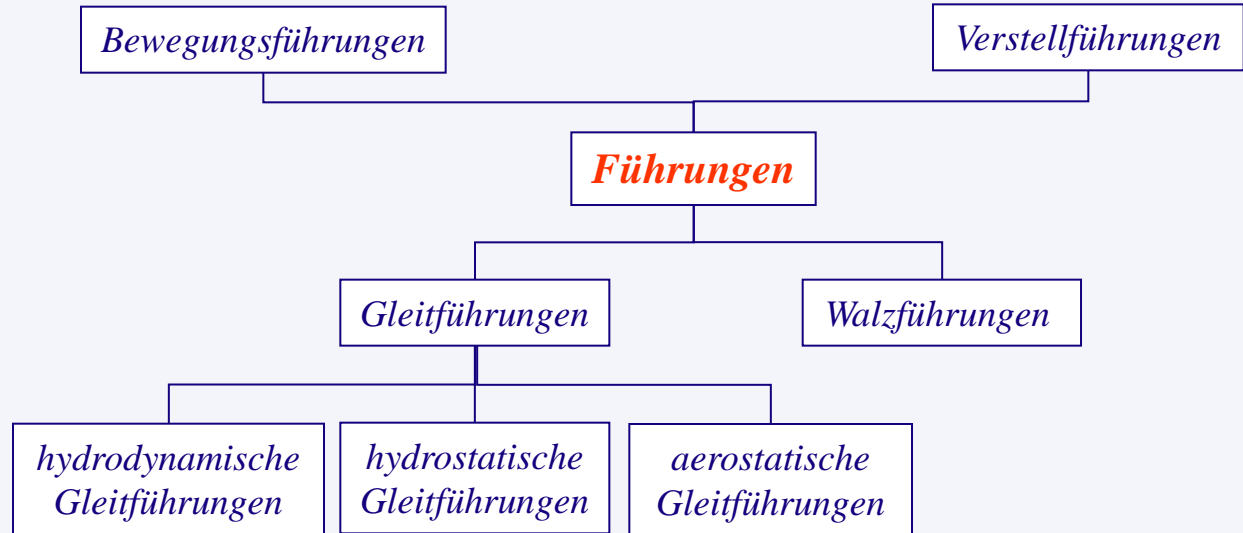
kostengünstige und
einfache Fertigung
gute Montierbarkeit
preisgünstige Werkstoffe

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:



freien Bewegung:

Rund- und Geradführung

Querschnittsform:

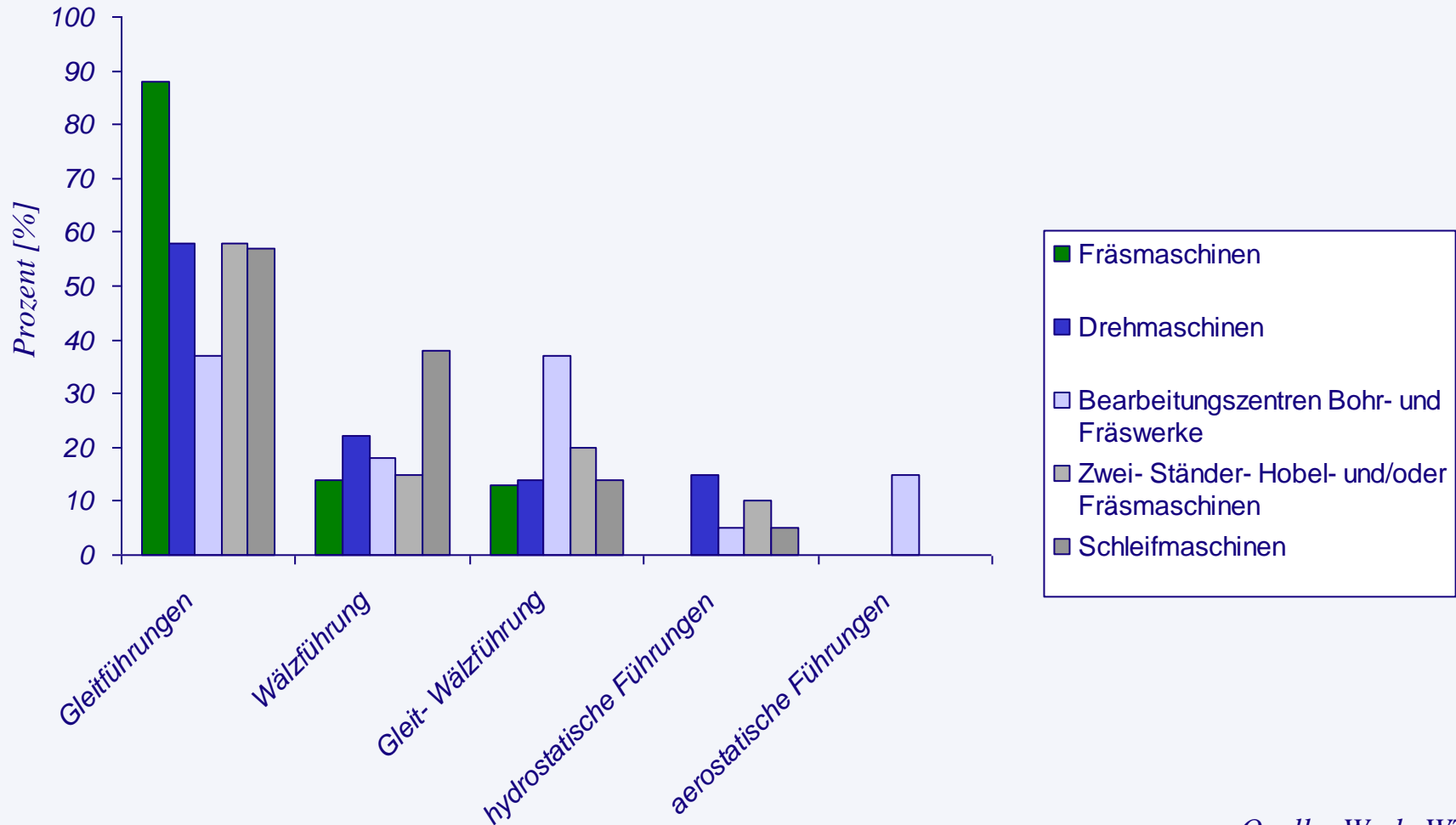
Dreieck: V-, Dach-, Schwalbenschwanzführung

Kreis: Säulenführung



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

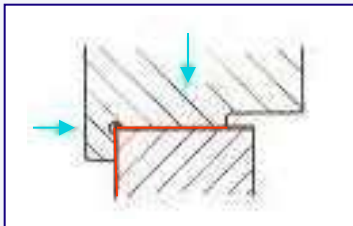
Häufigkeit der Führungsprinzipien



Quelle: Weck, WZM

Führungsformen

Flachführung



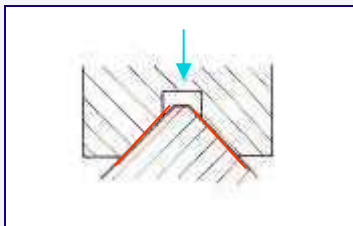
Vorteil

- *einfache Fertigung*
- *einfache Nachbearbeitung*
- *gute Haftung des Schmieröls*

Nachteil

- *kein abgleiten von Schmutz und Späne*
- *kein selbsttätiges Nachstellen*

Dachführung und V-Führung



Vorteil

- *Abgleiten von Schmutz und Späne*
- *selbsttätiges Nachstellen*

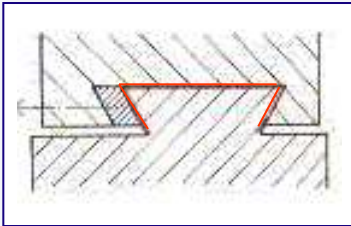
Nachteil

- *Ablaufen des Schmieröls*
- *erhöhte Flächenpressung*

Führungsformen

Schwalbenschwanzführung

(geschlossene Bauform)



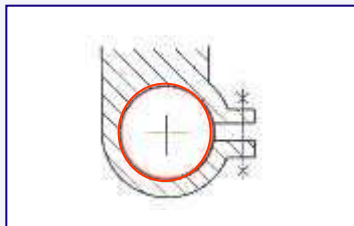
Vorteil

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

Nachteil

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

Rundführung



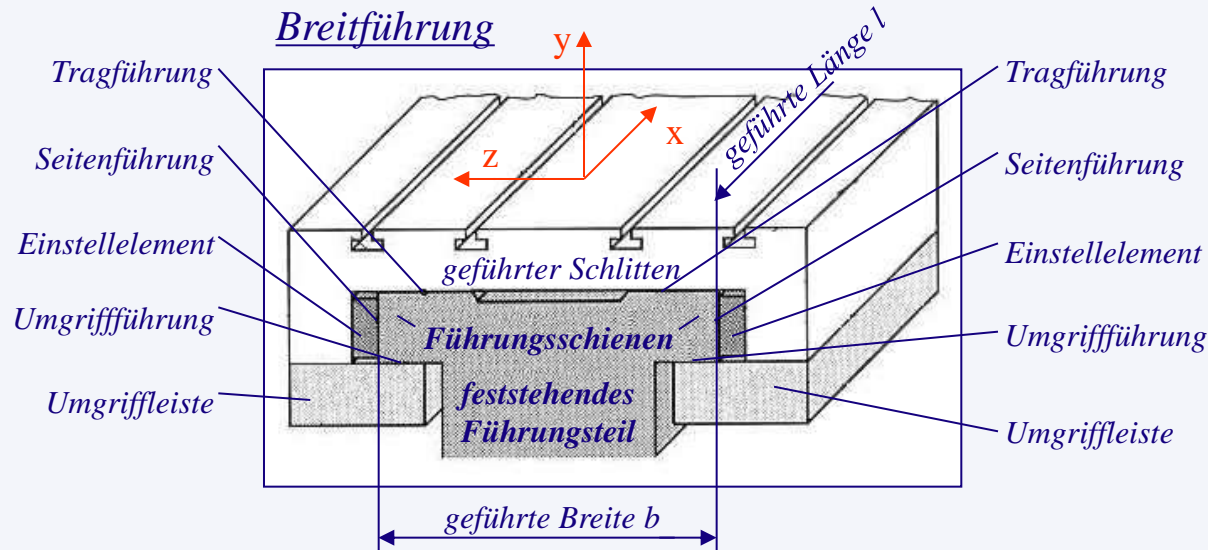
Vorteil

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

Nachteil

- *kein selbsttätiges 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
Umgriffsführung	+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 Geradföhrung: Breit- und Schmalföhrung

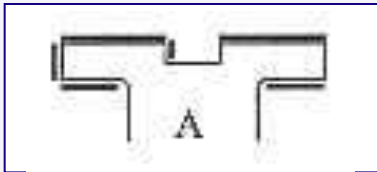
Breitföhrung: Verwendung der äußeren Föhrungsflächen für die Seitenföhrung

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

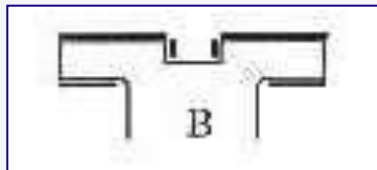
$$\frac{\text{geföhrte Länge}}{\text{geföhrte Breite}} = \frac{l}{b} > 1,3 \dots 1,5$$

sein.

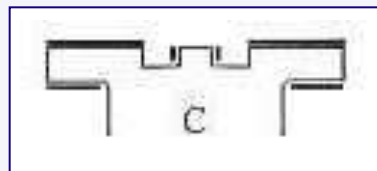
Maßnahmen zur Erreichung der kleinsten maximalen Föhrungslänge l oder eines großen Föhrungsverhältnisses l/b :



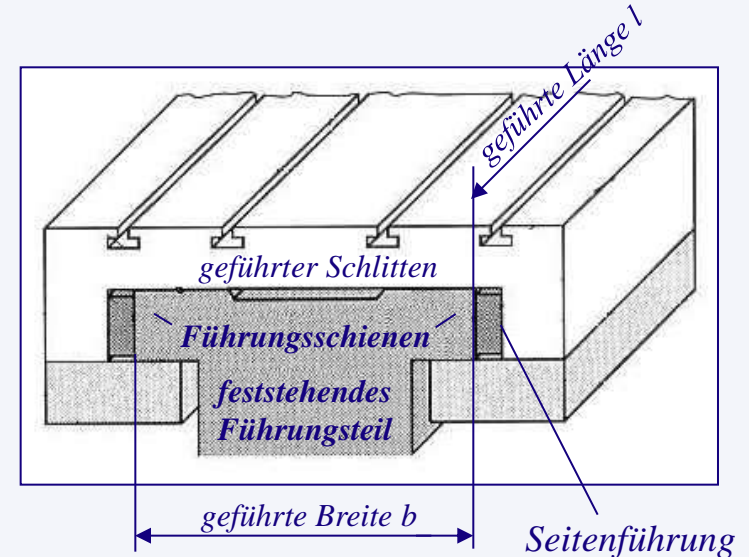
beide Seitenföhrungsflächen an eine Föhrungsschiene legen



die Seitenföhrungsflächen an die Innenseite der Föhrungsschienen legen



separate Flächen für die Seitenföhrung schaffen



positive Auswirkungen auf:

- Genauigkeit der Föhrung
- Verschiebekräfte

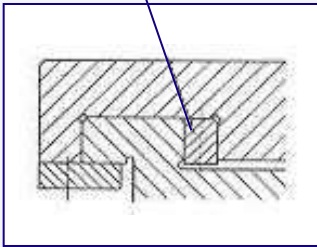
Einstellen von Führungen

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

- *Paßleisten*
- *Stelleisen oder*
- *Keilleisen*

einstellbar.

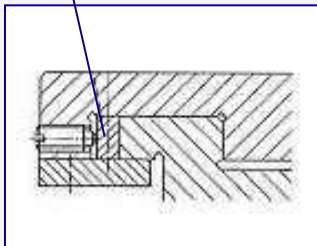
Paßleiste



Paßleisten werden nach dem Ausmessen des Spiels gefertigt und eingesetzt

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

Stelleiste



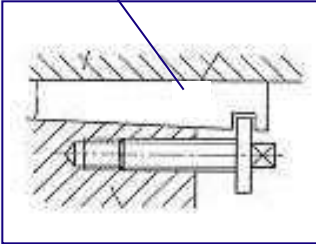
Einstellung erfolgt über Stellelemente (z.B. Schrauben)

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

Einsatzbereich: Stellführungen

Einstellen von Führungen

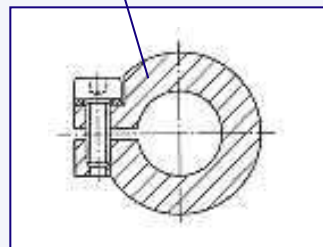
Keilleiste



Keilleisten weisen eine Verjüngung in Führungsrichtung auf

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

geschlitzte Buchse

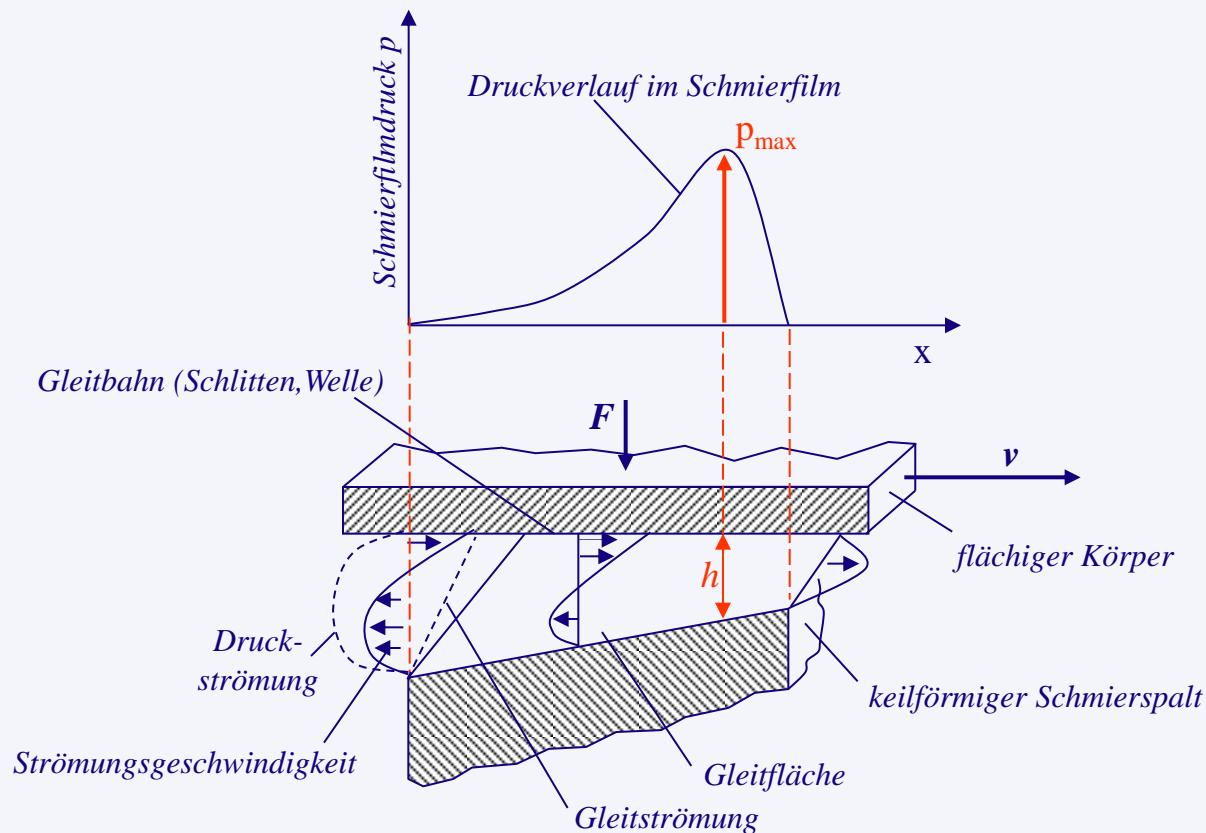


Das Nachstellen von Rundführungen ist schwierig, da der Vorgang eine Krümmungsänderung des Radius mit sich bringt.

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

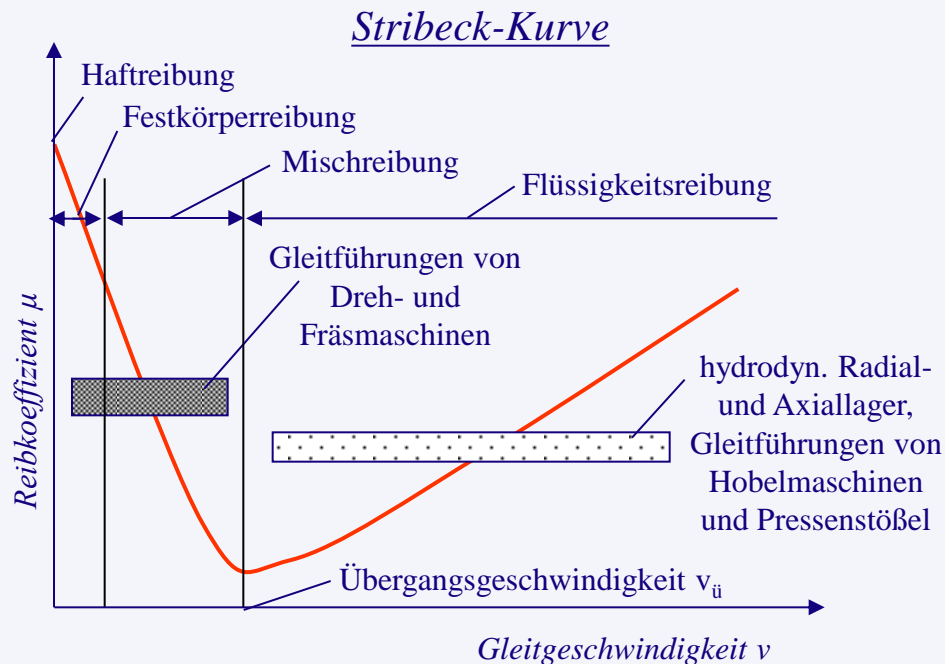
Gleitführung mit hydrodynamischer Schmierung

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 Verfahrensgeschwindigkeit 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 Haftreibung überwunden werden.



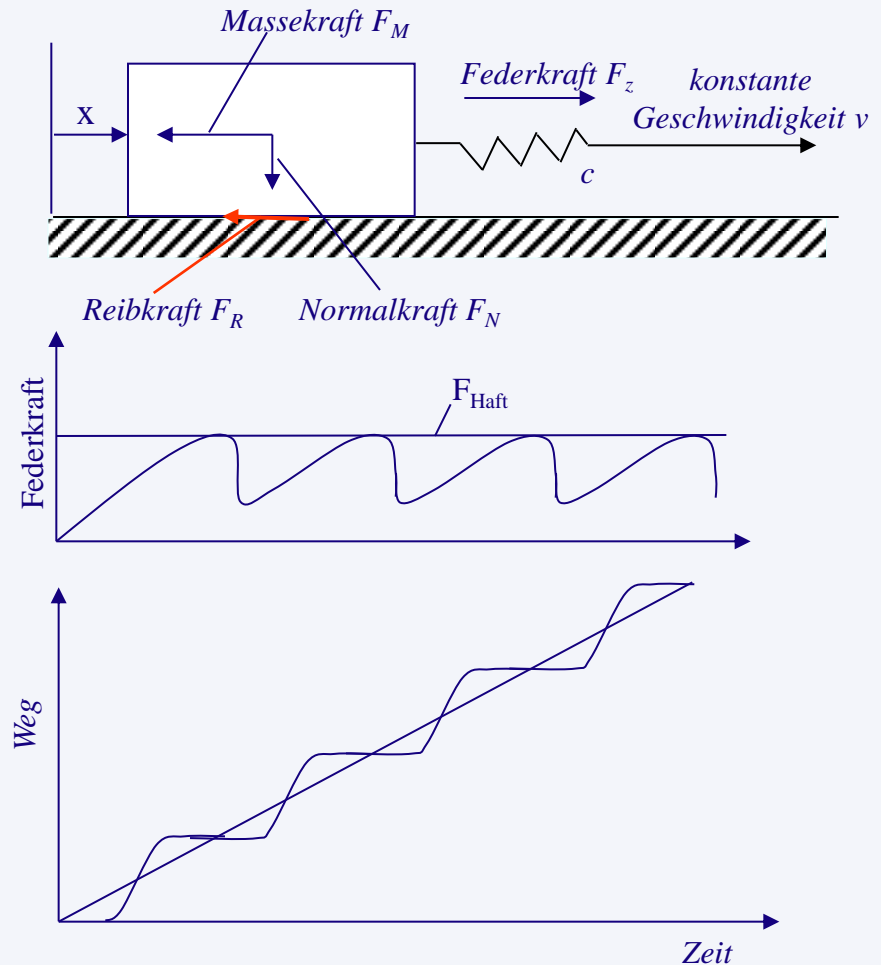
Der dazu notwendige Antrieb besitzt eine endliche Steifigkeit (Zugfeder) und wird bei der Überwindung der Haftreibung durch die dabei entstehende Kraft gespannt.



Setzt sich der Schlitten in Bewegung, geht die Haftreibung 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

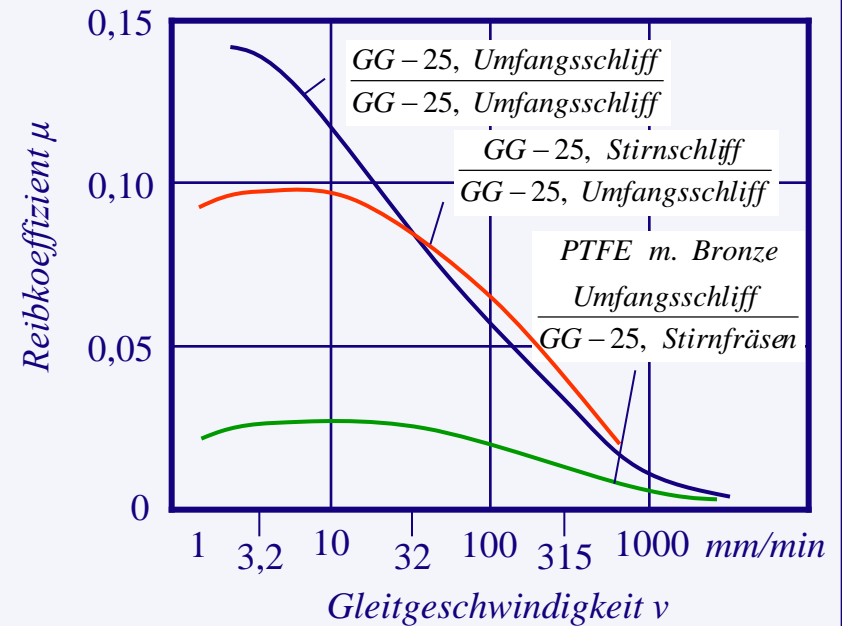
Steigung im vorderen Ast der Stribeck-Kurve vermindern oder vermeiden:

- 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

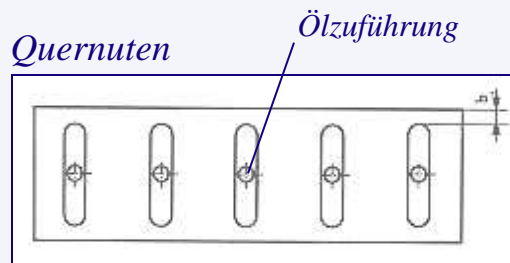
Schmiernuten haben die Aufgabe, die Zuführung und Verteilung des Schmiermittels auf der gesamten Gleitfläche sicherzustellen. Sie werden grundsätzlich in die Schlittenführung eingearbeitet.



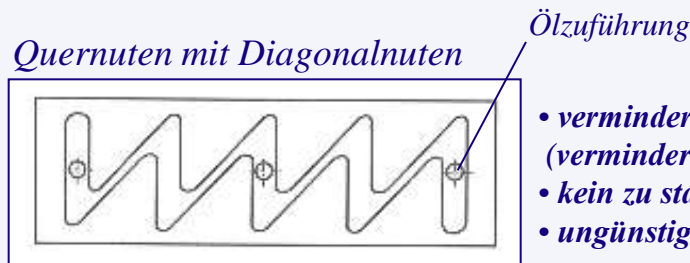
Gestalt und Lage der Schmiernuten haben einen entscheidenden Einfluss auf den Schmierdruckaufbau.

Beispiel: bei Verwendung von Längsnuten kann kein Schmierdruck aufgebaut werden

Schmiernutenformen (Beispiele)

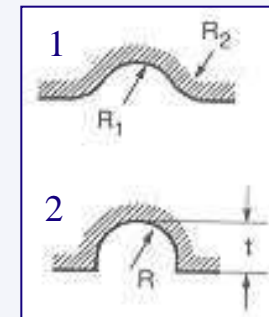


- hoher Schmierdruck durch Quernuten (hohe Tragkraft)
- günstiges Reibungsverhalten



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

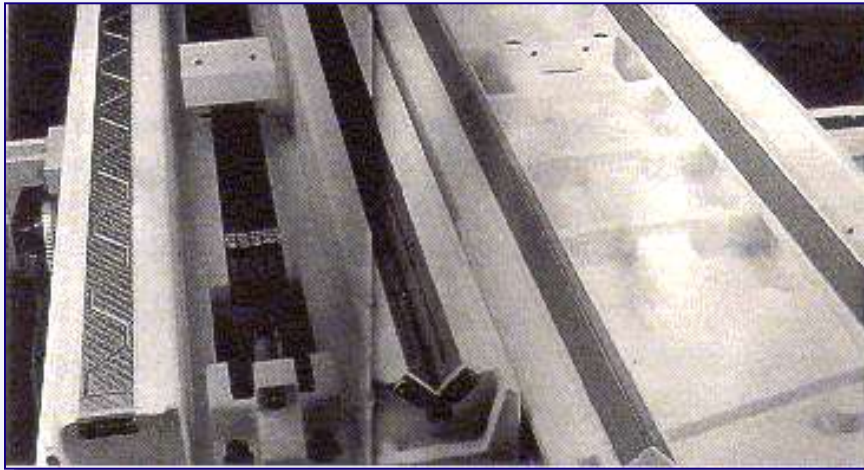
Schmiernutenquerschnitt



günstig

ungünstig
(Schmiermittel wird abgestriffen)

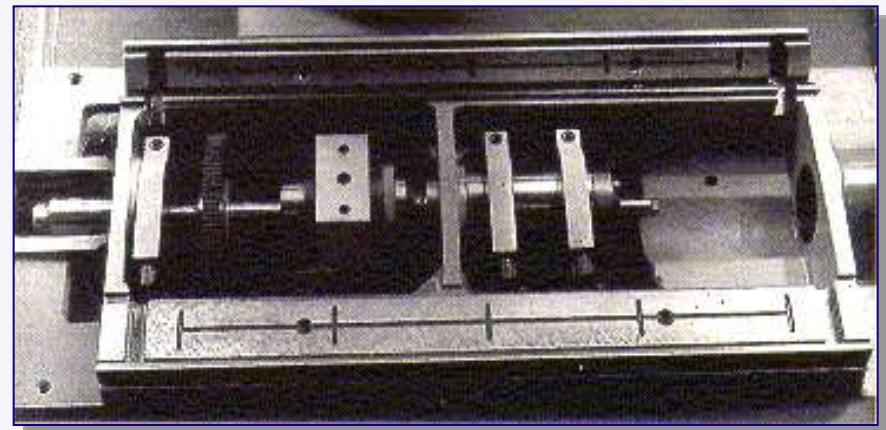
Schmiernuten: hydrodynamische V-Flach-Führungen ohne Umgriff



Quelle: Hirsch, WZM)

Führungsbahnen beschichtet, Gegenbahnen geschliffen und von Hand gemustert

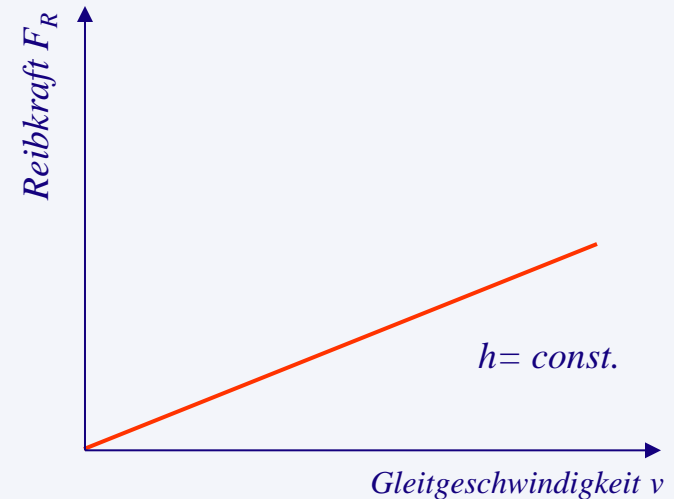
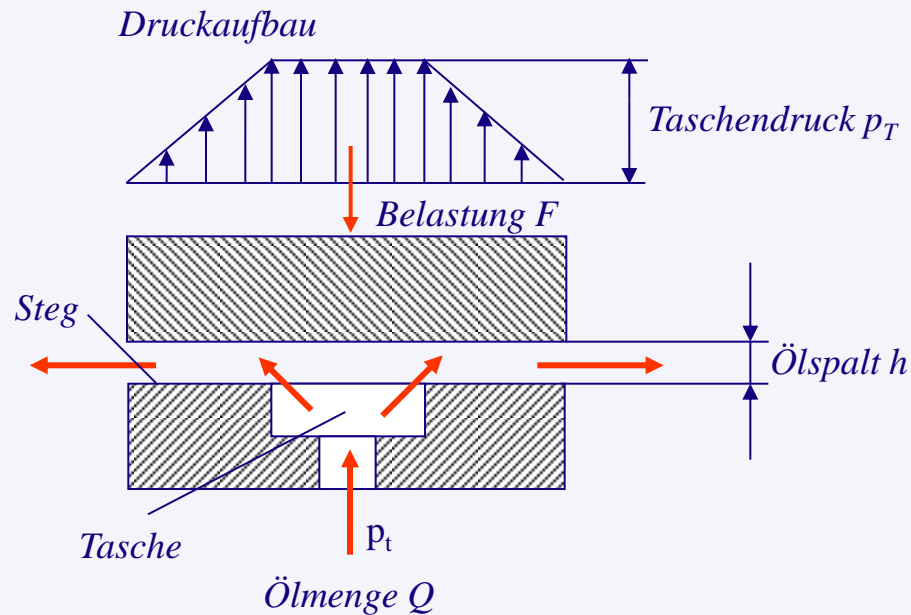
Führungsbahnen unbeschichtet, geschliffen und eingeschliffen



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

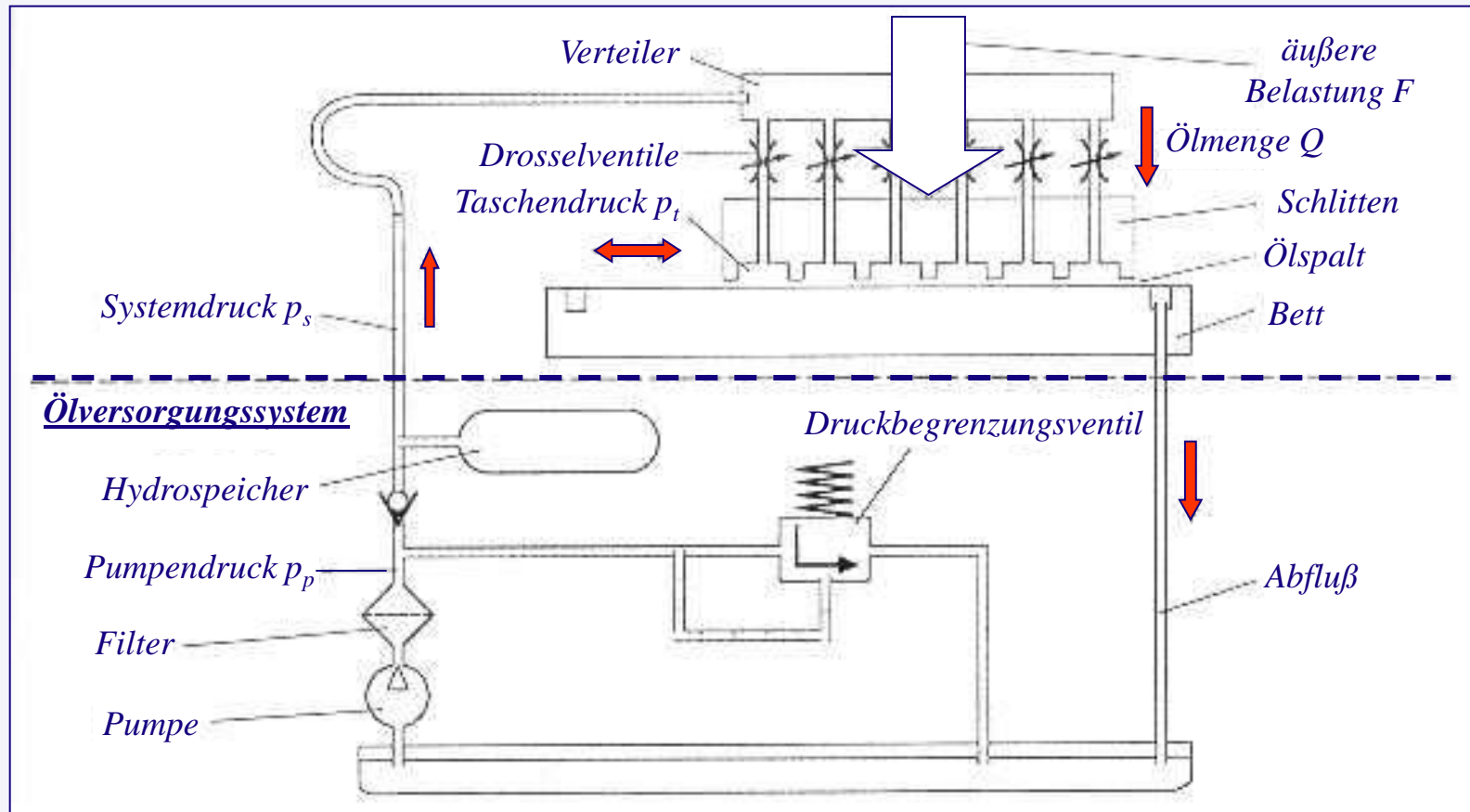
- Vorteile:**
- *verschleißfrei*
 - *hohe Bewegungsgleichförmigkeit (kein Stick-Slip-Effekt)*
 - *gutes statisches Verhalten*
 - *hohe Tragfähigkeit*
 - *gute Dämpfung in Tragrichtung*

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



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

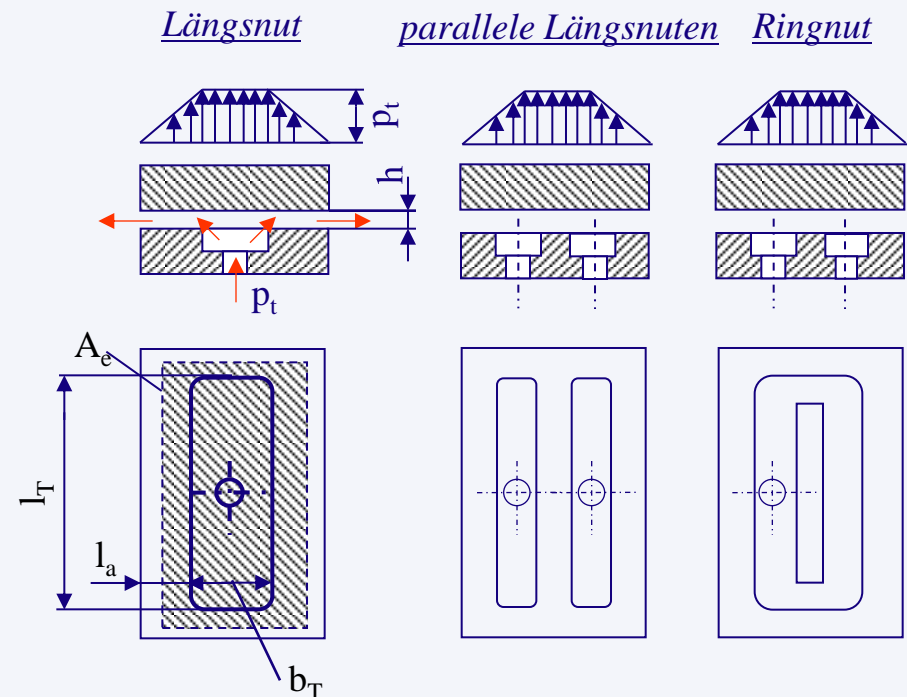
Wesentliche Komponenten einer hydrostatischen Führung



Quelle: Prof. Reinhart, iw b

Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Öltaschenformen

- Öltaschen sind grundsätzlich im kürzerem Führungsteil anzuordnen!
- 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.



A_e effektive Taschenfläche

b_T Öltaschenbreite

h Führungsspalt

l_a Abströmlänge

l_T Öltaschenlänge

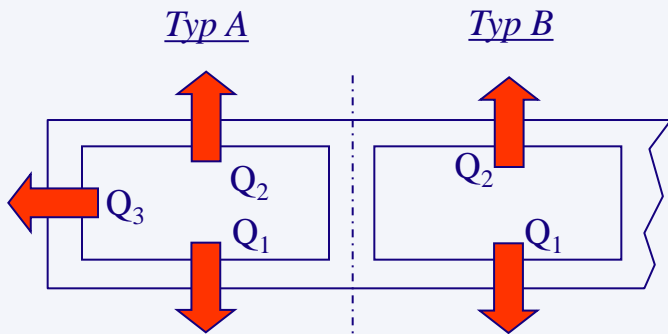
p_t Taschendruck



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

Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Öltaschentypen

Nach der Abströmmöglichkeit des Öls unterscheidet man folgende Öltaschentypen:



Typ A: Randtasche

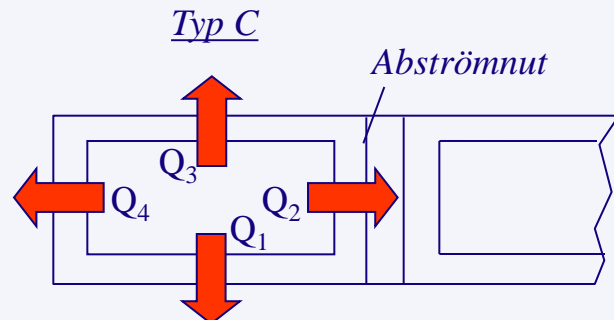
Abströmen des Öls über die beiden Längsstege und den Quersteg am Rand der Führungsfläche

Typ B: Mitteltasche

Abströmen des Öls über die beiden Längsstege

Typ C: Randtasche mit Abströmnut

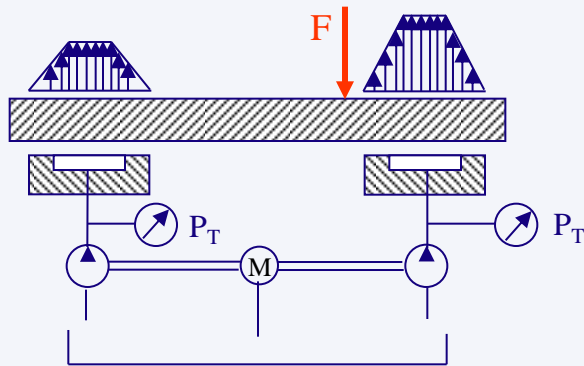
Abströmen des Öls über zwei Längs- und zwei Querstege



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

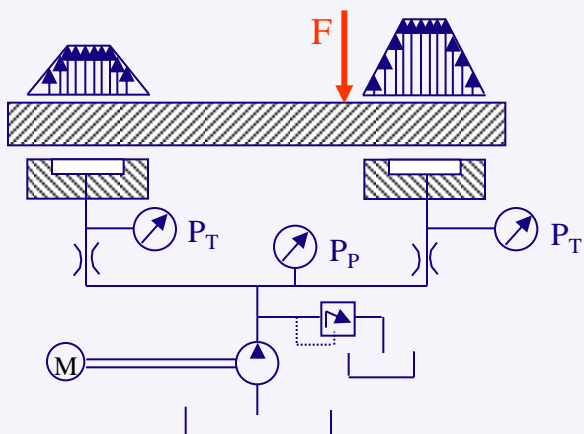
Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Ölversorgungssysteme

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:

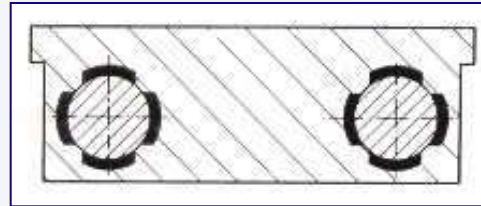
Konstantdrossel (Blenden oder Kapillaren)

Regeldrossel (z.B. Membrandrossel, Progressiv-Mengen-Regler)

Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Schlittenführungen

➔ In der Regel werden hydrostatische Führungen mit einem Umgriff versehen!

Rundführung



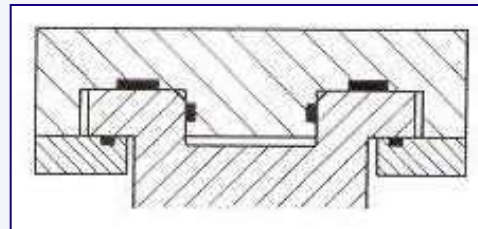
Vorteil:

- einfache Fertigung

Nachteil:

- starke Durchbiegung bei schlanken Säulen
- statisch überbestimmt

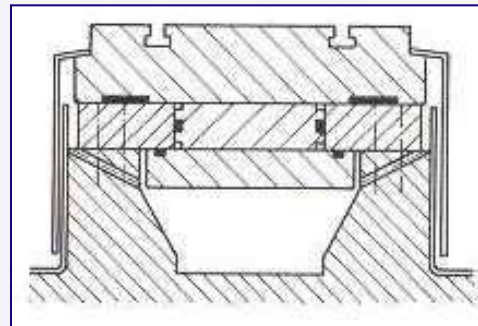
Flachführung mit außenliegendem Umgriff



Vorteil:

- einfache Montage

Flachführung mit innenliegendem Umgriff



Vorteil:

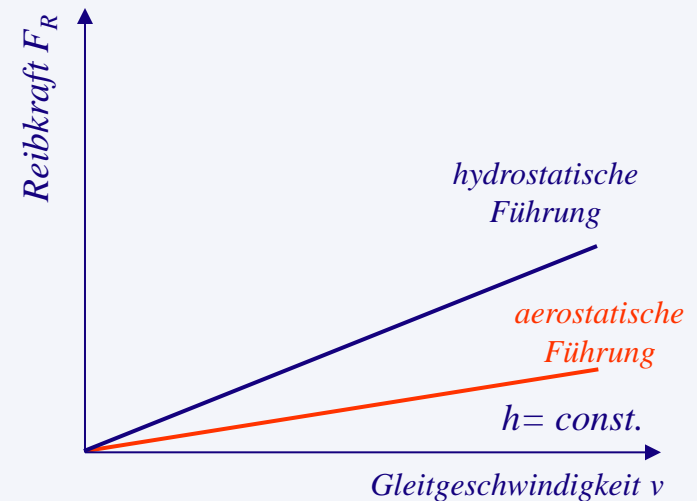
- steifer als bei außenliegendem Umgriff, da der innenliegende Umgriff sich weniger aufbiegt!

Quelle: Weck, WZM

Gleitführung mit aerostatischer Schmierung

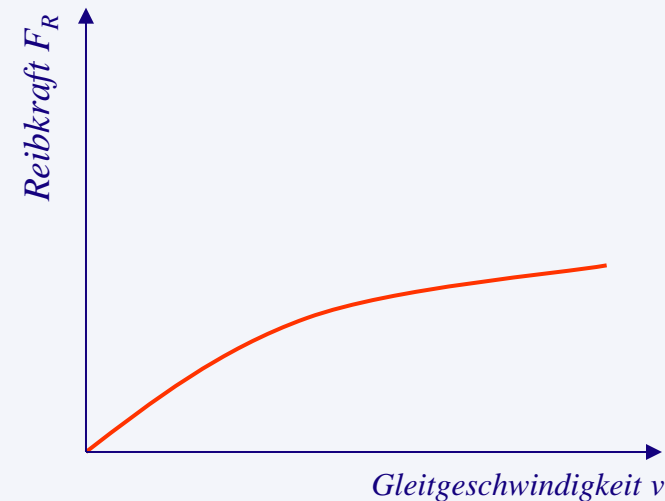
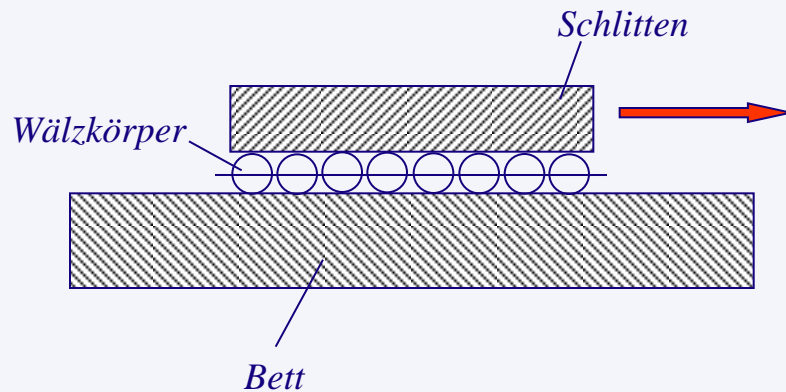
Funktionsprinzip: Aerostatische Führungen (Luftlager) arbeiten ähnlich wie hydrostatische. Als Trennmittel wird jedoch Luft verwendet. Wegen der geringeren Zähigkeit von Luft gegenüber Öl und wegen der Kompressibilität ergeben sich einige typische Merkmale gegenüber der hydrostatischen Führung:

- 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



Wälzfürungen

Funktionsprinzip: Bei Wälzfürungen 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

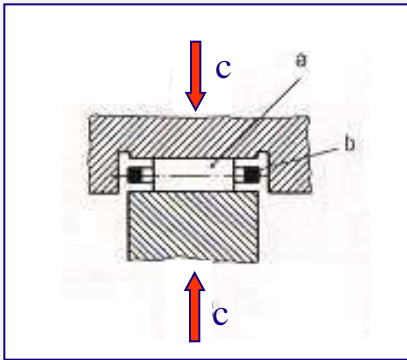
- Vorteile:**
- *kein Stick-Slip-Effekt (wegen Rollreibung)*
 - *geringer Verschleiß*
 - *problemloser Einbau*
 - *geringer Wartungsaufwand*
 - *für höchste Verfahrgeschwindigkeiten geeignet*
 - *Standardisierung der Wälzelemente*

- 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*

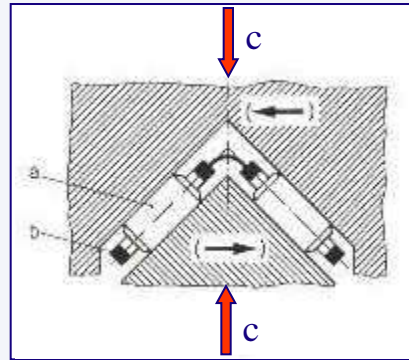
Wälzföhrungen: Unterscheidungsmerkmale

Wälzföhrungsarten: a Wälzkörper b Käfige c äußere Kräfte d Vorspannungskräfte

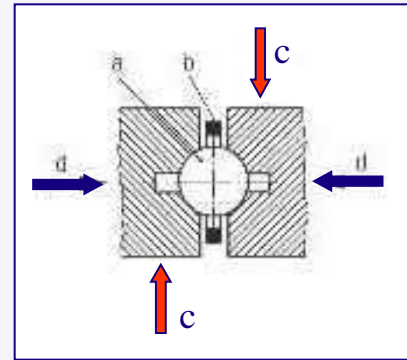
Flachföhrung



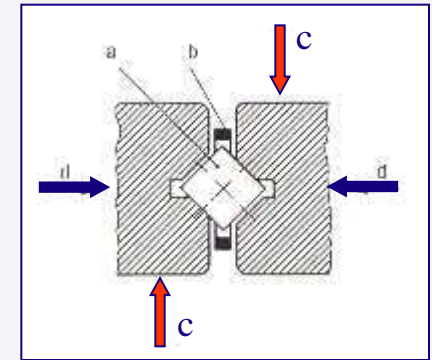
prismatische Föhrung



Kugelföhrung



Kreuzrollenkette



Unterscheidungsmerkmale zwischen den einzelnen Wälzföhrungselementen:

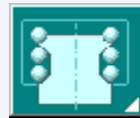
- Wälzkörpertyp (Kugel, Zylinderrolle)
- Beröhrungsart zwischen den Walzkörpern und Laufbahnen (punktförmige bzw. linienförmige Beröhrung)
- Anzahl der Wälzkörperreihen
- Wälzkörperleisten oder Wälzkörperrückföhrung in den Laufeinheiten

Wälzführungen: Beispiele zu den Unterscheidungsmerkmalen

● Anzahl der Wälzkörperreihen



zweireihige
Kugelumlaufeinheit



sechsstufige
Kugelumlaufeinheit

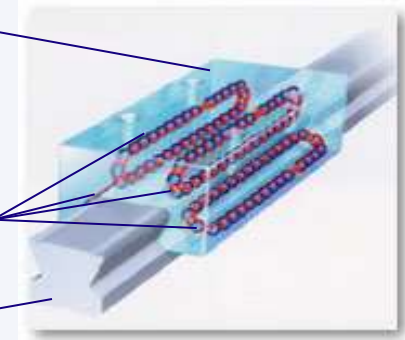


vierreihige
Kugelumlaufeinheit

Kugelumlaufeinheit

vierreihige
Kugelumlaufeinheit

Führungsschiene



Linearführung mit
Kugelschleife (Quelle: THK)

● Wälzkörperleisten oder Wälzkörperrückführung in den Laufeneinheiten

mit
Wälzkörperleiste

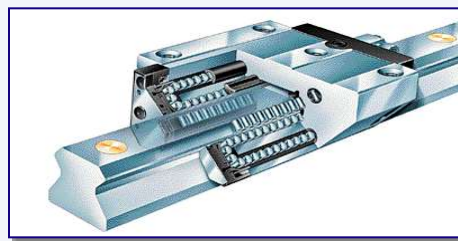


Nadelrollenführung



Kreuzrollenführung

mit
Wälzkörperrückführung



Rollenumlaufeinheit



Kugelumlaufeinheit

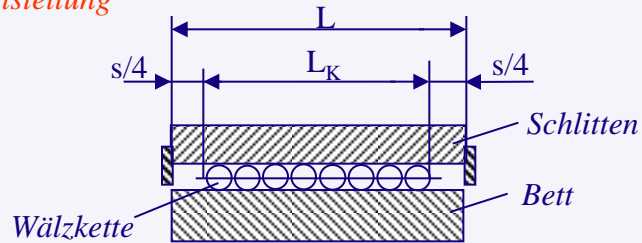


Linearkugellager

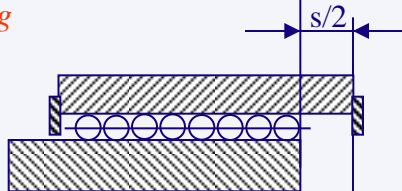
Ausführungsformen: Linear-Wälzführungen mit Wälzkörperkette

Wälzkette kürzer als Führungsschiene

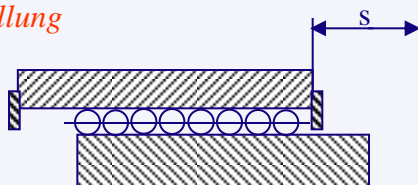
Mittelstellung



rechte Endstellung



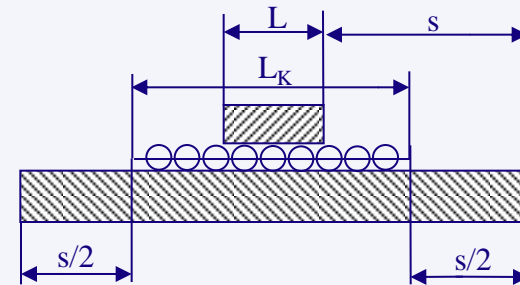
linke Endstellung



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

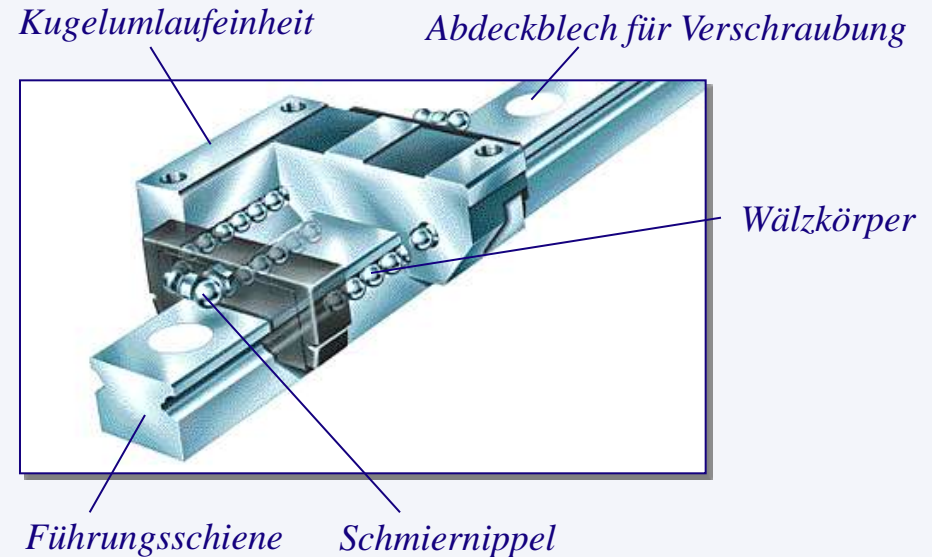
Zur Realisierung großer Verfahrswege werden Wälzführungen mit rückgeführten Wälzkörpern verwendet. Die Wälzkörper laufen in einer Endlosschleife, so dass der Verschiebeweg nur von der Länge der Führungsschiene begrenzt wird.

Nachteile:

(gegenüber Wälzführungen ohne Wälzkörperrückführung)

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

Kugelumlaufeinheit (Quelle: INA)



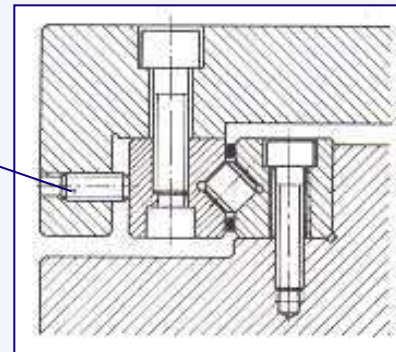
Wälzführungen: Einstellmöglichkeiten der Vorspannung

➔ 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

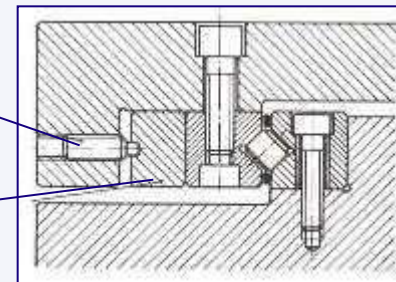
Stellschraube für
Vorspannung



b) Für höhere Genauigkeit und Steifigkeit wird eine Zwischenplatte verwendet

Stellschraube für
Vorspannung

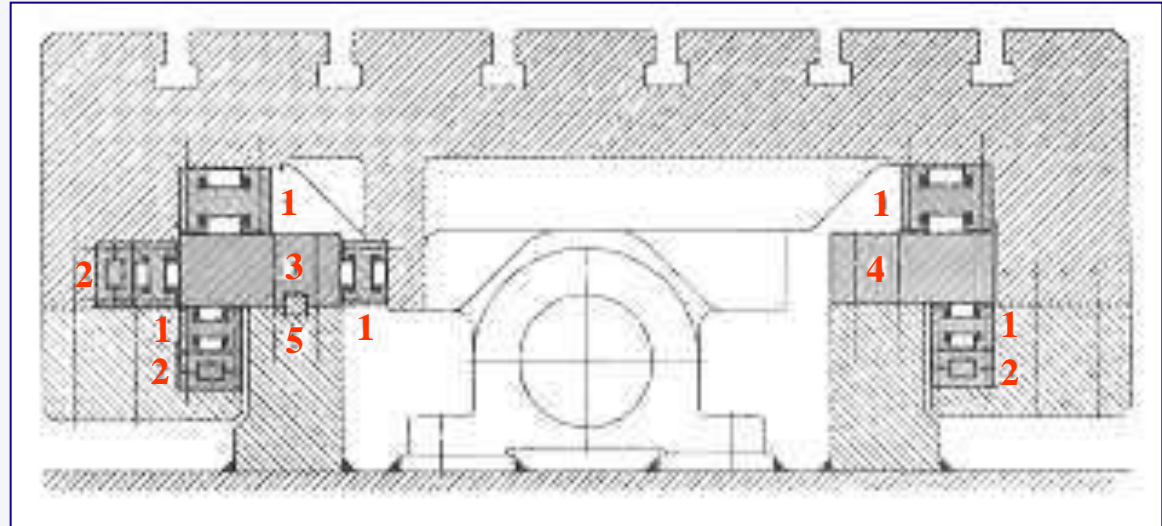
Zwischenplatte



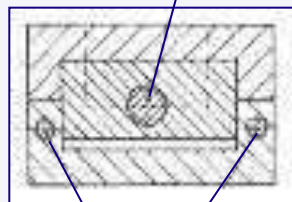
Einstellmöglichkeiten der Vorspannung: Tischführung einer NC-Bohrmaschine

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

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



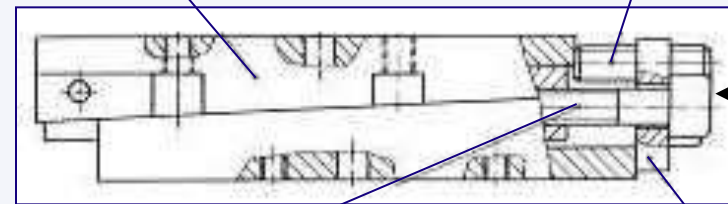
A Zugschraube



Befestigungsschrauben
der Halteplatte

axial verschiebbarer
Klemmkeil

Konterschraube zum
Klemmen der Halteplatte















































Zugschraube zum Einstellen
der Vorspannung

freie bewegliche
Halteplatte

Quelle: Weck, WZM

Führungen: Eigenschaften verschiedener Führungsprinzipien

<i>Merkmale</i>	<i>hydrodynamisch</i>	<i>wälzend</i>	<i>hydrostatisch</i>	<i>aerostatisch</i>
Steifigkeit				
Dämpfung				
Leichtgängigkeit				
Verschleißfestigkeit				
Stick-Slip-Effekt				
Geschwindigkeitsbereich				
Betriebssicherheit				
Standardisierung				
Kosten				
Bauaufwand				
Tragfähigkeit				

 *hoch*  *mittel*  *niedrig*

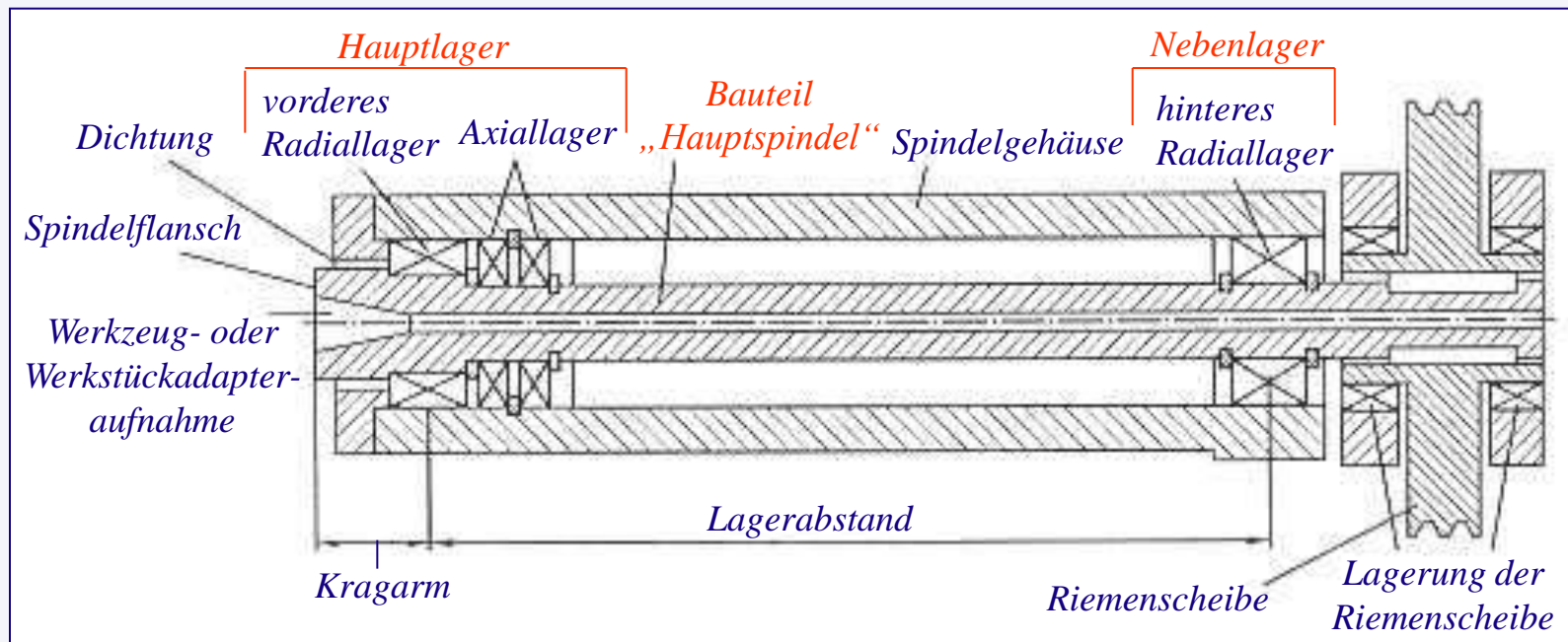
Quelle: Prof. Reinhart, iw b

Baugruppe „Hauptspindel“



Baugruppe „Hauptspindel“

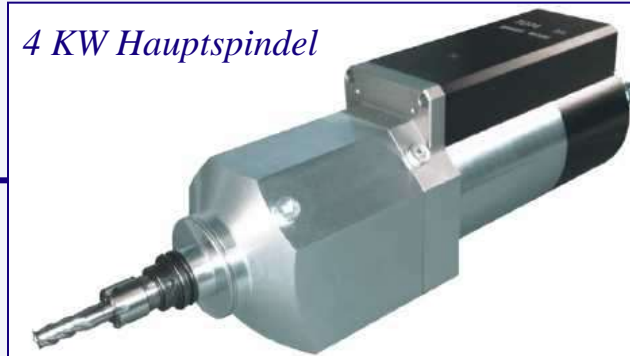
Prinzip des Aufbaus der Baugruppe „Hauptspindel“



Quelle: Hirsch, WZM

Baugruppe „Hauptspindel“

4 KW 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*

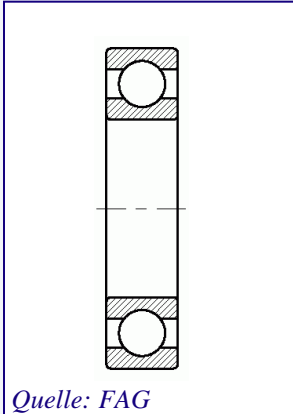
Wälzlager

- 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: *Radial*wälzlager für Hauptspindeln (typische Beispiele)

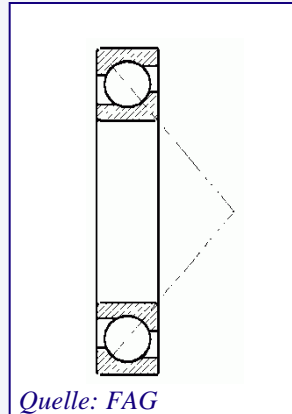
Rillenkugellager



Eigenschaften:

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

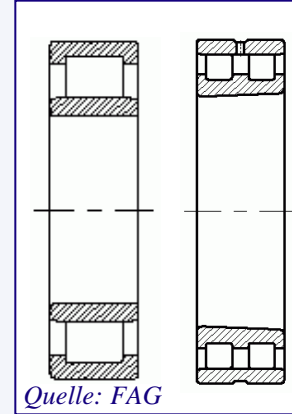
Schräggugellager



Eigenschaften:

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

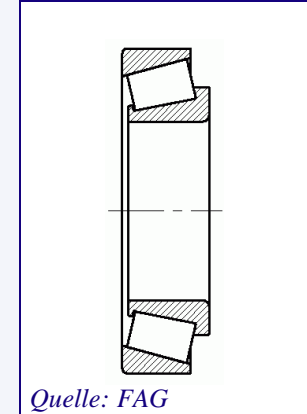
Zylinderrollenlager



Eigenschaften:

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

Kegelrollenlager

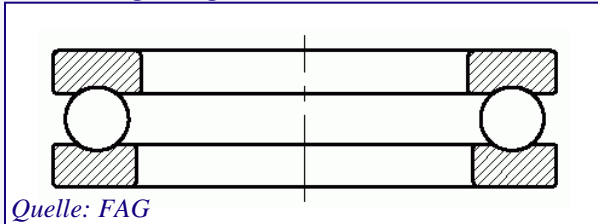


Eigenschaften:

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

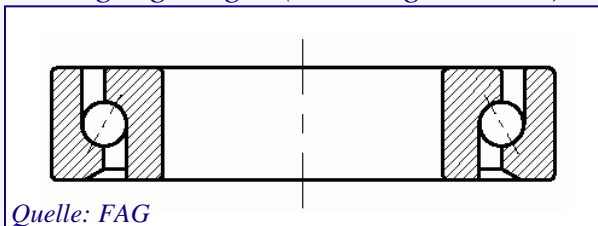
Wälzlager: Axialwälzlager für Hauptspindeln (typische Beispiele)

Rillenkugellager



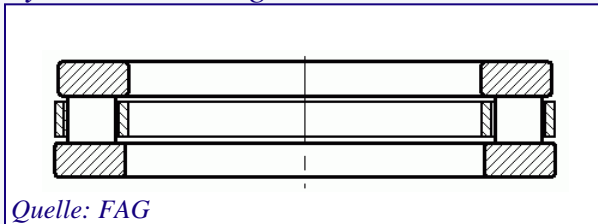
- Eigenschaften:**
- mittlere Axialkräfte
 - mittlere Drehzahlen
 - einfache Spieleinstellung

Schräggugellager (einseitig wirkend)



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

Zylinderrollenlager



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

Wälzlager: bevorzugte Spindellagerungen

radiale Lagerung: zweireihiges Zylinderrollenlager

- hohe radiale Steifigkeit
- hohe Rundlaufgenauigkeit

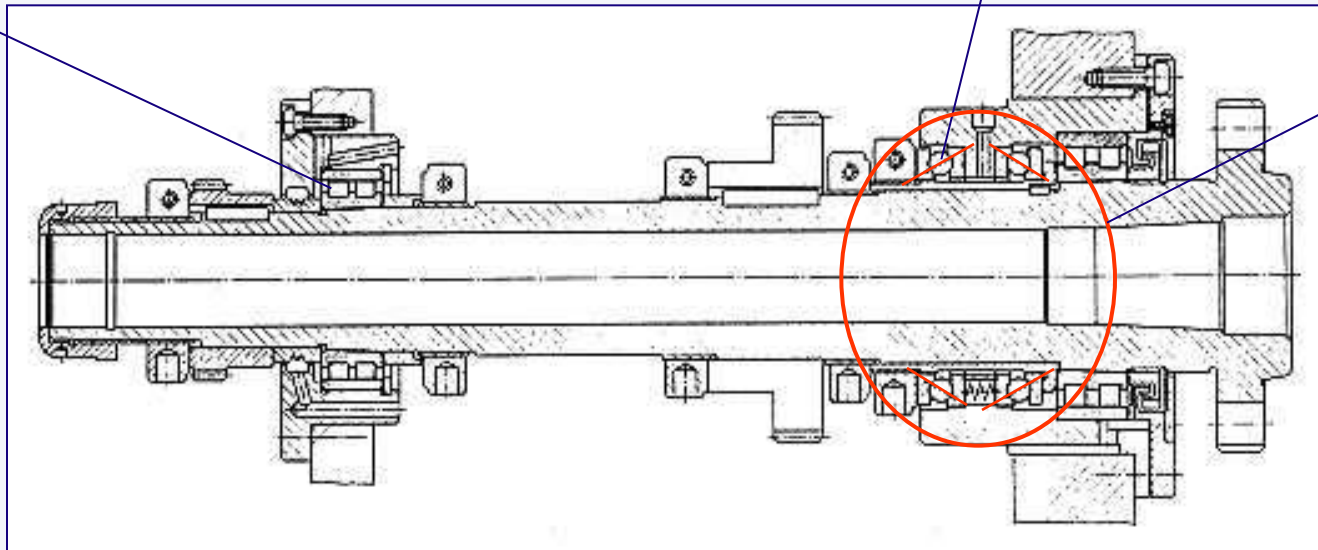
axiale Lagerung: Axialrillenkugellager

- mittlere Drehzahlen

zweireihiges
Zylinderrollenlager

Axialrillenkugellager

O-Anordnung



Belastungsprofil: • mittlere Drehzahlen
• mittlere Belastungen

Verwendungszweck: • Fräsmaschine
• Drehmaschine

Quelle: Perović

Wälzlager: bevorzugte Spindellagerungen

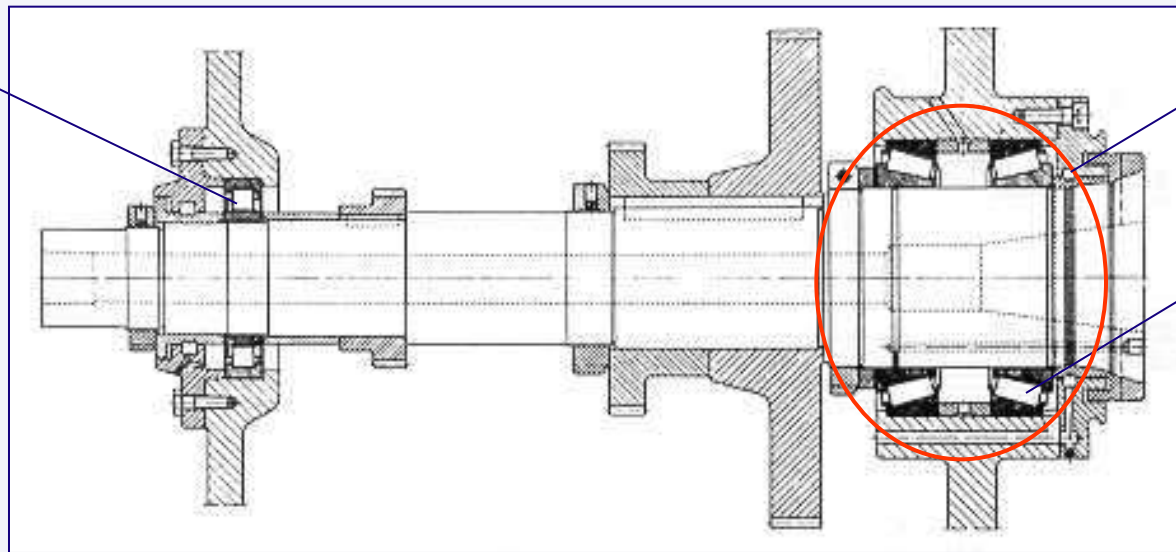
*radiale Lagerung: Kegelrollenlager,
Zylinderrollenlager*

- *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*

Zylinderrollenlager



O-Anordnung

Kegelrollenlager

Belastungsprofil: • *geringe Drehzahlen*
• *hochbelastete Spindeln*

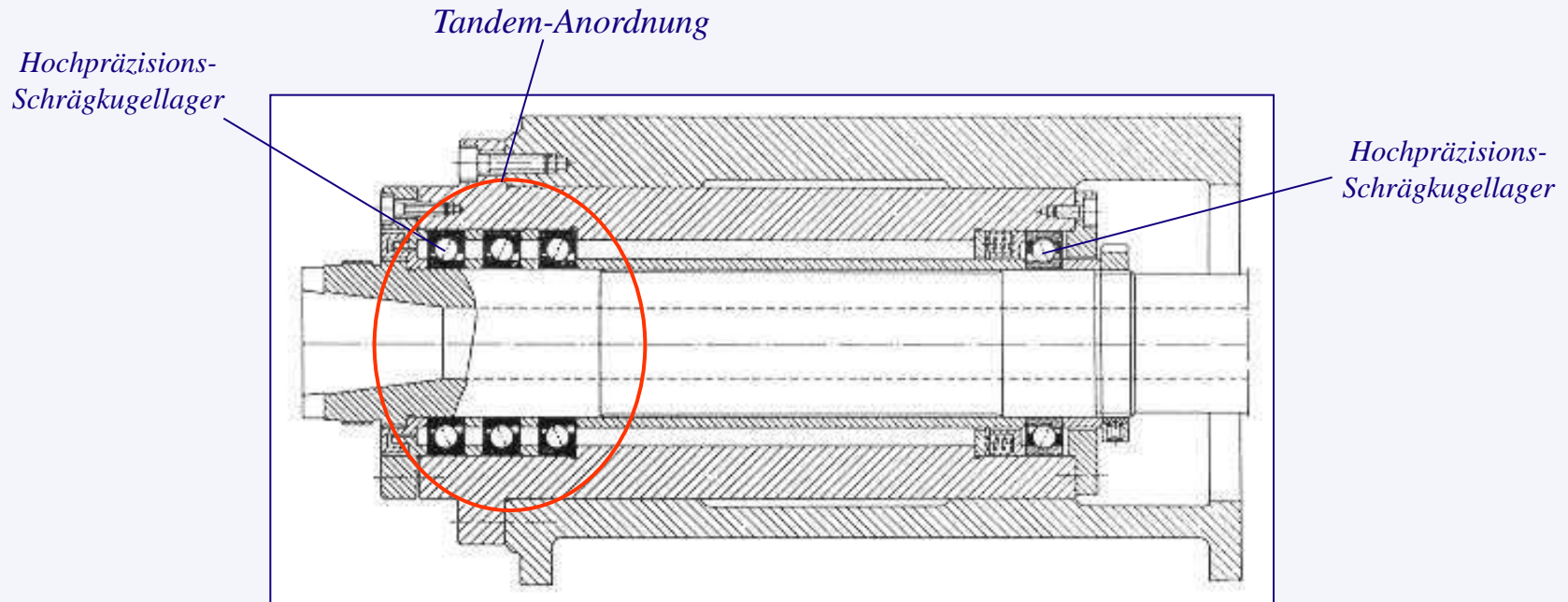
Verwendungszweck: • *Schruppfräsmaschinen*
• *Schruppdrehmaschinen*

Quelle: Perović

Wälzlager: bevorzugte Spindellagerungen

radiale Lagerung: Hochpräzisions-Schräggugellager *axiale Lagerung: Hochpräzisions-Schräggugellager*

- höchste Rundlaufgenauigkeit
- geringe radiale und axiale Steifigkeit



Belastungsprofil:

- hohe Drehzahlen
- geringere Belastungen

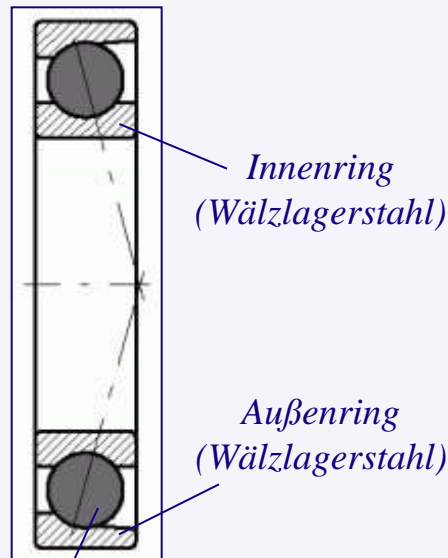
Verwendungszweck:

- Schleifmaschine
- Feinbohrmaschine
- Feindrehtmaschine

Quelle: Perović

Wälzlager: Keramik-Hybrid-Lager

Hybrid-Keramikspindellager (Schräggugellager)



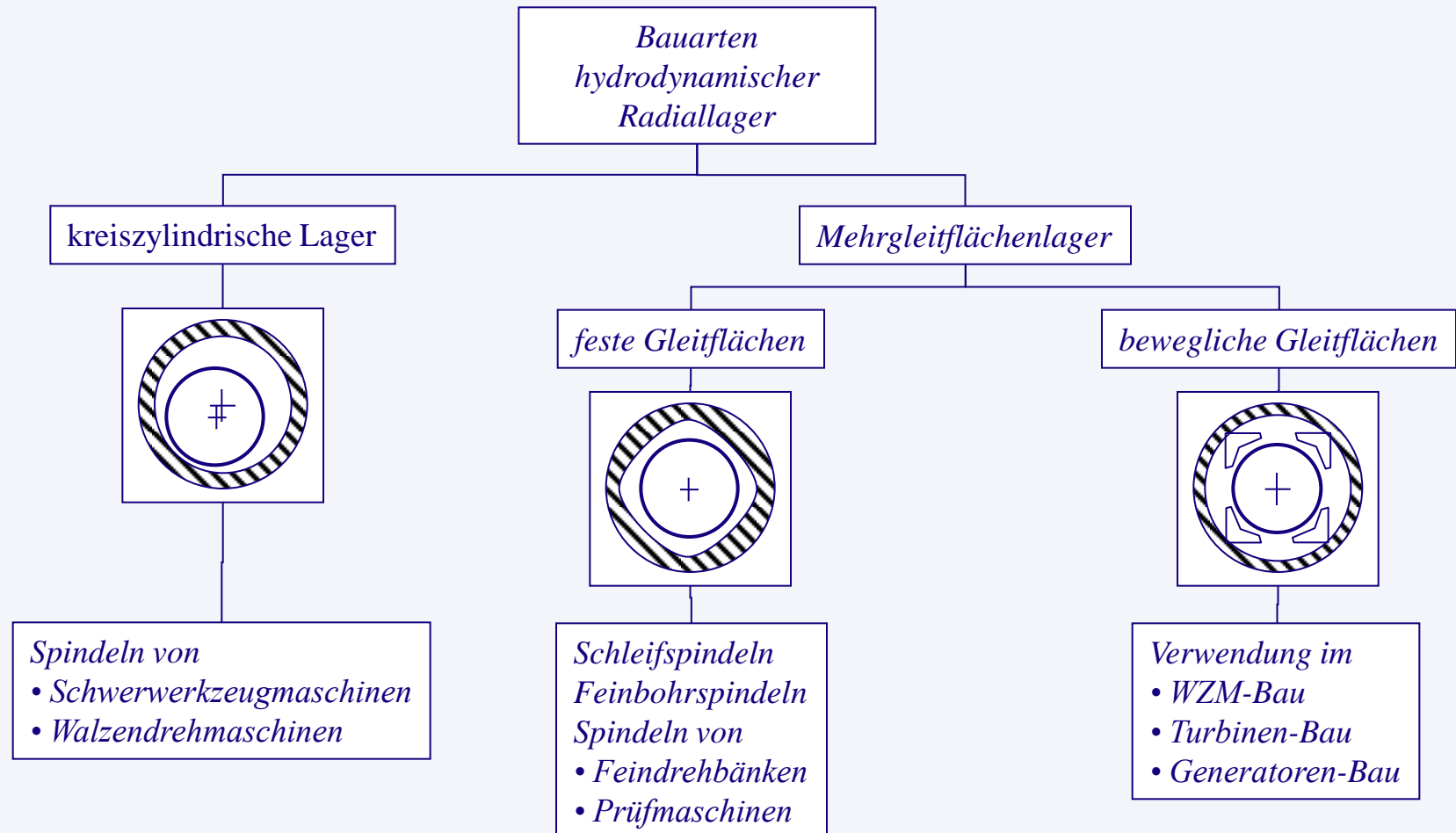
Keramik-Hybrid-Lager besitzen, gegenüber herkömmlichen Wälzlagern, Kugeln aus Keramik (Siliziumnitrid Si_3N_4).
Damit erheben sich eine Reihe von **Vorteilen**:

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

Nachteil:

- höherer Preis (wegen Herstellung der Keramikugeln)

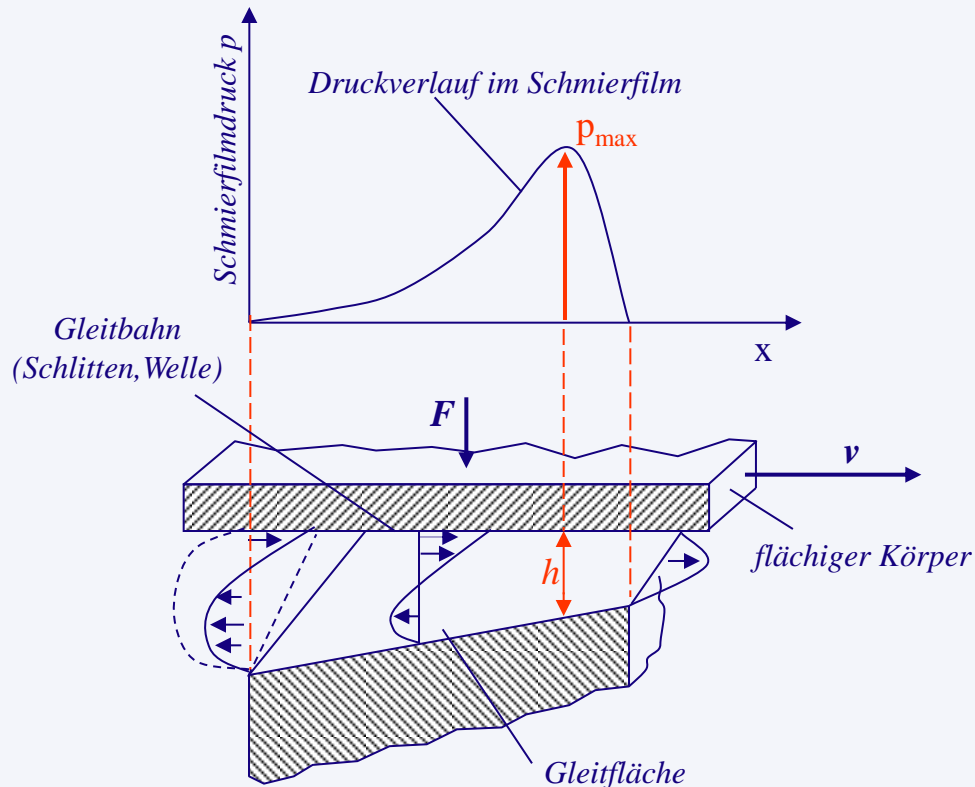
Hydrodynamische Gleitlager



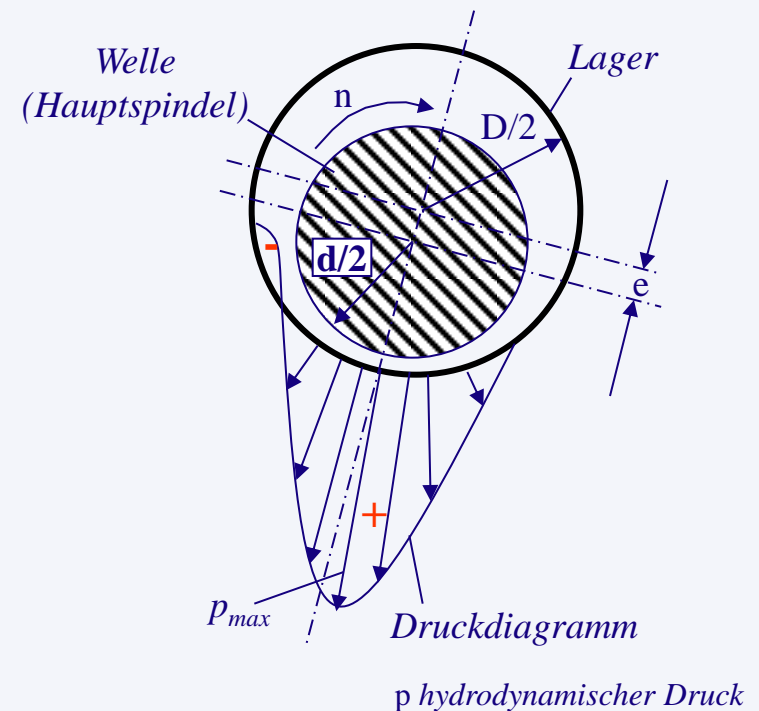
Quelle: Weck, WZM

Hydrodynamische Gleitlager

Druckaufbau und -verteilung in einer Gleitführung



Druckaufbau und -verteilung im Gleitlager

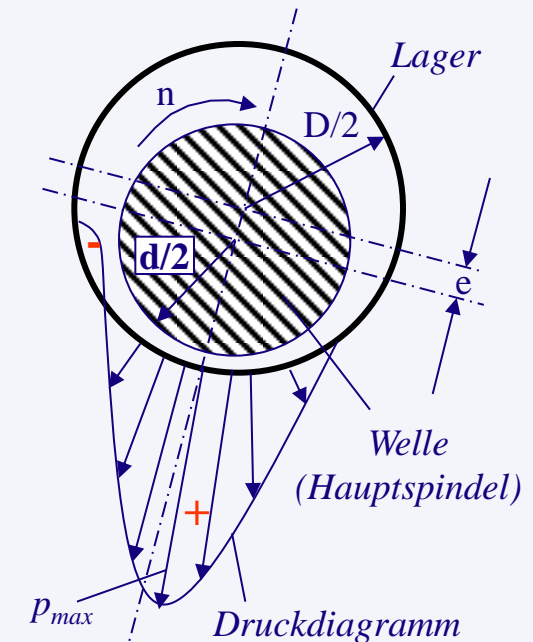
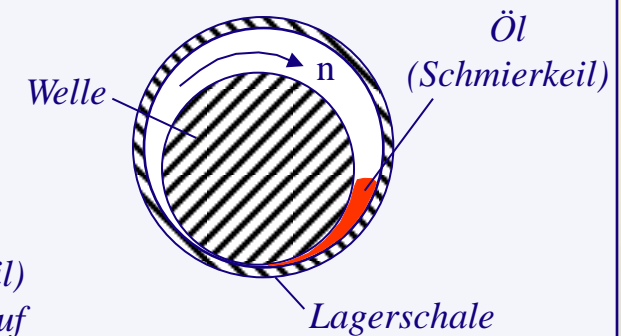


➔ Wie bei der Gleitführung entsteht im Gleitlager kurz vor der engsten Stelle, zwischen Welle und Lager, das Druckmaximum. Danach fällt der Druck ab und es kann ein Unterdruck entstehen.

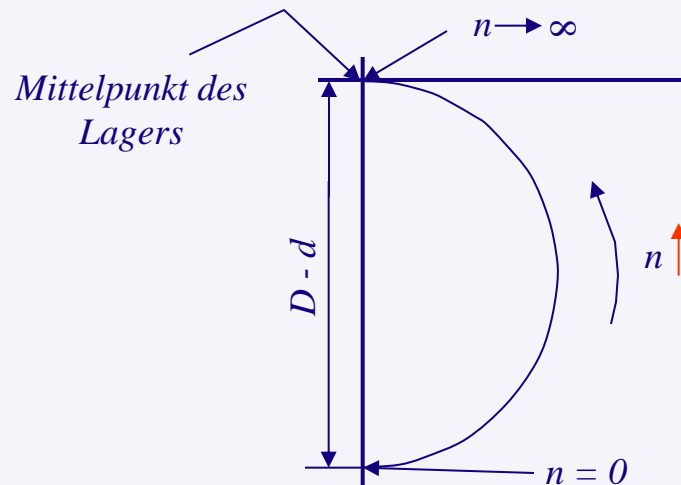
Hydrodynamische Gleitlager: Druckaufbau (kreiszyklindrisches Gleitlager)

- 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!

Druckaufbau und -verteilung



Gumbelscher Halbkreis



Hydrodynamische Gleitlager: Druckaufbau (kreiszyklindrisches Gleitlager)

resultierende Eigenschaften des kreiszyklindrischen 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

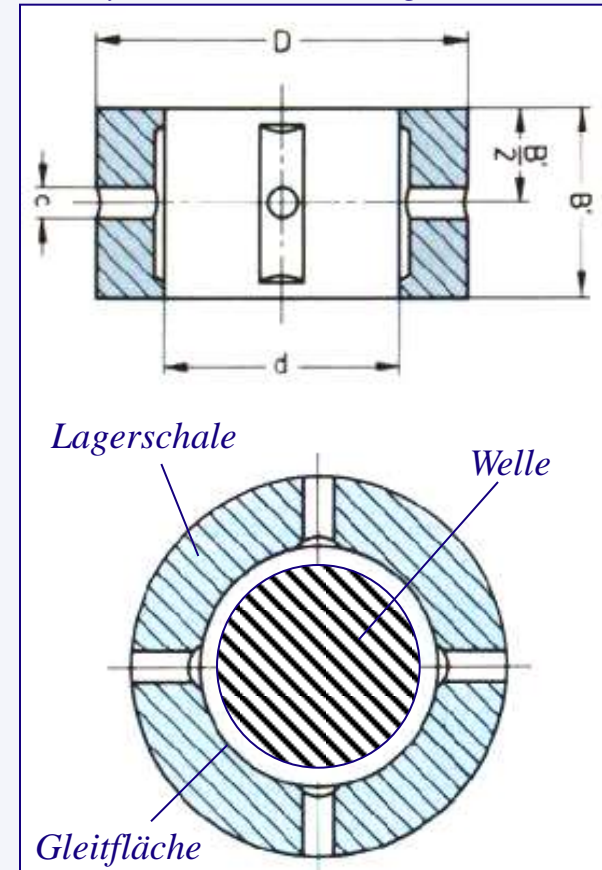
➔ Die Tragkraft von hydrodynamischen Lagern ist von der Drehzahl abhängig!

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

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!

kreiszyklindrisches Gleitlager



Quelle: GMH-Herzberg

Hydrodynamische Gleitlager: Mehrgleitflächenlager (feste Gleitflächen)

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

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

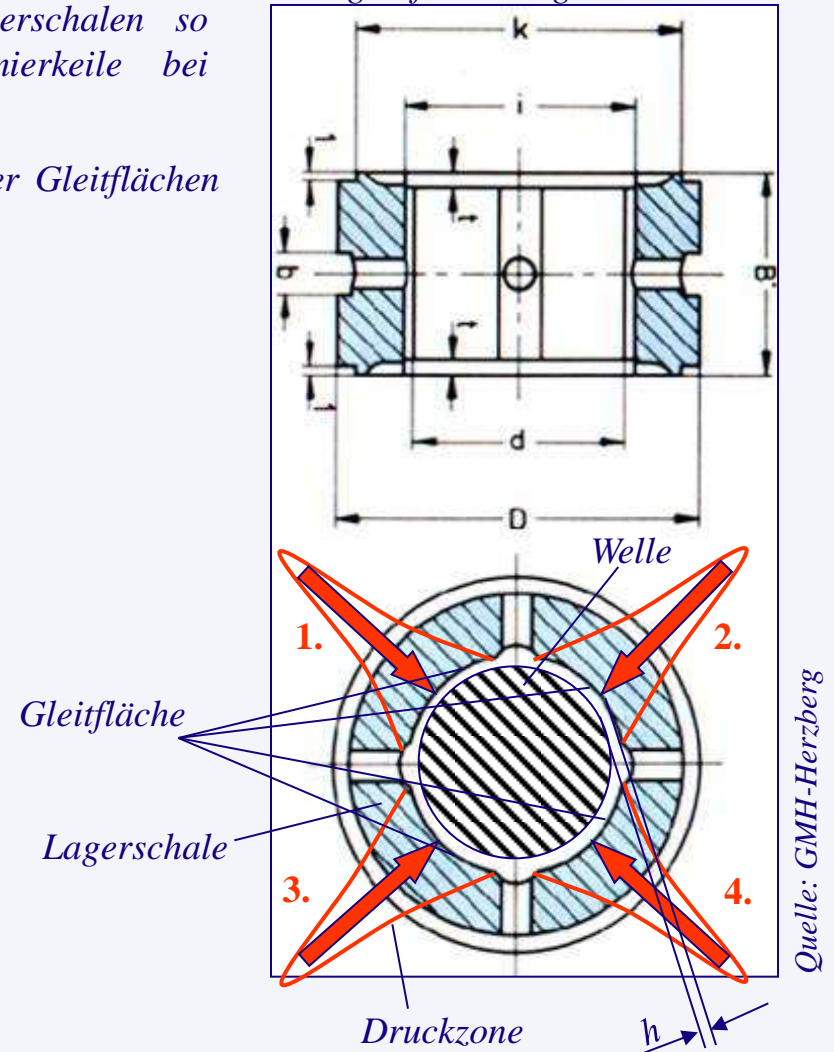
Vorteil:

- 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.

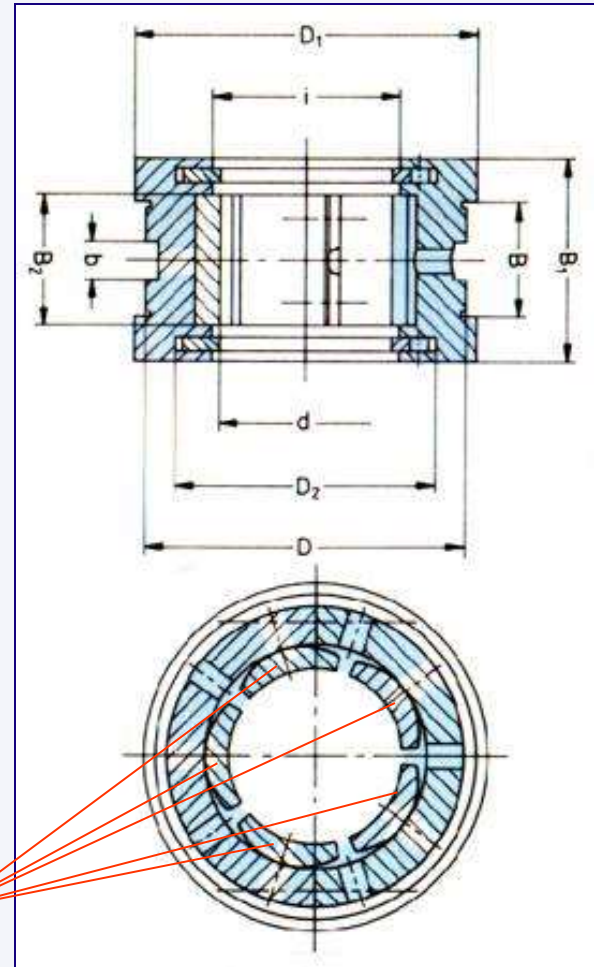
Vorteil:

- 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

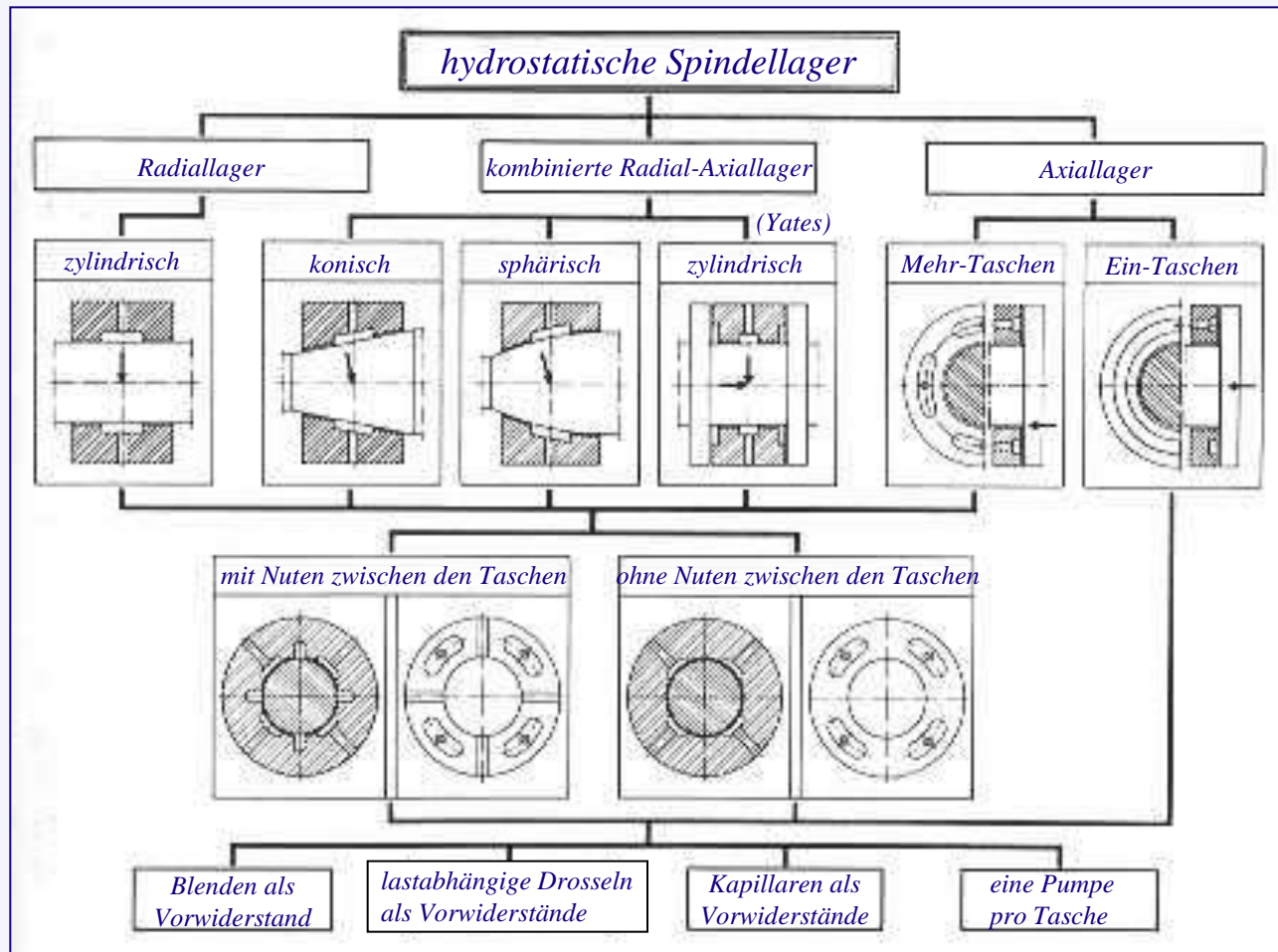
Kippsegmentlager



Kippsegment

Quelle: GMH-Herzberg

Hydrostatische Gleitlager: Bauformen



Quelle: Weck, WZM

Hydrostatische Gleitlager

➔ *Eigenschaften hydrostatisch gelagerter Spindeln:*

- *die Tragkraft des Lagers ist von der Drehzahl unabhängig*

$$F = p_T \cdot A_w$$

p_T *Taschendruck*
 A_w *Taschenfläche*

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

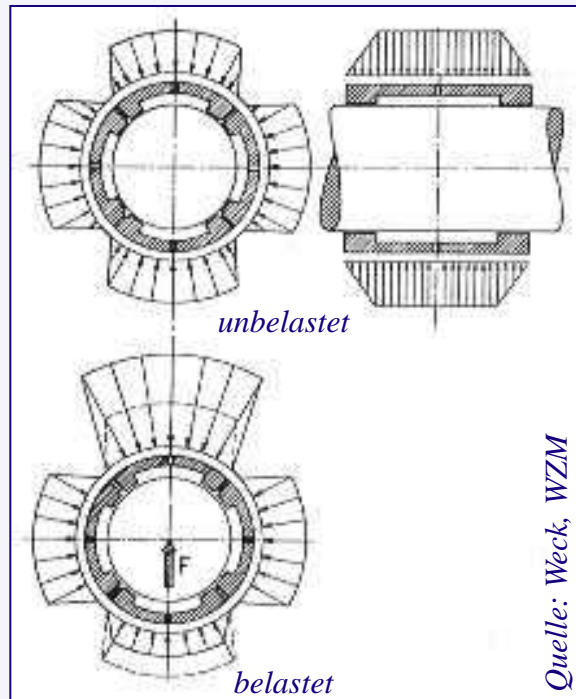
$$K \approx \frac{p_p \cdot A_w}{h_0}$$

- *Pumpendruck p_p*
- *Taschenfläche A_w*
- *Lagerspalthöhe h_0*

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

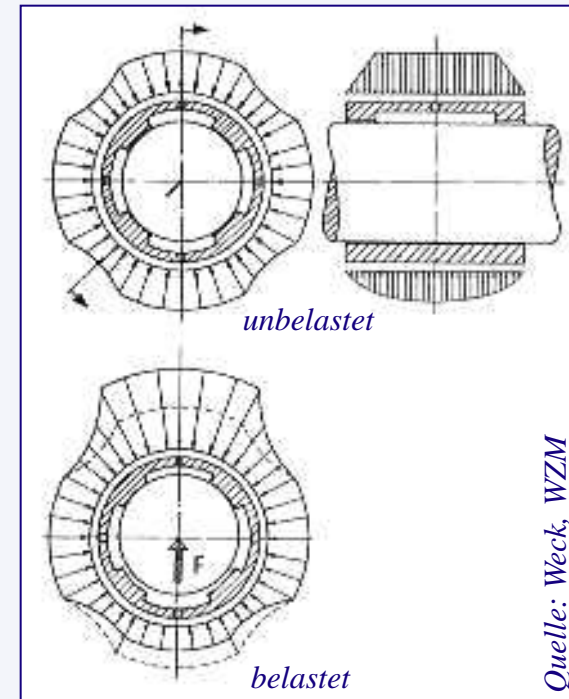
Hydrostatische Gleitlager: Druckverlauf in einem Radiallager

mit Ölrücklaufnuten zwischen den Lagern



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

ohne Ölrücklaufnuten zwischen den Lagern



- **allgemein gebräuchliche Bauart**
- Öl kann nur in axialer Richtung abfließen
- Taschendrucke 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 $[K]$	<u>wesentlicher Einfluss auf</u> →	geometrische Formgenauigkeit
dynamische Steifigkeit $[K_{dyn}]$	<u>wesentlicher Einfluss auf</u> →	Oberflächengüte

Es gilt:

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

F statische Kraft

\tilde{F} dynamische Kraft

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

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

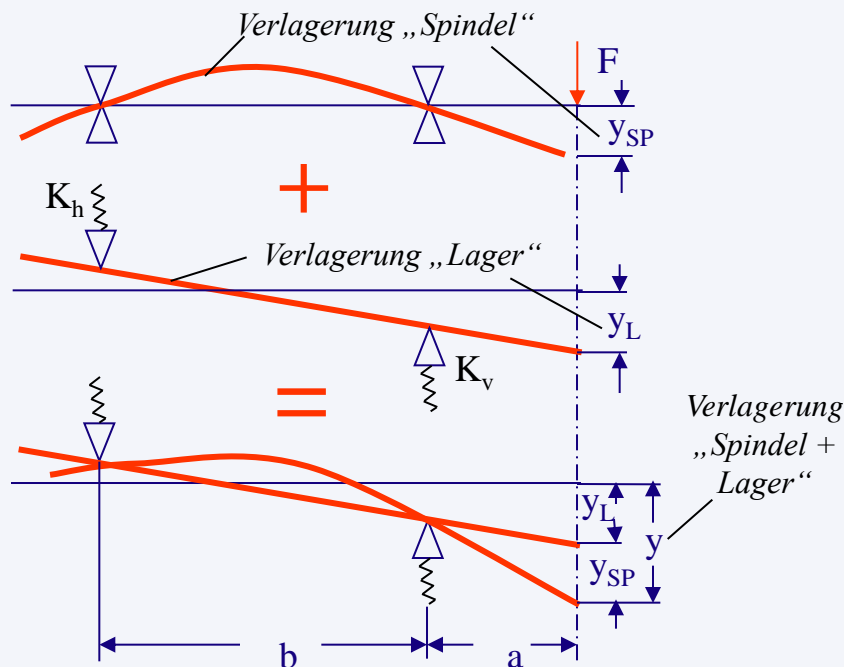
F statische Kraft

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:

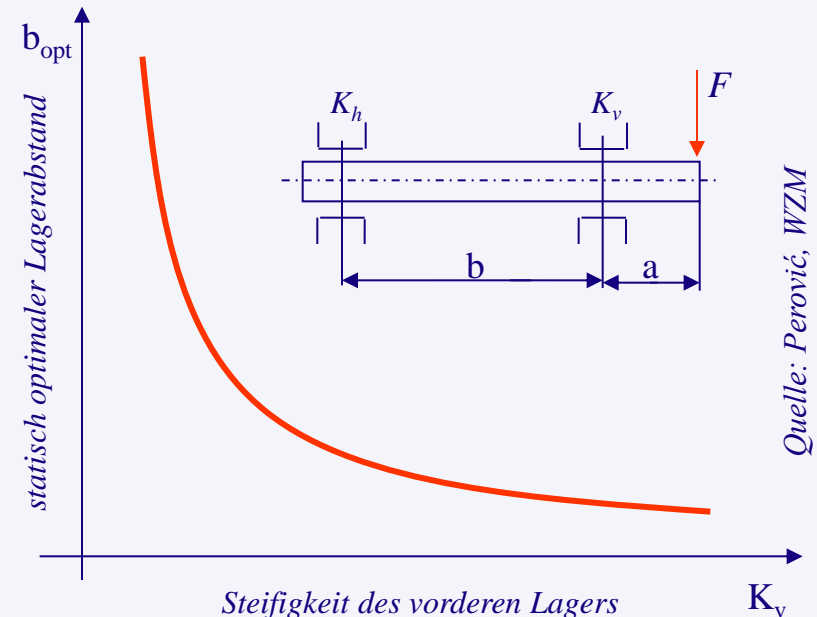
$$y = y_{SP} + y_L = \frac{F \cdot b \cdot a^2}{3 \cdot J_{SP} \cdot E} \left(1 + \frac{a}{b} \right) + \frac{F}{b^2} \cdot \left[\frac{(a+b)^2}{K_V} + \frac{a^2}{K_h} \right]$$

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

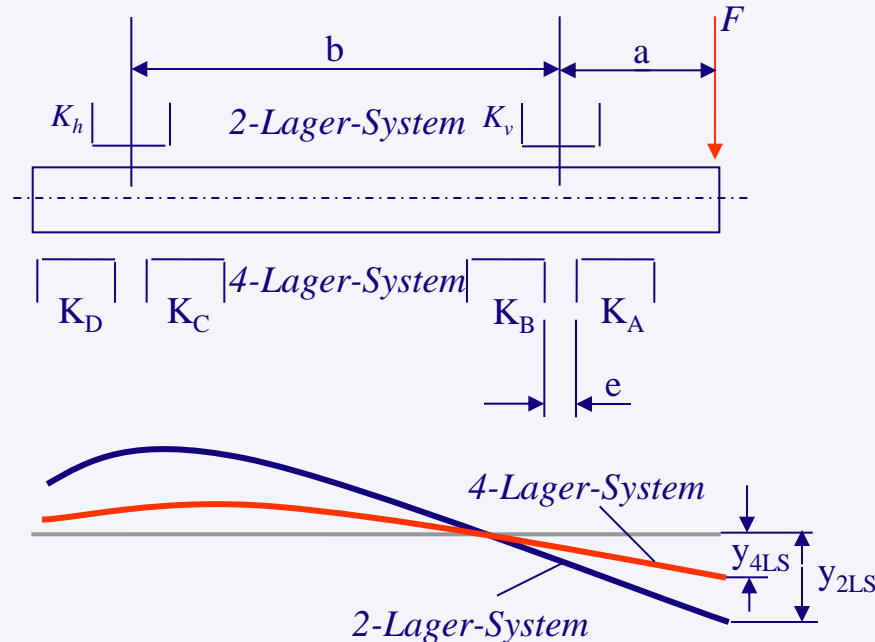


Quelle: Perović, WZM

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.

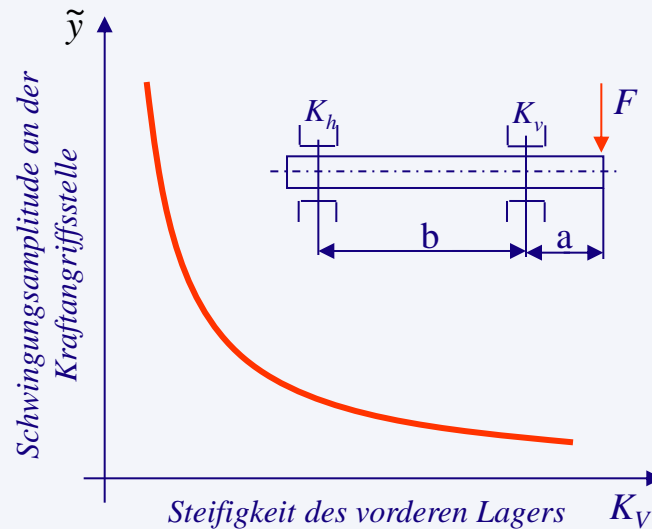


Mit Zunahme des Abstands e zwischen zwei vorderen Lagern verringert sich die Gesamtverlagerung y . Diesem Trend sind jedoch Grenzen gesetzt, da bei immer größer werdendem Abstand e das vordere Lager schließlich so nah an das hintere rückt, dass die Vorteile des zweiten vorderen Lagers aufgehoben werden.

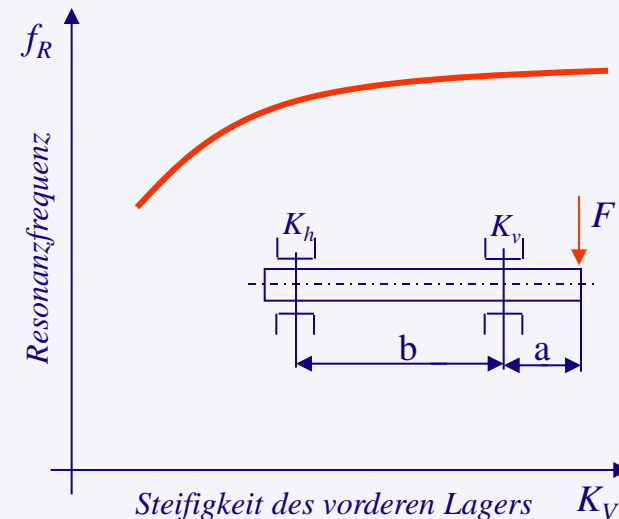
Quelle: Perović, WZM

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

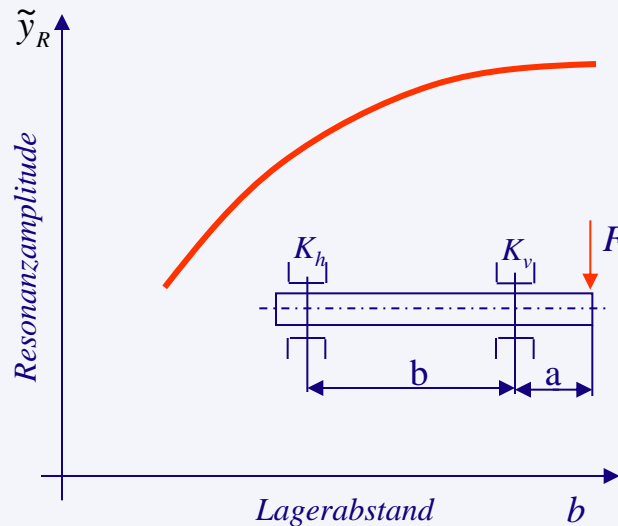


Mit zunehmender Steifigkeit des vorderen Lagers nimmt die Schwingungsamplitude an der Kraftangriffsstelle ab und die Resonanzfrequenz zu. Die Kurve der dynamischen Steifigkeit verläuft ähnlich wie die Kurve der statischen Steifigkeit!

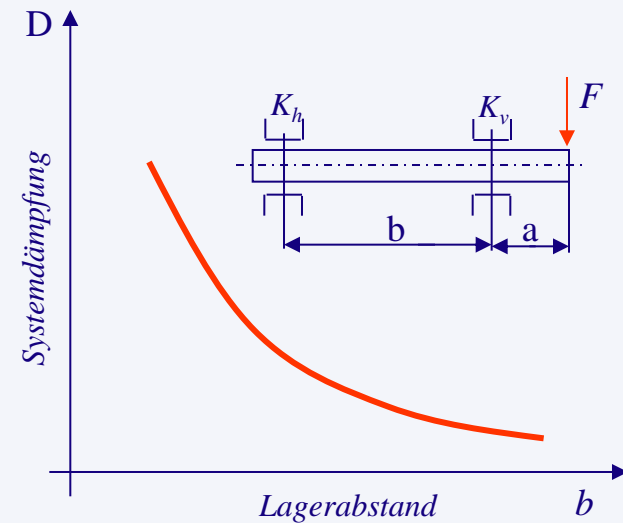
Quelle: Perović, WZM

Dynamische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

Einfluss des Lagerabstands auf die Resonanzamplitude



Einfluss des Lagerabstands auf die Systemdämpfung

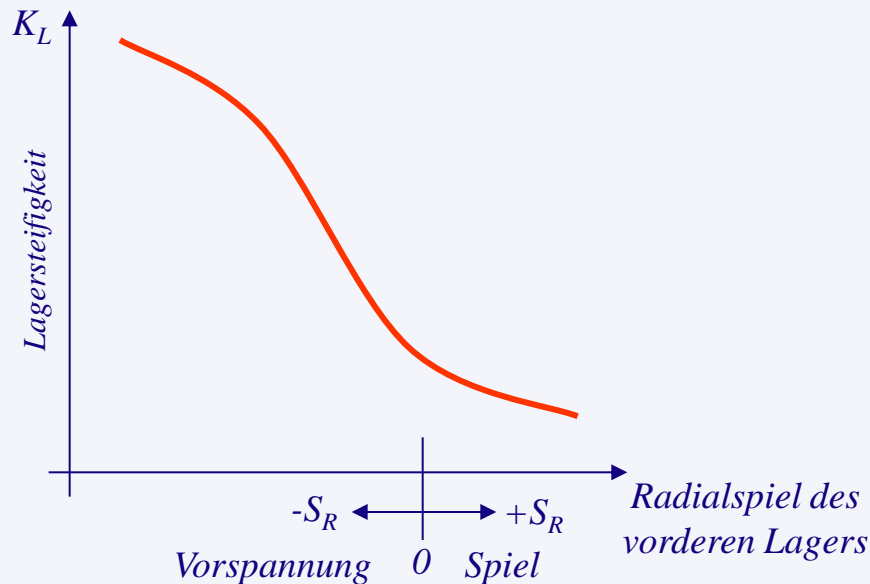


Mit abnehmendem Lagerabstand b verbessert sich das dynamische Verhalten des Spindel-Lager-Systems. Die Systemdämpfung D nimmt zu und die Resonanzamplitude ab. Dabei ist zu beachten, dass kleine Lagerabstände nur bei großen Lagersteifigkeiten zu wählen sind, damit die statische Verlagerung minimal wird.

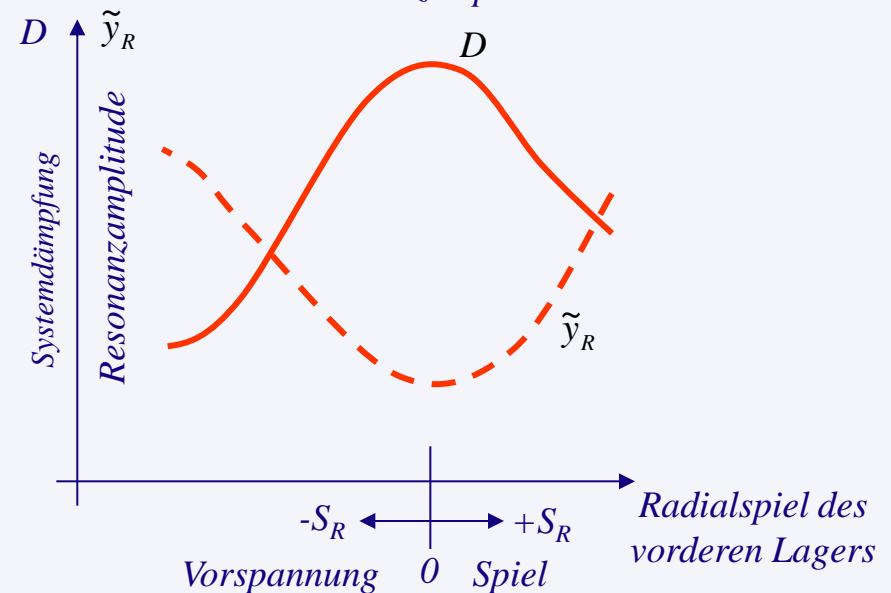
Quelle: Perović, WZM

Dynamische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

Einfluss des Lagerspiels auf die Lagersteifigkeit



Einfluss des Lagerspiels auf die Systemdämpfung und Resonanzamplitude



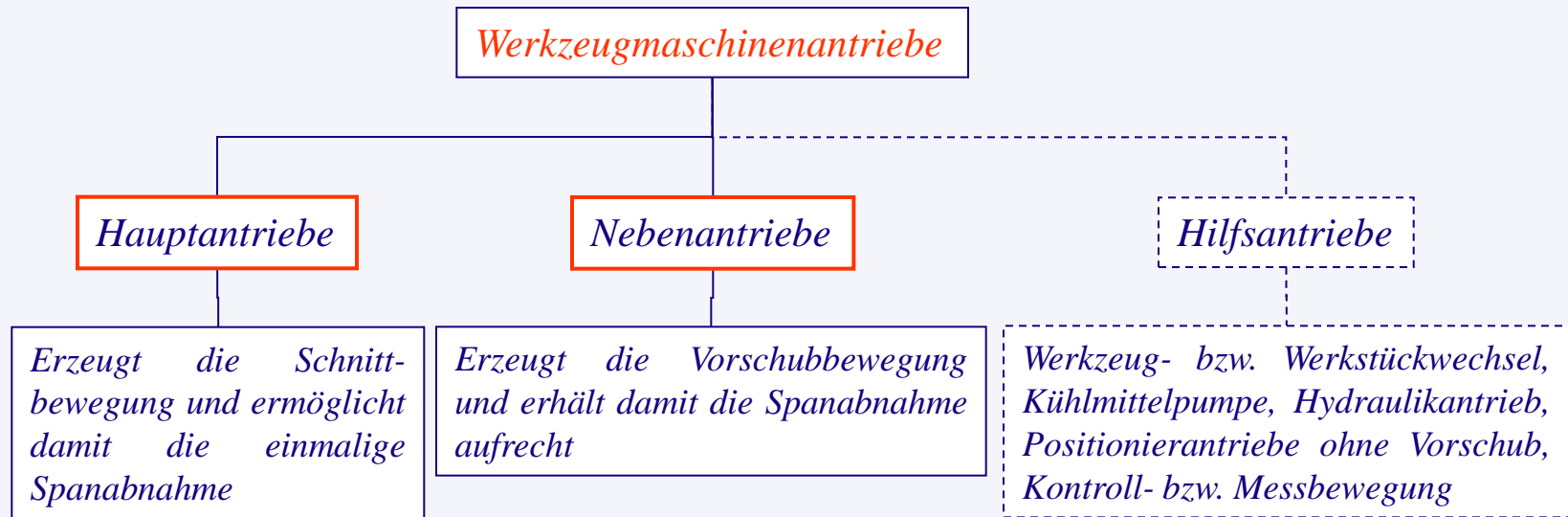
Mit Abnahme des Lagerspiels bzw. mit Zunahme der Lagervorspannung erhöht sich die Lagersteifigkeit K_L . Das günstigste dynamische Verhalten liegt im Bereich des spielfreien Zustands des Lagers ($S_R=0$), da die Systemdämpfung den maximalen und die Resonanzamplitude den minimalen Wert erreichen.

Quelle: Perović, WZM

Antriebe



Antriebe



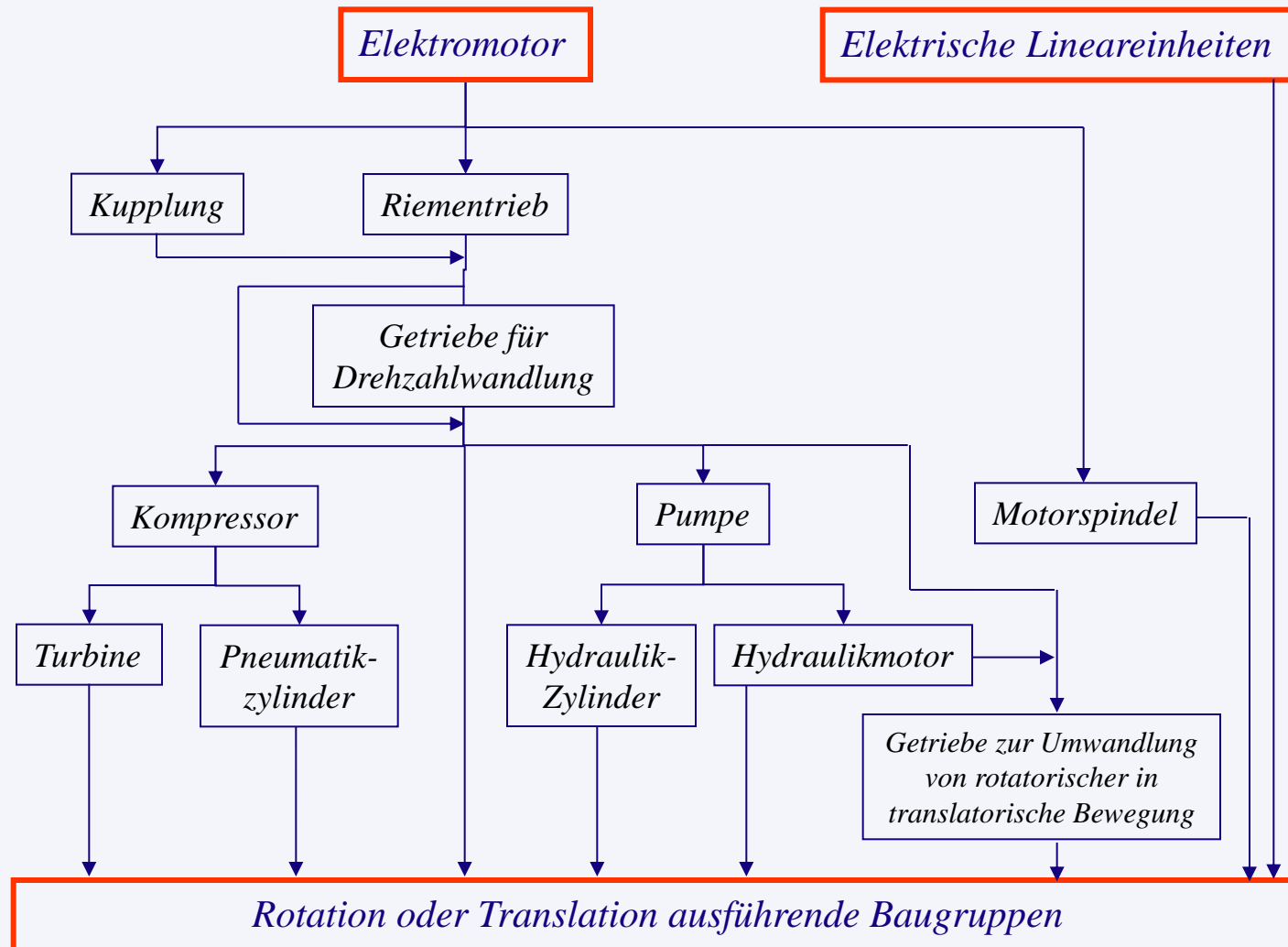
➔ Der Haupt- und Nebenantrieb sind die produktivitätsbestimmenden Baugruppen einer Werkzeugmaschine. Bei der Maschinenanwendung bzw. Maschinenentwicklung müssen deren Eigenschaften gut mit den fertigungstechnischen Ansprüchen abgestimmt werden.

Antriebe

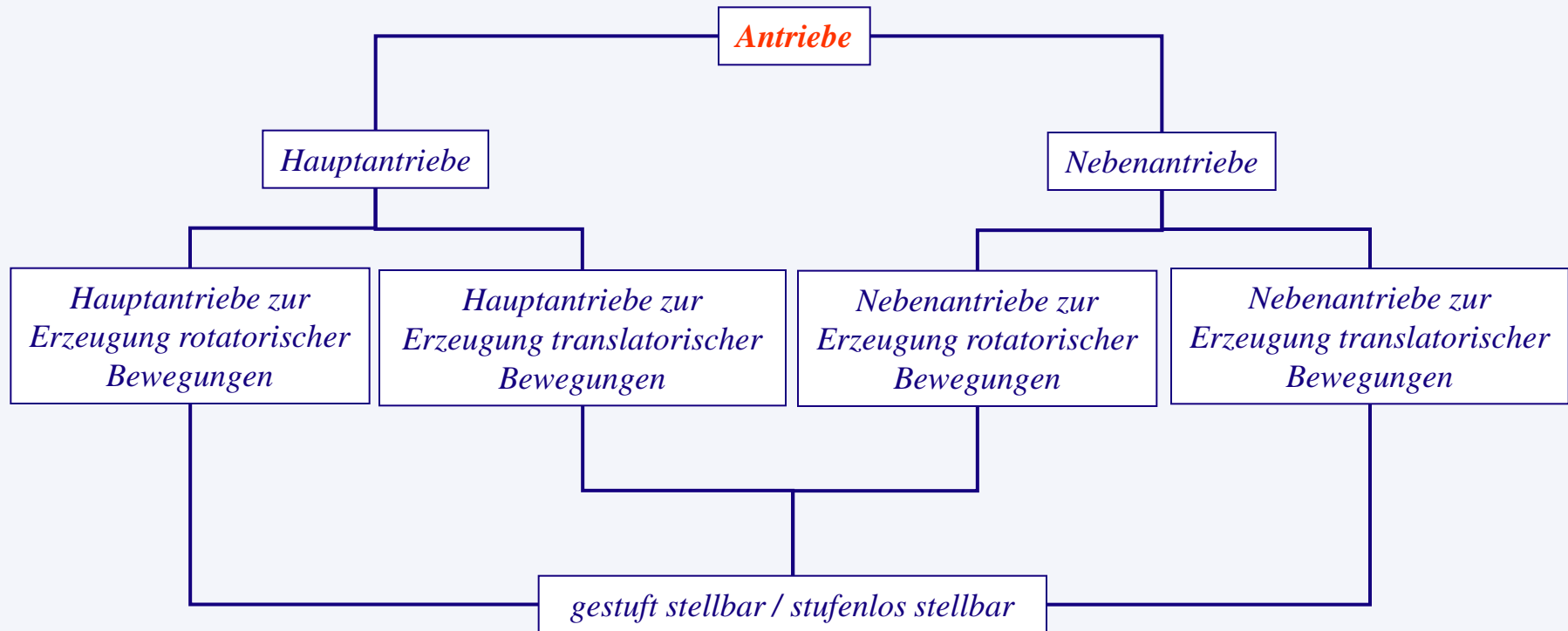
Anforderungen an Haupt- und Nebenantriebe:

- *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
 n_1 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

n_1 [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.

$$\begin{array}{l}
 n_1 \\
 n_2 = n_1 \cdot \varphi \\
 n_3 = n_2 \cdot \varphi = n_1 \cdot \varphi^2 \\
 \dots
 \end{array}
 \xrightarrow{\text{allgemein}}
 \begin{array}{l}
 n_z = n_{(z-1)} \cdot \varphi = n_1 \cdot \varphi^{(z-1)} \\
 \boxed{n_z = n_1 \cdot \varphi^{(z-1)}}
 \end{array}$$

Berechnung des Stufensprungs φ

$$\varphi = \sqrt[z-1]{\frac{n_z}{n_1}}$$

φ Stufensprung
 $n_z [\text{min}^{-1}]$ größte Drehzahl
 $n_1 [\text{min}^{-1}]$ kleinste Drehzahl
 z Anzahl der Drehzahlstufen

Drehzahlabfall p

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

$P [\%]$ Drehzahlabfall
 φ Stufensprung

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

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

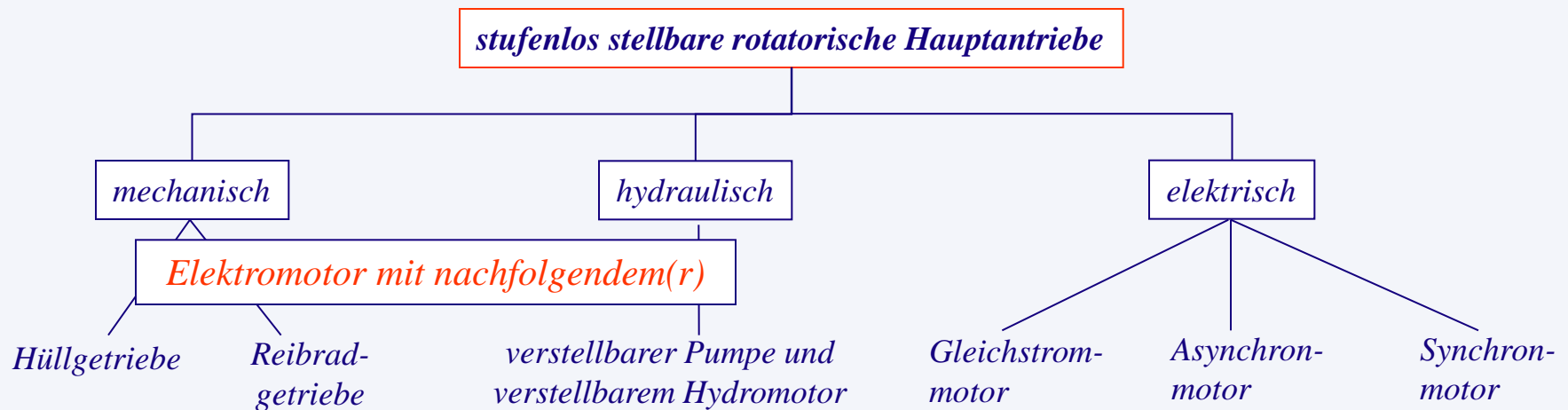
Drehzahlabfall p

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

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

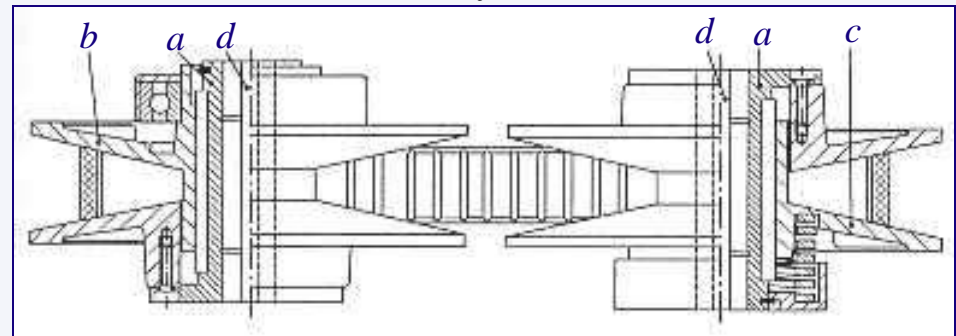
Durch axiales Verschieben der kegelförmig gestalteten Riemenscheibenhälften wird der wirksame Durchmesser einer Scheibe vergrößert bzw. verkleinert, während der andere verkleinert bzw. vergrößert wird.

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

a Hauptnabe
 b, c verschiebbare Scheibenhälften
 d Passfedernut



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

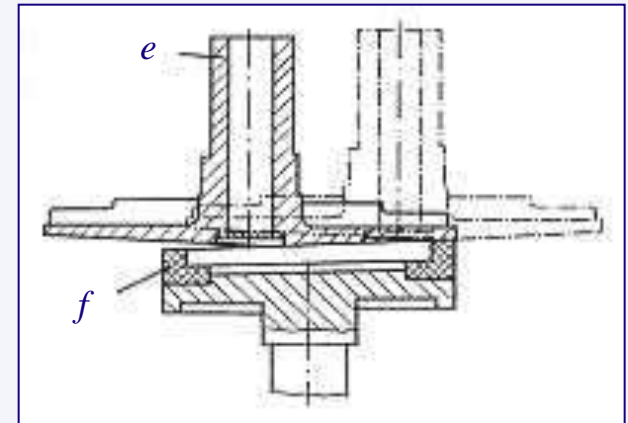
Mechanisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

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 Reibring der Abtriebscheibe aus
verschleißarmen Material*

Quelle: Hirsch, WZM

Stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

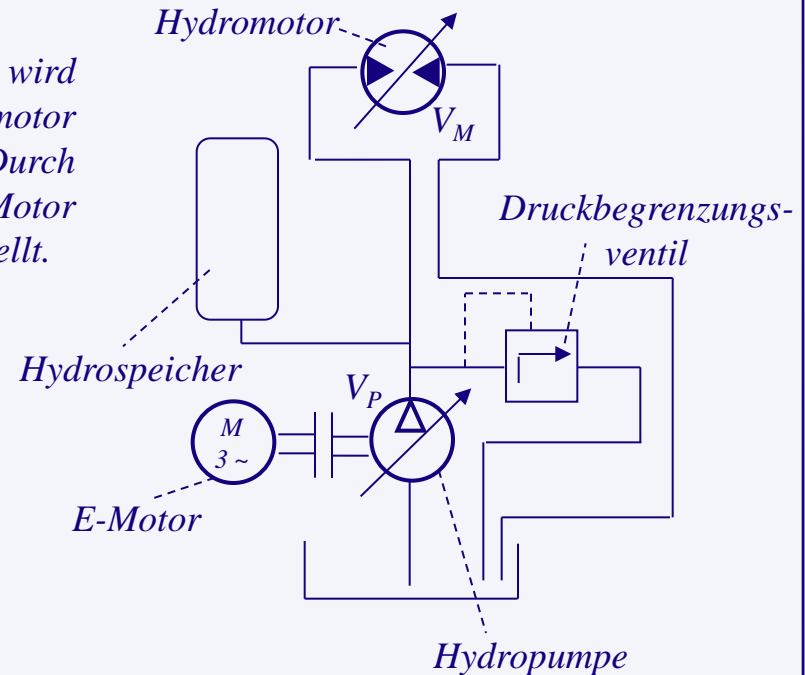
➔ hydraulisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

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:

$$S_{nn} = S_{F\ddot{o}rder, Pumpe} \cdot S_{Schluck, Motor}$$



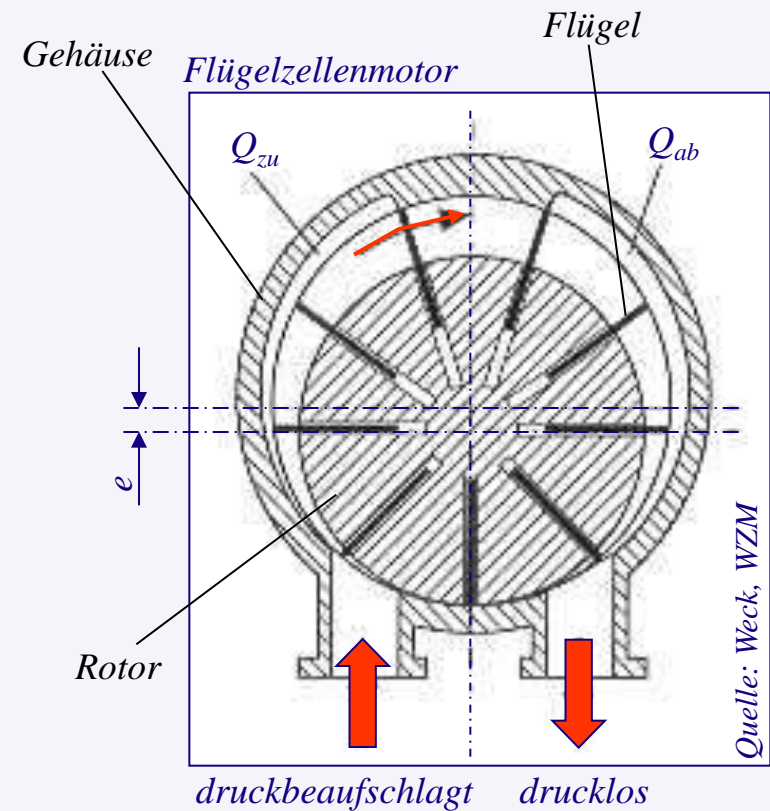
Quelle: Weck, WZM

Hydraulisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Beispiel: Flügelzellenmotor (Hydromotor)

Funktionsprinzip:

Die Flügel, die radial in den Schlitzen 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.



Quelle: Weck, WZM

Stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

Elektrisch stufenlos stellbare Antriebe haben sich als Hauptantriebe im Bereich spanende 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*

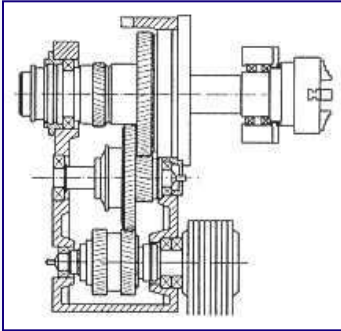
Der Asynchronmotor bietet folgende Vorteile gegenüber dem Gleichstrommotor:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| <i>• sehr großer Drehzahlbereich, z.B. Drehzahl $(0,0001 \text{ bis } 9000) \text{ min}^{-1}$</i> | <i>• Netzurückspeisung</i> |
| <i>• sehr großer Bereich konstanter Leistung</i> | <i>• wartungs- und verschleißfrei</i> |
| <i>• ausgezeichnete Dynamik und Rundlaufgenauigkeit</i> | <i>• preiswert</i> |
| <i>• extreme Überlastbarkeit bei allen Motordrehzahlen</i> | |

Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

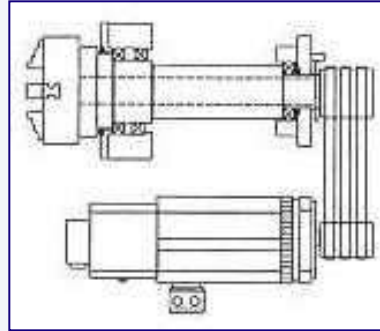
Folgende Aufbauprinzipien haben sich für Hauptantriebe durchgesetzt:

Variante 1



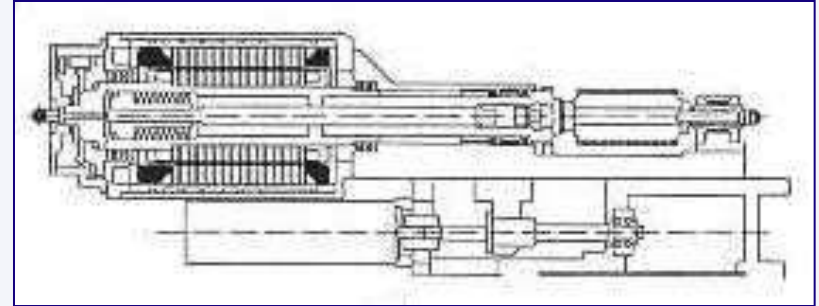
mit Schaltgetriebe

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)

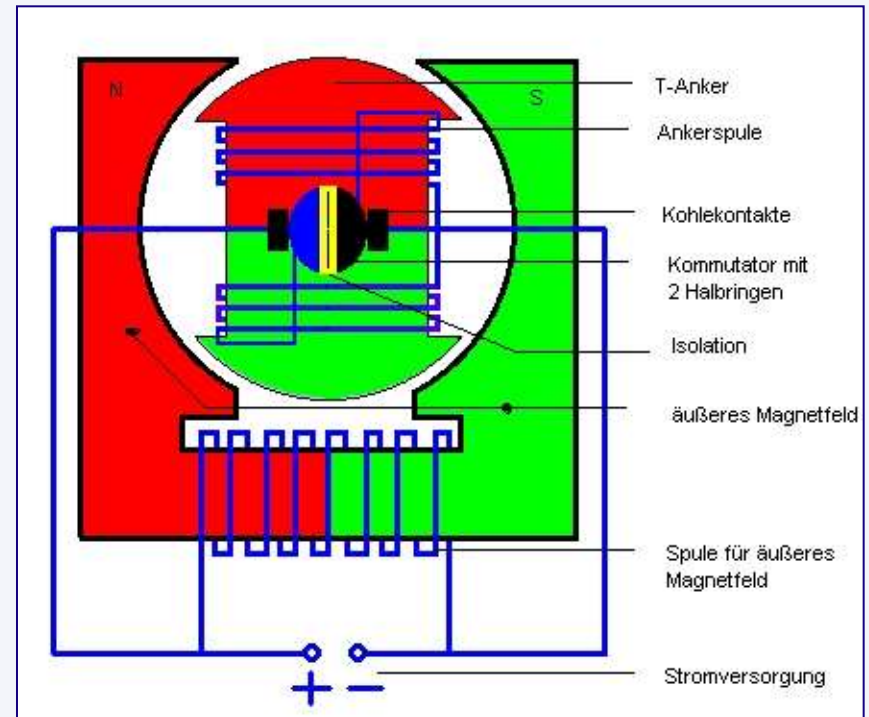
Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

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 Drehzeleinstellungen 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

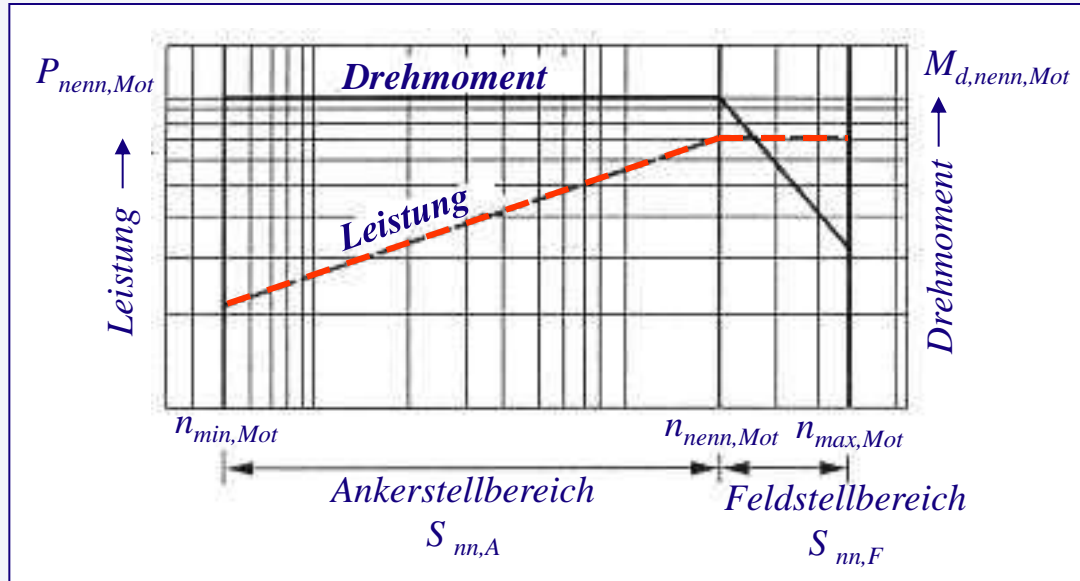
Feldstellbereich $s_{nn,F}$:

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

- 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

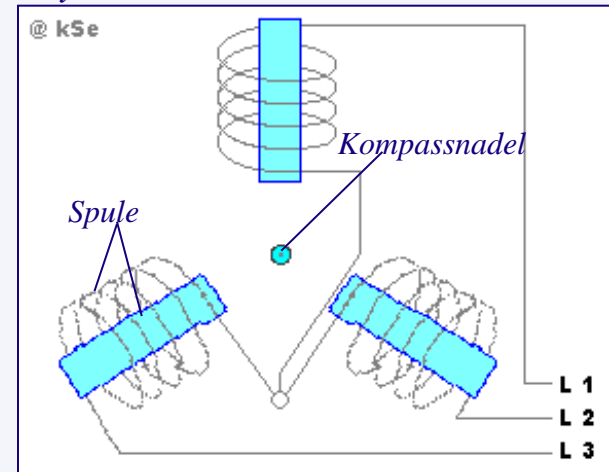
Der Schlupf s wird in Prozent, bezogen auf die Drehfelddrehzahl, angegeben.

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

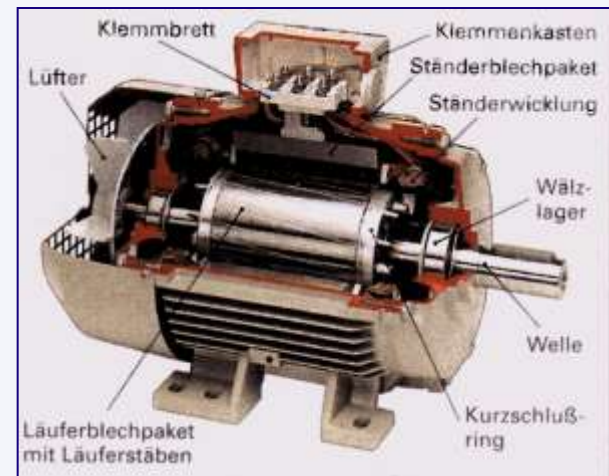
s Schlupf
 bei großen Motoren $s \approx 5 \%$

Die Drehzahlstellung erfolgt durch Veränderung der Netzfrequenz (Netzfrequenzwandler).

Asynchronmotor



Quelle: www.mechatronik-neuwied.de



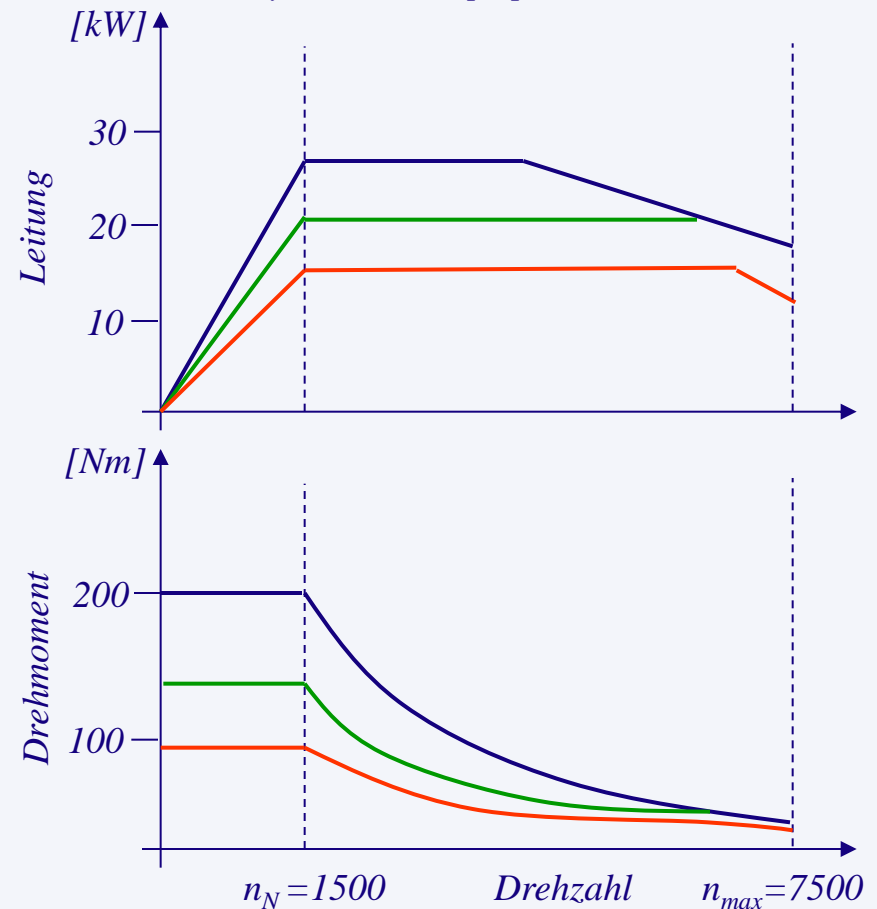
Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe: Asynchronmotor

- *prinzipielles Verhalten ähnelt dem des Gleichstrom-motors*
- *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

Drehmomenten-Leistungsverhalten eines Asynchron-Hauptspindelmotors



Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe: Asynchronmotor

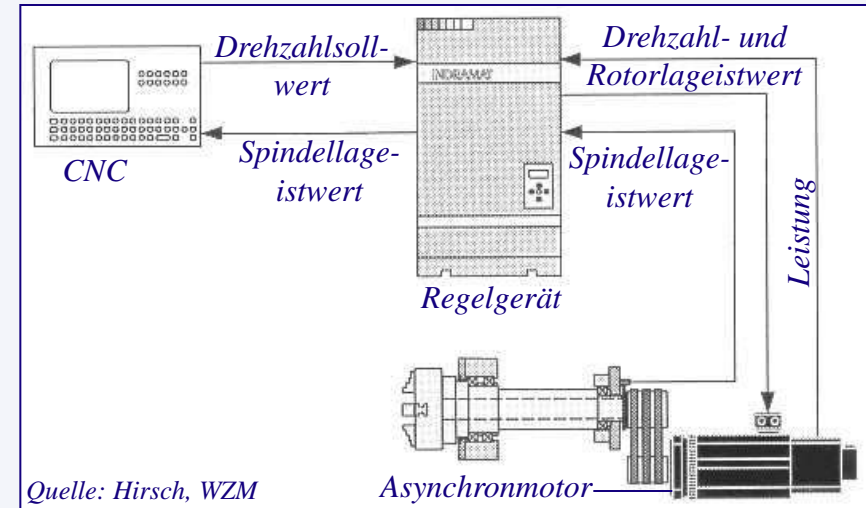
Mit einer entsprechenden Steuerungstechnik sind folgende Eigenschaften erreichbar:

- 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 Netzzüruckspeisung

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

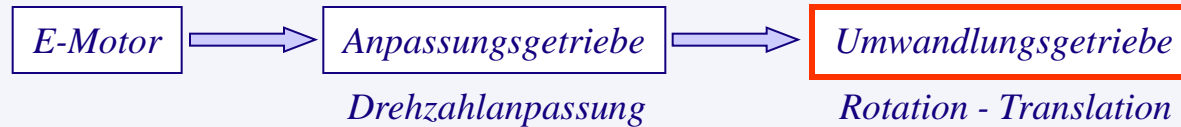


Hauptantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

<i>Einsatzbereich:</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Hobeln ● Stoßen ● Ziehen ● Räumen
<i>Ausführungsformen:</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● mechanisch ● hydraulisch \Longrightarrow translatorische Bewegung durch: <ul style="list-style-type: none"> • Hydraulikzylinder • Hydromotor mit Umwandlungsgetriebe <p><u>Profil:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • hohe Kräfte bei geringem Platzbedarf • Geschwindigkeit und Kräfte sind unabhängig vom Weg einstellbar • hohe Anschaffungs- und Betriebskosten <ul style="list-style-type: none"> ● pneumatisch (keine Anwendung wegen Kompressibilität der Luft)
<i>Anforderungen:</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● 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:

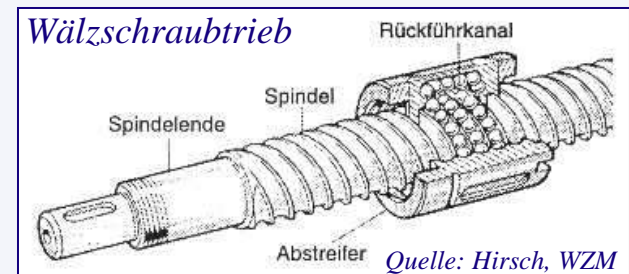
- *Schraubengetriebe (m – Modul, g – Gangzahl)*
 - *Wälzschraubgetriebe mit Gewindesteigung h_{Gew}*
 - *Trapez- oder Flachgewindespindel/Mutter-System mit Gewindesteigung h_{Gew}*
 - *Schnecken/Zahnstangen-System mit Schneckensteigung $h_{Sch} = \pi \cdot m \cdot g$*
 - *Schnecke/Schneckenstangen-System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

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 Spielausgleich und Verschleiß*



Elektromechanische translatorische Hauptantriebe

● Zahnstangengetriebe

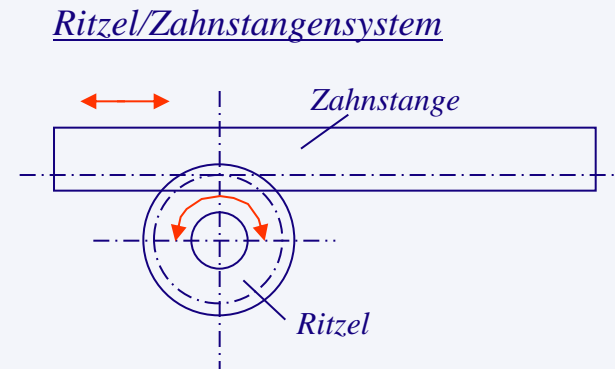
- Ritzel/Zahnstangen-System (z.B. Hobelmaschine)

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



Elektromechanische translatorische Hauptantriebe

● Kurbelgetriebe

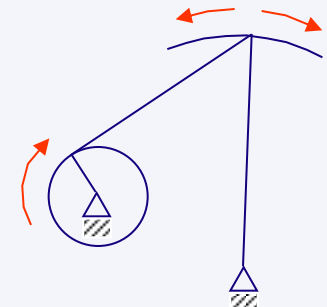
- Schubkurbel
- schwingende Kurbelschleife
- Kurbelschwinge

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

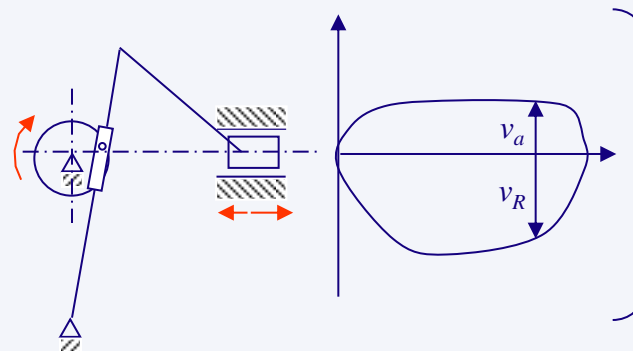
Schubkurbel



Kurbelschwinge

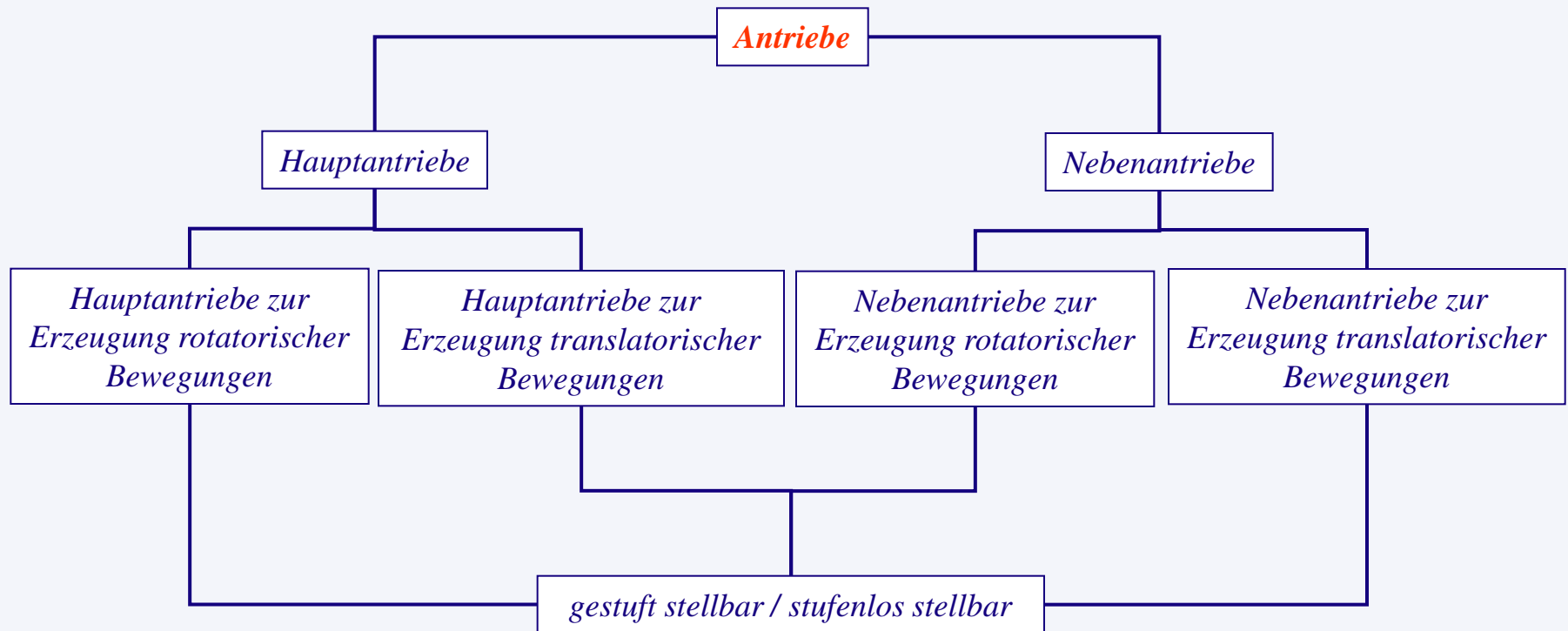


schwingende Kurbelschleife



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

Antriebe: Übersicht



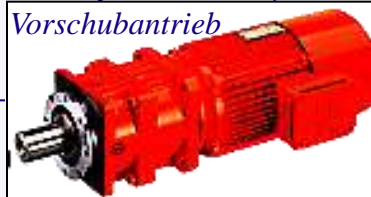
Nebenantriebe (Vorschubantrieb)

*feinfühligke Einstellung
der Bewegung*

große Stellbereiche

*hohe geometrische und
kinematische Genauigkeit*

Vorschubantrieb



*ruckfreier Geschwindigkeitsverlauf
(auch bei Schleichgang)*

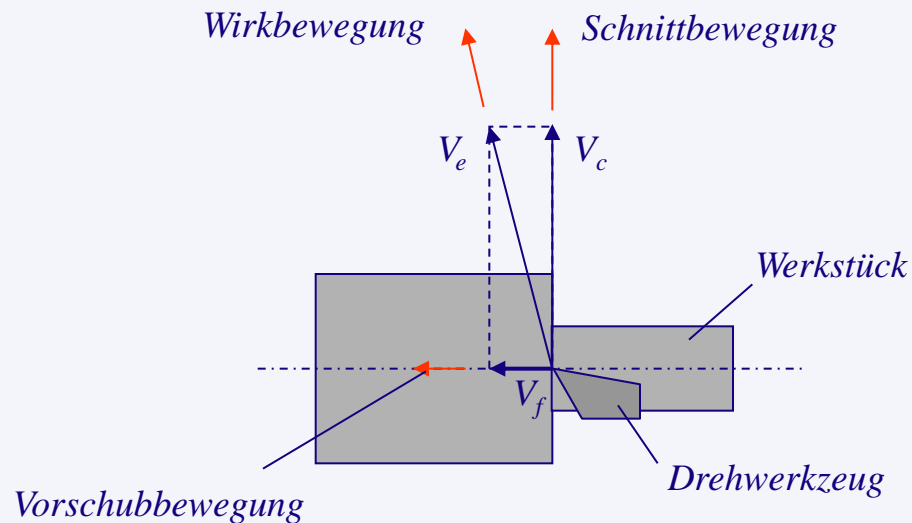
*hohe statische und
dynamische
Antriebssteifigkeit*

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

Nebenantriebe (Vorschubantrieb)

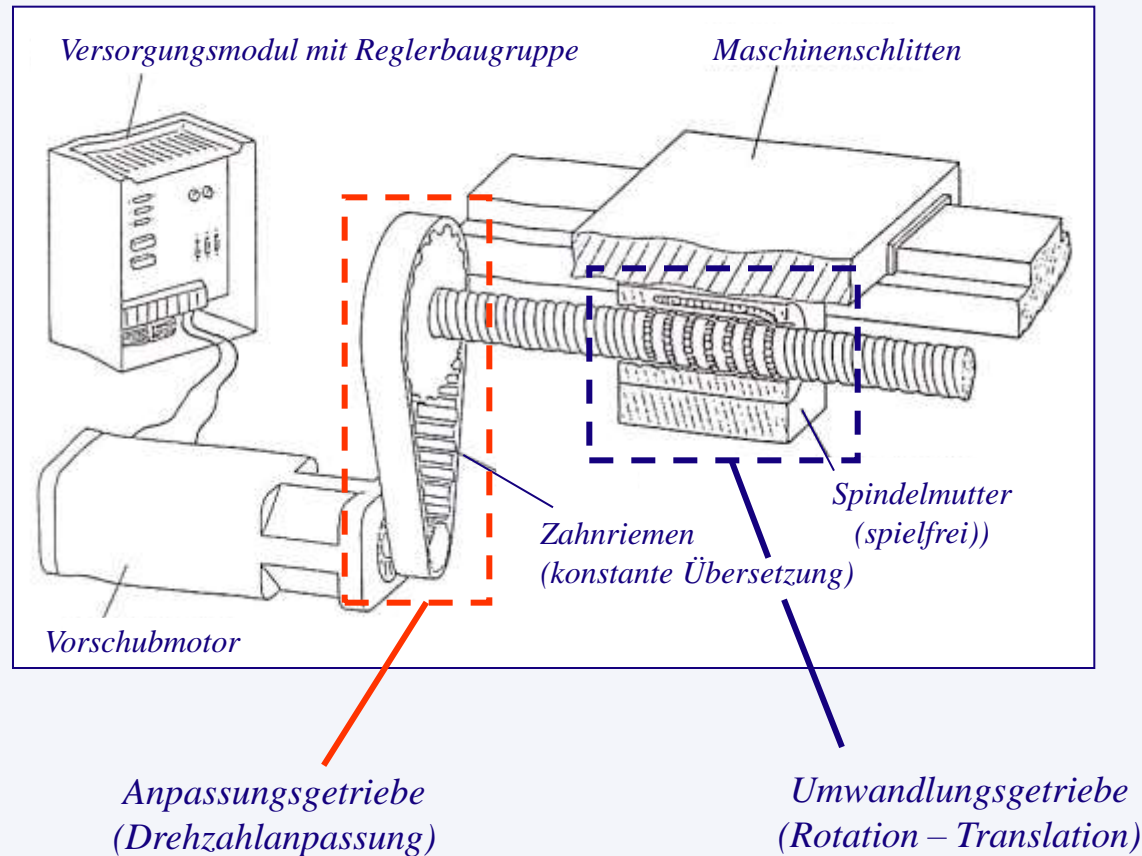
Definition der Vorschubbewegung nach *DIN 6580*

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)

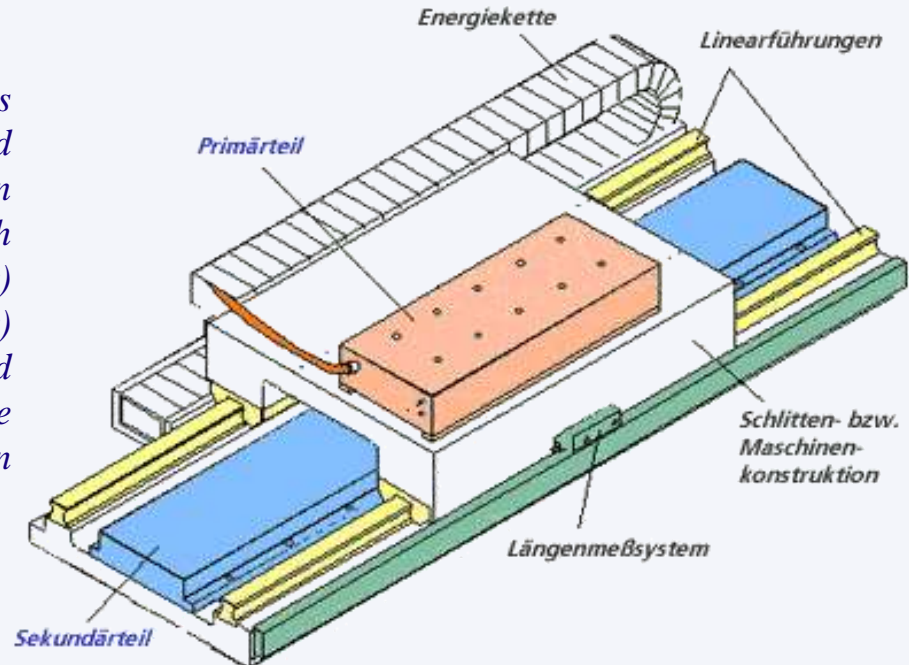


Quelle: FHD

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)

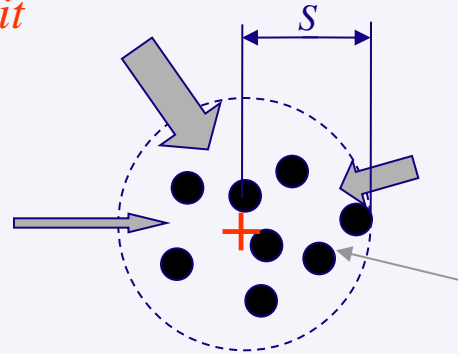
- kein Anpassungsgetriebe
- kein Umwandlungsgetriebe
- hohe Beschleunigungswerte (bis 450 m/s^2)
- sehr hohe Verfahrgeschwindigkeiten (bis 300 m/s)
- hohe Positioniergenauigkeit

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

Quelle: Rexroth

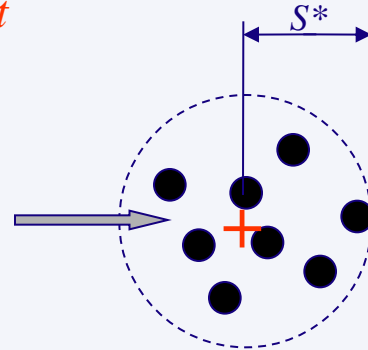
Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

Positioniergenauigkeit



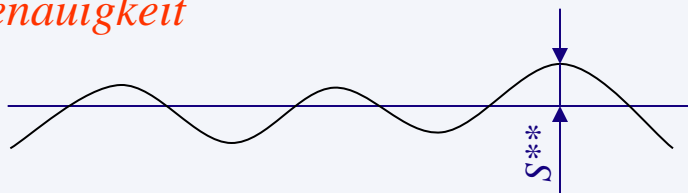
S ist die größte Abweichung der Ist-Position vom programmierten Sollwert bei unterschiedlichen Anfahrtrichtungen und Geschwindigkeiten.

Wiederholgenauigkeit



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

Bahngenauigkeit

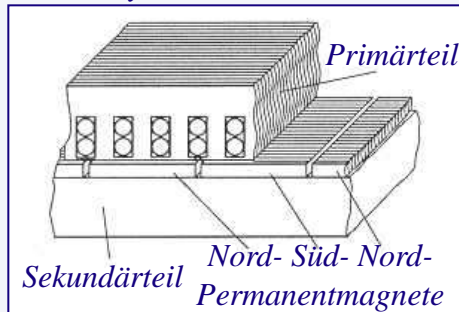


S^{**} ist die größte Abweichung der tatsächlichen Bahn von der programmierten Bahn

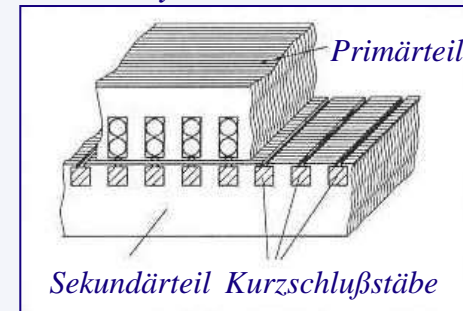
Quelle: FHD

Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen: Vergleich

Synchronmotor



Asynchronmotor



Aufbau

Kraft

Kraft-Masse-Verhältnis 50-100% höher im Vergleich zum Asynchronmotor

mehr Strom/Kraft benötigt wegen zusätzlicher Magnetisierung

Erwärmung

geringe Erwärmung des Sekundärteils

Erwärmung des Sekundärteils durch Magnetisierungsstrom

Messsystem

absolute Pollage wird beim Einschalten benötigt

inkrementelles Messsystem ausreichend

Anziehungskräfte

Anziehungskräfte sind permanent vorhanden

Anziehungskräfte nur während des Betriebs

Regelung

einfachere Regelstrukturen, kürzere Abtastintervalle im Vergleich zum Asynchronmotor

aufwendige Regelung (Feldorientierung mit Flussmodell des Motors)

Störeffekte

positionsabhängige Kraftwelligkeit, einfach zu kompensieren

lastabhängige Kraftwelligkeit, reduzierte Kräfte bei höheren Geschwindigkeiten

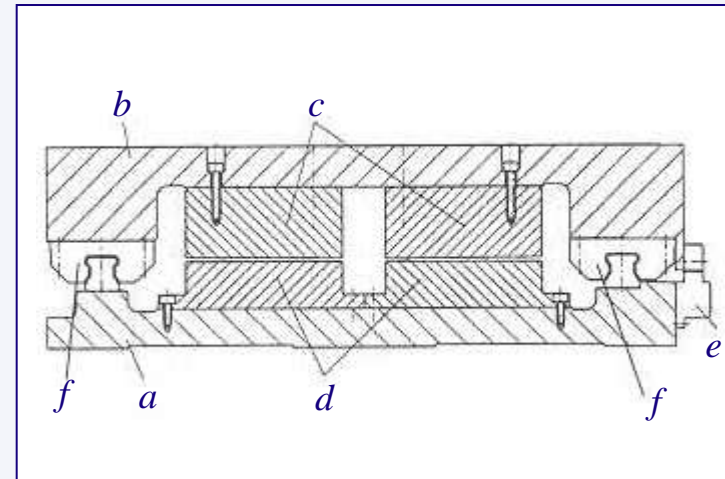
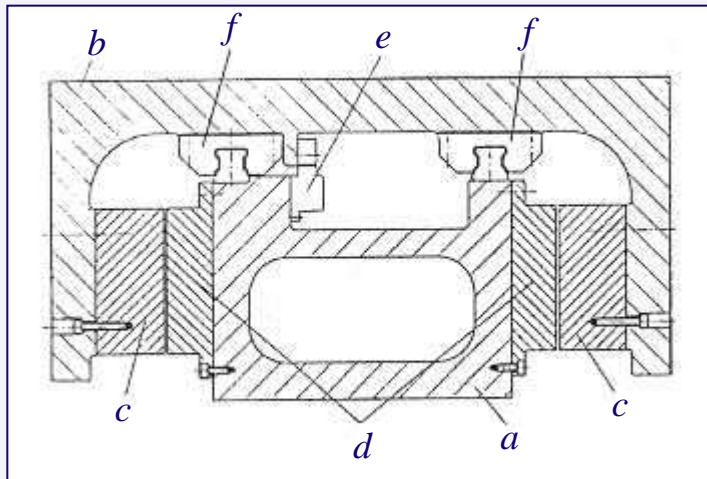
Kosten

teure Magneten im Sekundärteil; im Vergleich zum Asynchronmotor kleinere Motor- und Umrichterbaugröße

billigeres Sekundärteil ergibt Preisvorteil bei langen Verfahrwegen

Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen


Beispiele: konstruktive Gestaltung von Linearachsen mit Linearmotor



- | | |
|------------------|-------------------|
| a) Maschinenbett | d) Sekundärteil |
| b) Schlitten | e) Messsystem |
| c) Primärteil | 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:

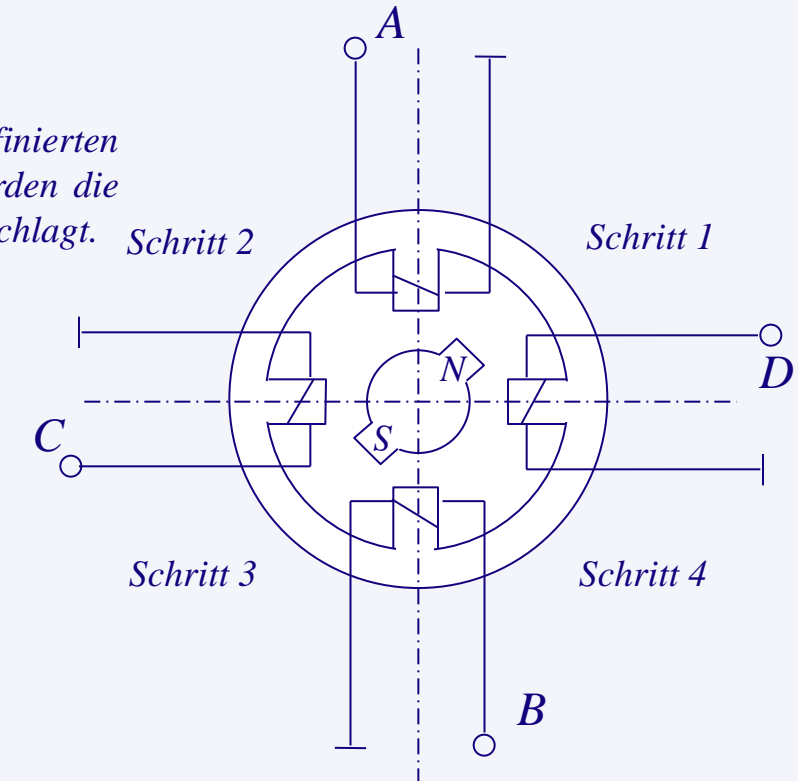
Die Drehung der Motorwelle setzt sich aus genau definierten Winkelschritten zusammen. Zur Drehung der Motorwelle werden die Wicklungen in festgelegter Reihenfolge mit Gleichstrom beaufschlagt.

Winkelansteuerung eines einfachen Schrittmotors

	Spannung an den Wicklungen			
Rotorstellung auf Schritt	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

Quelle: Perović, WZM

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 Spannungsversorgung 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 Störfall
- umfassende Diagnose
- einfacher Datenaustausch im Störfall

Asynchronmotor



Profil:

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

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

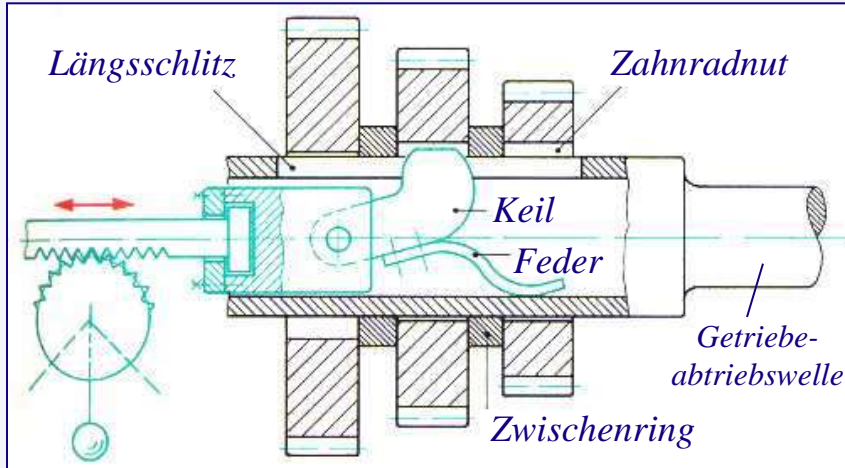
Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren

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-, Määnder-, Norton- und Ziehkeilgetriebe)*
 - *Einsatz nur noch dort, wo sie gegenüber stufenlos stellaren 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)



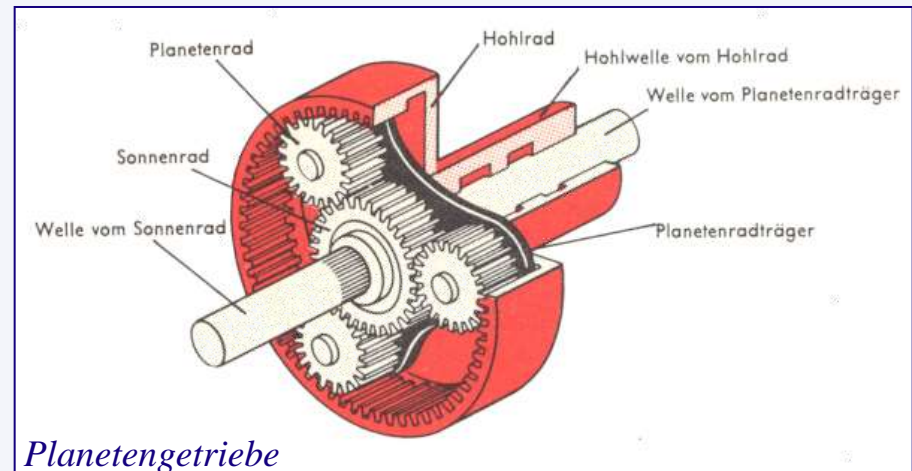
Funktionsprinzip: Ziehkeilgetriebe

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.

Ziehkeilgetriebe (Quelle: Witte, WZM)

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:

Einspannteil (Schaft),

*dient zur Verbindung
des Werkzeugs mit
dem Werkzeugträger.*

3.



Einstechdrehmeißel (Quelle: Dümmel GmbH)

2.

Werkzeugkörper,

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

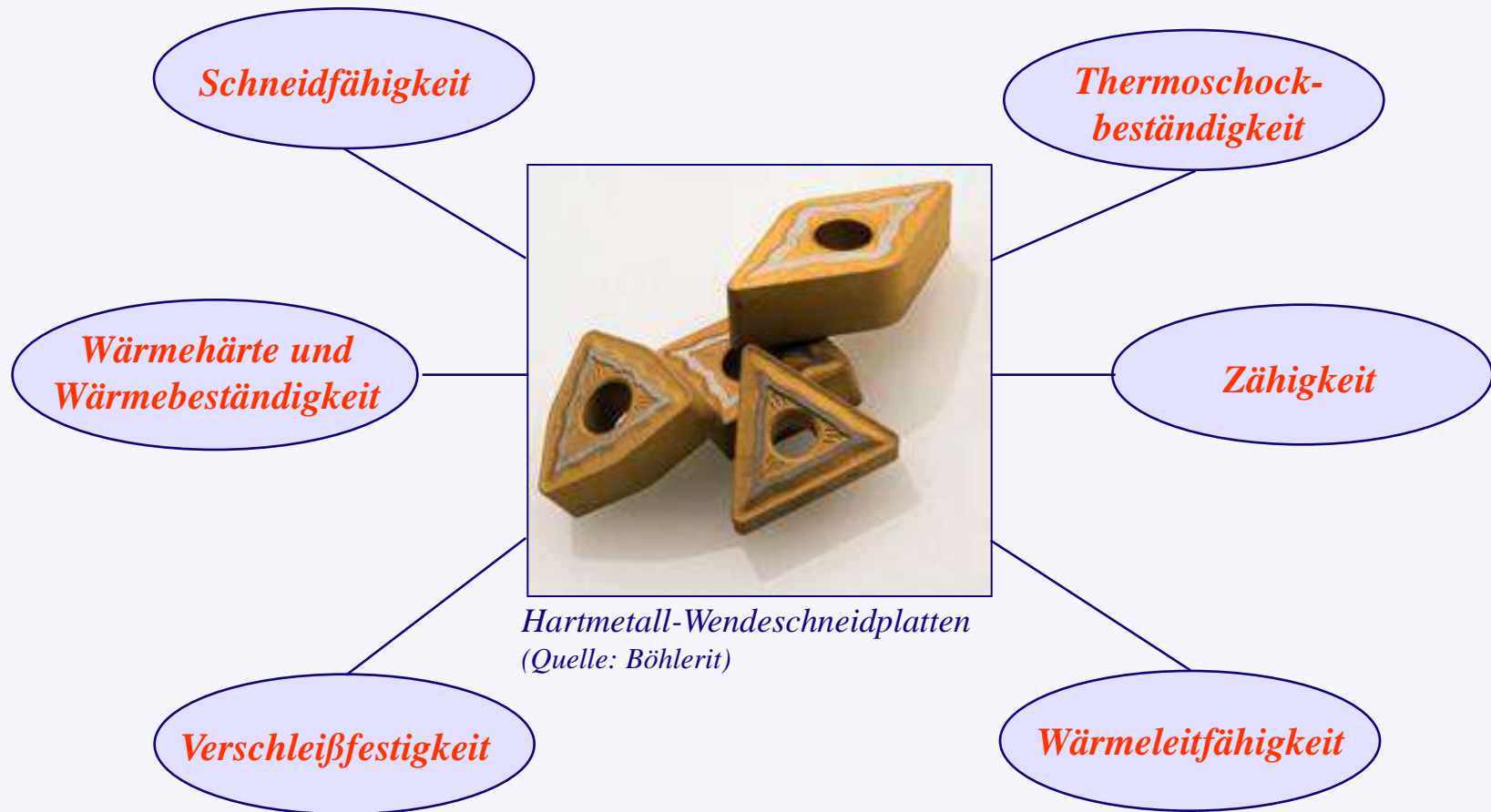
1.

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 Zerspantechnik

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

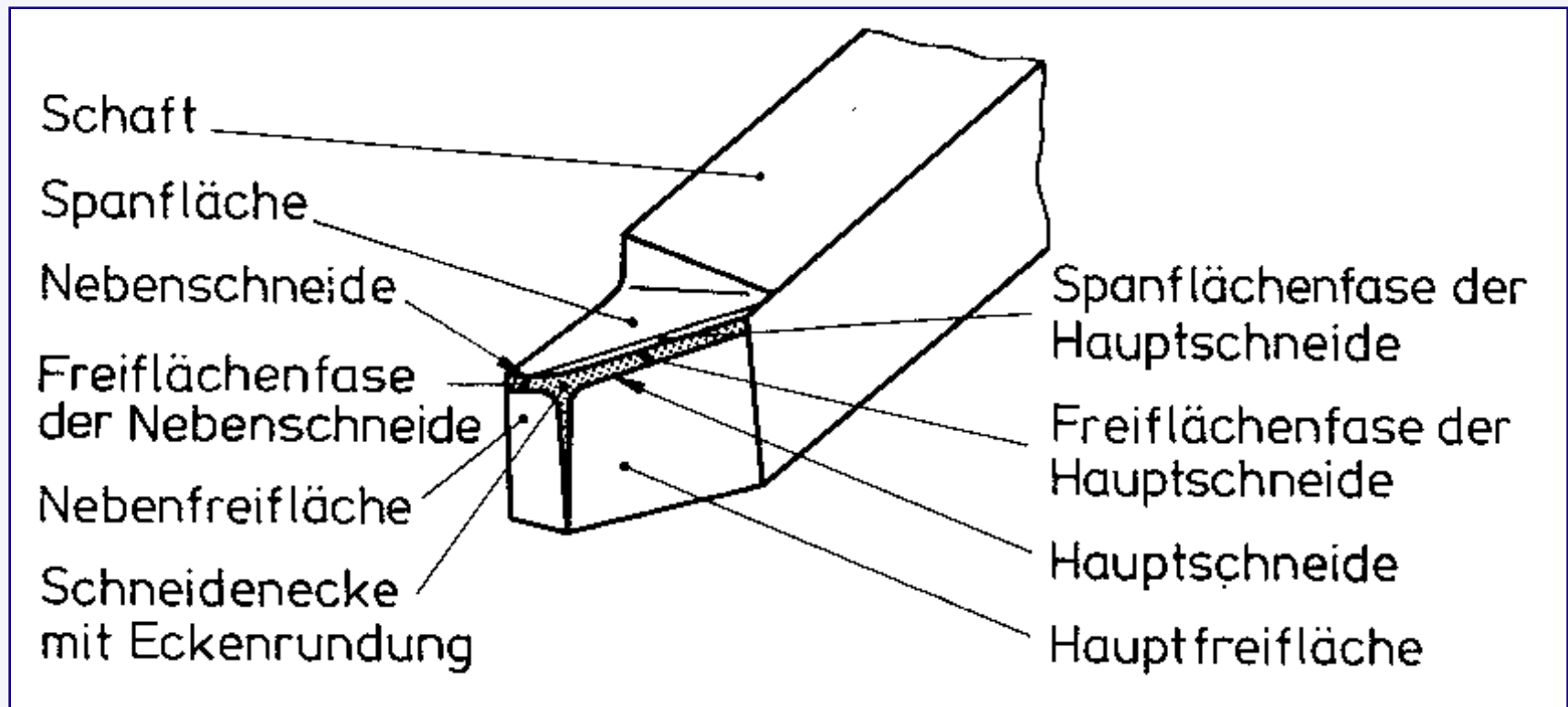
So ist z.B. die Kenntnis über auftretende Zerspanungskräfte und deren Größe wichtig für

- *die Bemessung der Bauteile der Werkzeugmaschine,*
- *die Bemessung von Vorrichtung- 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 Zerspantechnik werden am Beispiel eines Drehvorganges vorgestellt!

Grundbegriffe der Zerspantechnik: Drehmeißel (Beispiel)

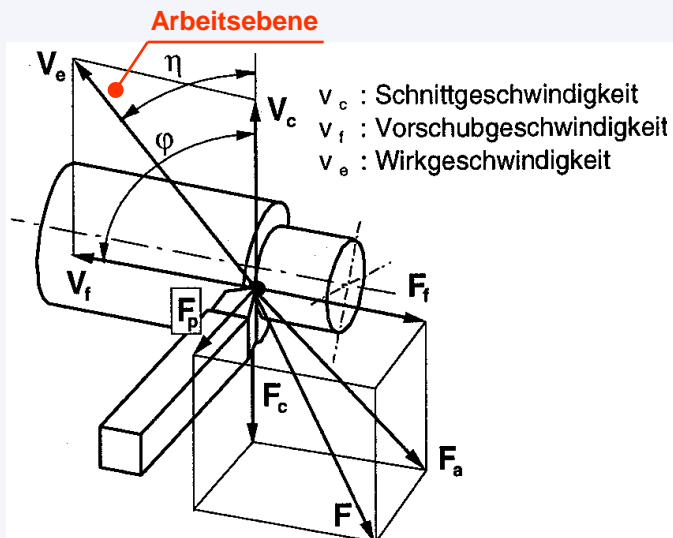
nach DIN 6581:



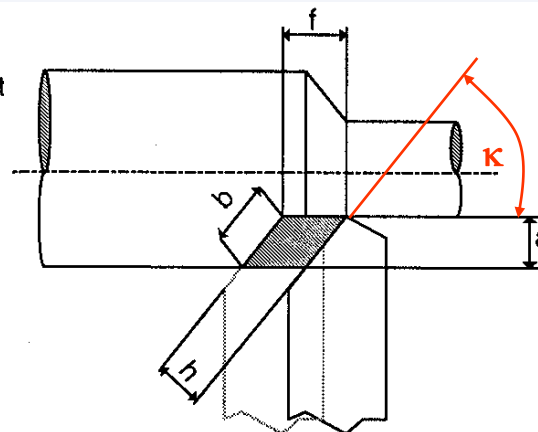
Quelle: Fritz /Schulze: Fertigungstechnik, VDI-Verlag

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
 F_f : Vorschubkraft
 F_a : Aktivkraft
 F_p : Passivkraft
 F : Zerspankraft
 ϕ : Vorschubrichtungswinkel
 η : Wirkrichtungswinkel



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

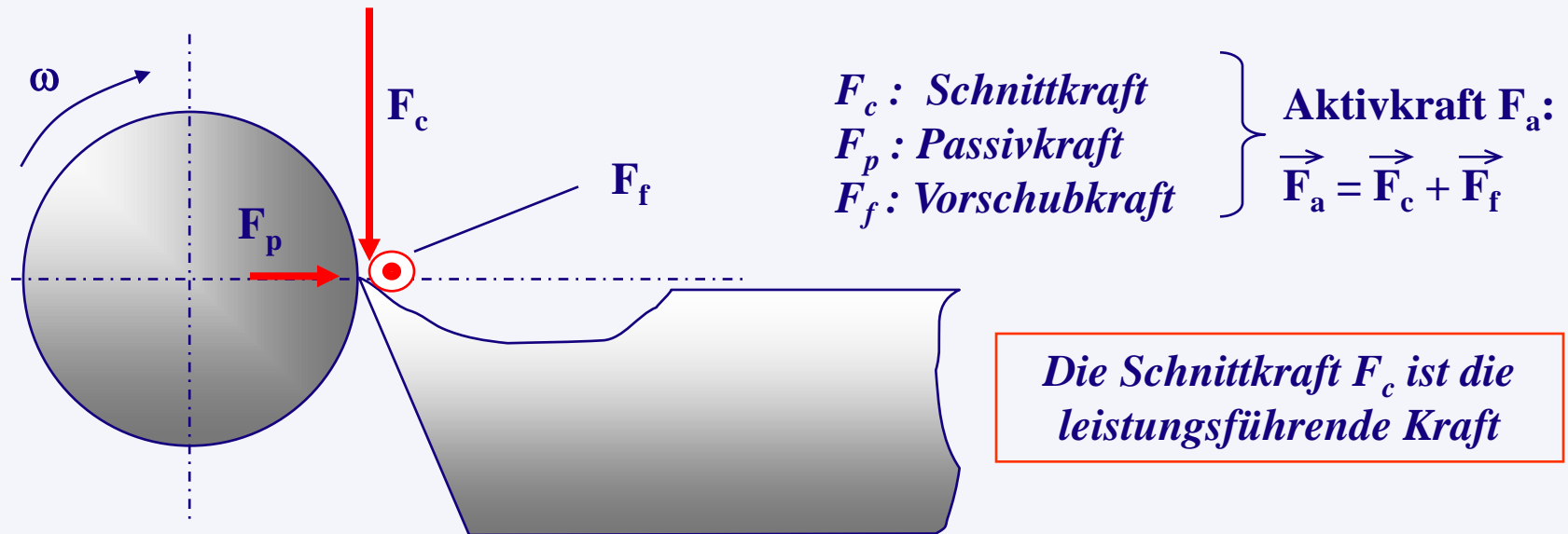
$$F_c = b \cdot h \cdot k_c = a \cdot f \cdot k_c$$

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

$$h = f \cdot \sin \kappa$$

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

Grundbegriffe der Zerspantechnik: Kräfte am Drehmeißel



Einflußgrößen der Schnittkraft F_c :

- Werkstoff des Werkstücks
- Vorschub (Spanungsdicke)
- Schnittiefe (Spanungsbreite)
- Spanungsverhältnis a / f
- Spanwinkel
- Werkzeugverschleiß
- Schnittgeschwindigkeit
- Schneidstoff
- Kühlung / Schmierung
- Einstellwinkel

Haupteinflußfaktoren

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

Das Diagramm zeigt ein Werkstück, das von einem Werkzeug bearbeitet wird. Die Spannungsverteilung ist durch Kurven mit Werten wie 10°, 50°, 200°, 500°, 600°, 650°, 700°, 720°, 500°, 450°, 400° dargestellt. Die Kräfte Q_{Wst} , Q_{Sp} , Q_{Wz} und Q_{Umwelt} sind eingezeichnet. Die Winkel ϕ und ψ sind ebenfalls markiert.

- 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 Abfließen des Spans
- auf der Werkstückschnittfläche beim Entlanggleiten an der Freifläche

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 aufgetragenen 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 Titannitrid), 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 Verschleißigenschaften 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 Anschnitttechniken 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:

- | | |
|---|--|
| • <i>Druckfestigkeit</i> | • <i>hohe Oxidationsbeständigkeit</i> |
| • <i>hohe chemische Beständigkeit</i> | • <i>geringe Wärmeleitfähigkeit</i> |
| • <i>hohe Schmelztemperatur</i> | • <i>geringe Biegebruchfestigkeit</i> |
| • <i>geringe Dichte bei hoher Härte und Druckfestigkeit</i> | • <i>höherer Wärmeausdehnungskoeffizient</i> |
| • <i>geringe Diffusionsneigung</i> | • <i>(Thermoschockempfindlichkeit)</i> |

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 Schnitttemperaturen 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 Schruppbearbeitung.

- *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 Zerspaltung von siliziumhaltigen Aluminiumlegierung in der Automobilindustrie gemacht.(Fein- und Schruppbearbeitung)

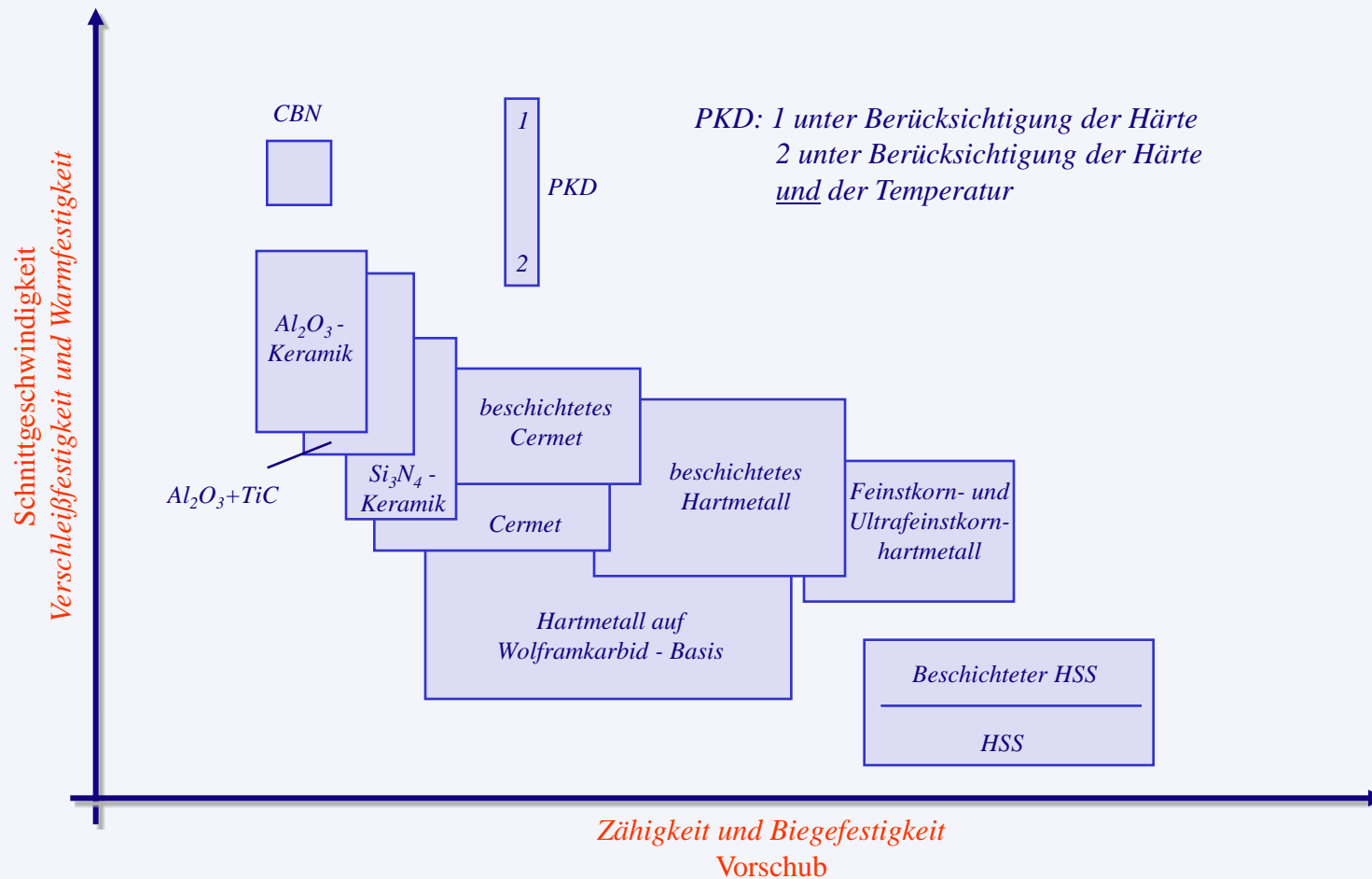
- *kubisch-kristallines Bornitrid (CBN)*

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

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

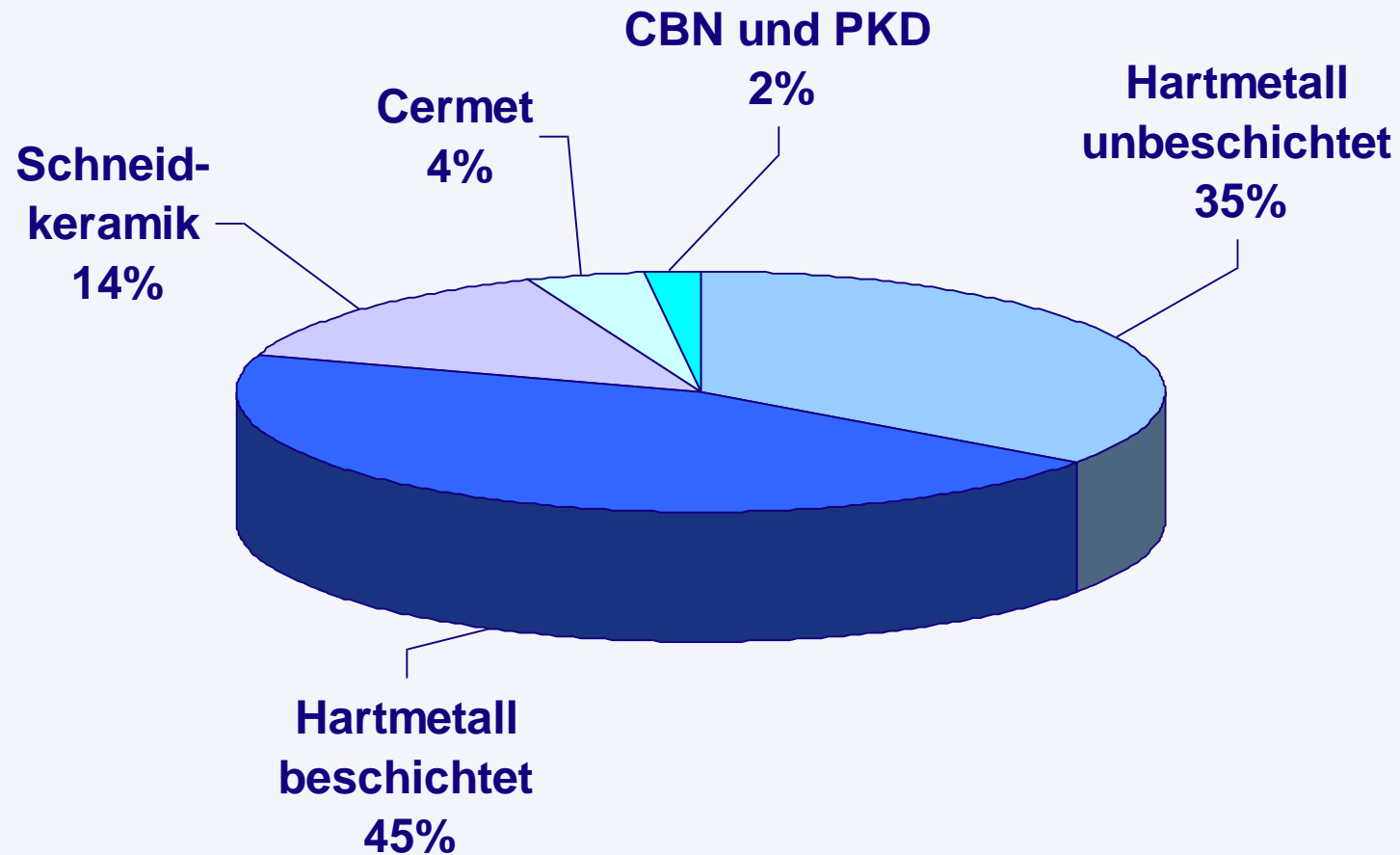
- Anwendung: CBN eignet sich vor allem bei der Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffe (z.B.gehärtete Stähle, Hartguß). Bei der Zerspaltung von gehärtetem Stahl werden Schnittgeschwindigkeiten von 120 m/min, bei Grauguß bis 800 m/min erreicht.

Einteilung der Schneidstoffe



Quelle: König

Verwendung von Schneidstoffen bei einem Automobilhersteller



Quelle: Koether, Fertigungstechnik

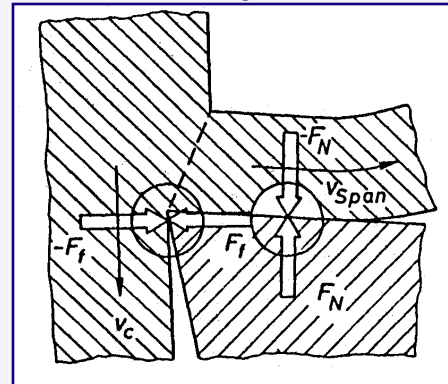
Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels

➔ Reibungverschleiß

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

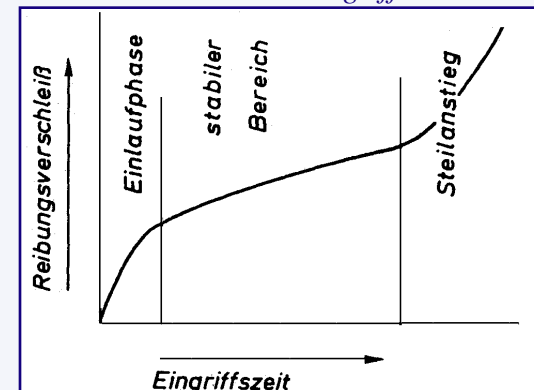
- Die ungünstige Berührung entsteht an zwei Stellen:
 1. auf der Spanfläche, wo der Span unter der Normalkraft F_N abläuft
 2. an den Freiflächen unterhalb der Schneidkante, hier wirken Vorschubkraft F_f , Passivkraft F_p und Werkstückgeschwindigkeit v_c zusammen
- Verschleißfördernd wirkt die erhöhte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

Stellen mit Reibung an der Schneide



F_f Vorschubkraft
 F_N Normalkraft
 v_c Schnittgeschwindigkeit
 v_{Span} Spangeschwindigkeit

Zunahme des Reibungverschleißes mit der Zeitdauer des Eingriffs

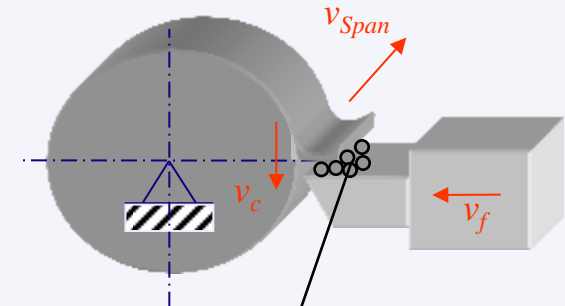


Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels

➔ 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

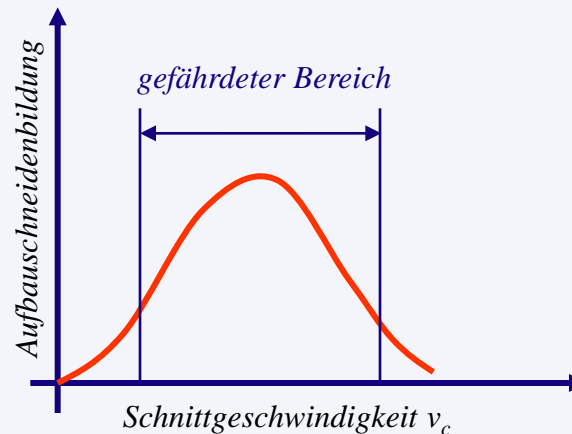
Die verschlissene Schneidenoberfläche ist rauh aber ohne Riefen!

- 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, Zerspantechnik

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:

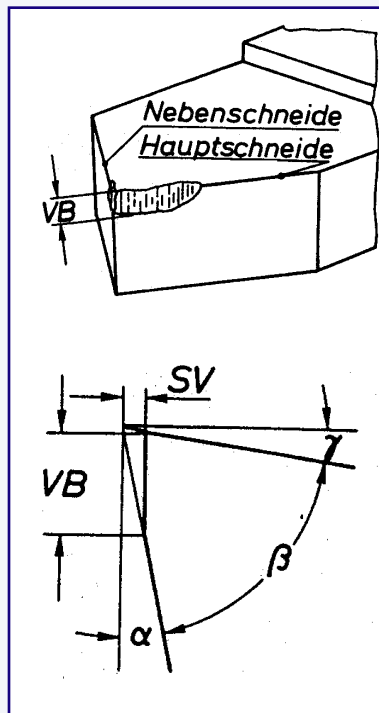
- Kobalt-Diffusion: Kobalt wandert aus der Schneidenoberfläche in den Stahl, dadurch werden die Karbide im Hartmetall freigelegt und der Reibung des Spanes ausgesetzt.*
- Bei kleineren Spangeschwindigkeiten kann der Werkstoff Stahl derart auf die Karbide einwirken, dass diese sich auflösen und vom Span 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

Quelle: Pauksch, Zerspantechnik

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“.

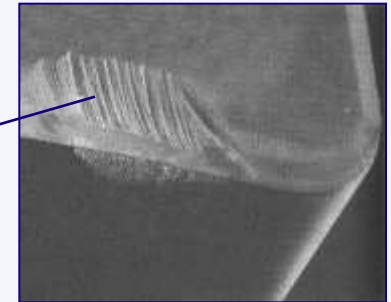
Ursache für den Kolkverschleiß ist das Zusammenwirken von Reibung und Diffusion. Er verändert wie eine Änderung des Spanwinkels γ die Spanablaufrichtung und somit den Scherwinkel Φ .

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.

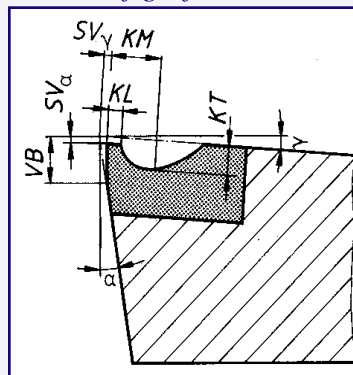
REM-Aufnahme einer
Wendeschneidplatte



Kolkverschleiß

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

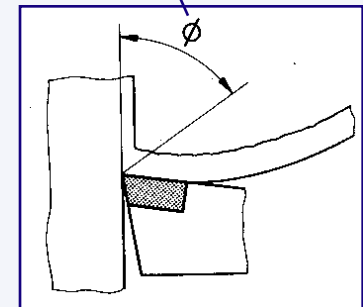
Verschleißgrößen am Schneidteil eines Drehmeißels



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

Quelle: Fritz / Schulze:
Fertigungstechnik, VDI-Verlag

Scherwinkel Φ

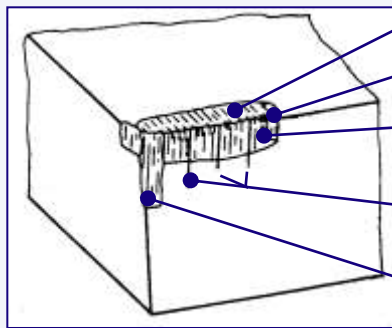


Quelle: Fritz / Schulze:
Fertigungstechnik, VDI-Verlag

Verschleißformen am Beispiel eines Drehmeißels

➔ weitere Verschleißformen

Verschiedene Verschleißformen
an einer Drehmeißelschneide



Spanflächenverschleiß

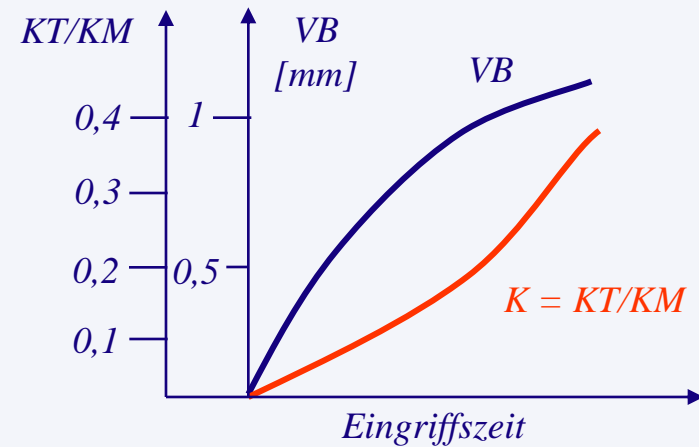
Kantenabrundung

Freiflächenverschleiß

Kammrisse

Eckenverschleiß

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



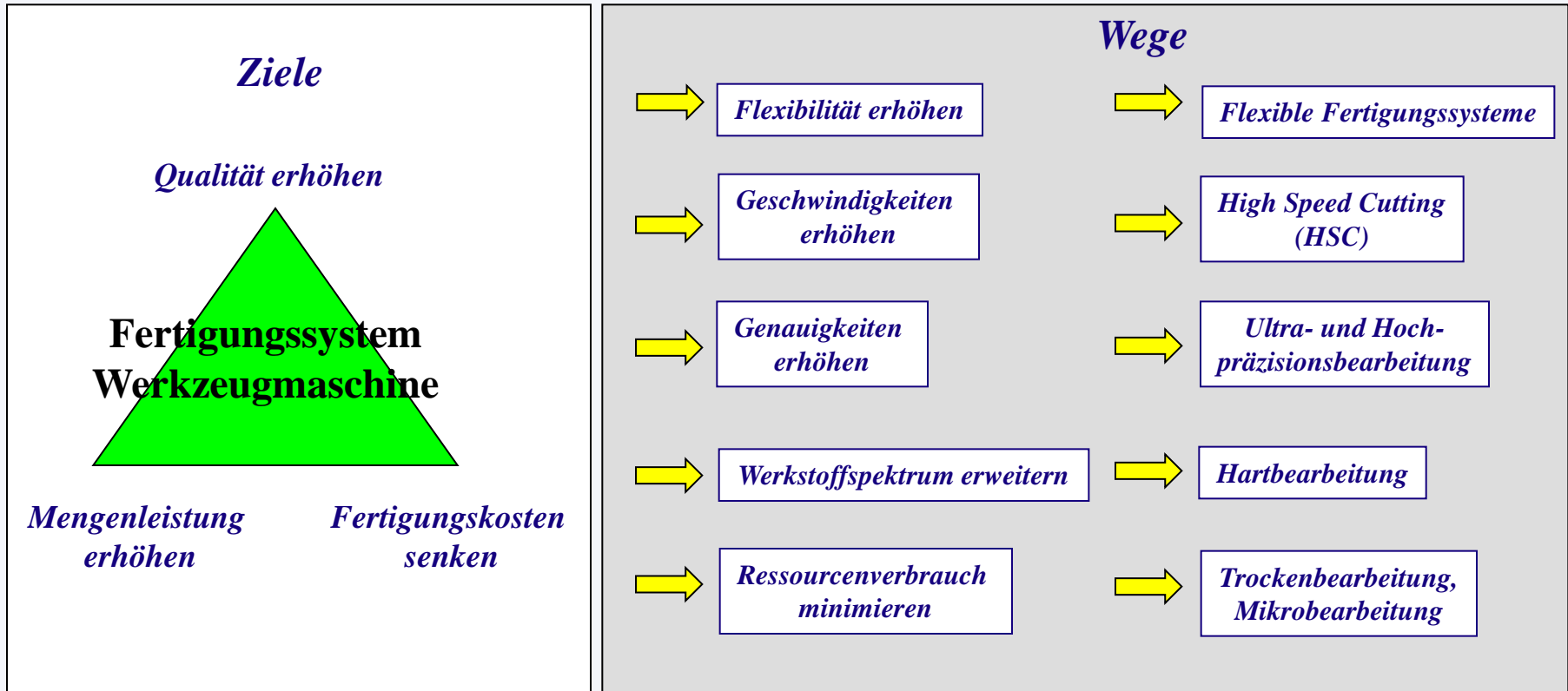
- **Spanflächenverschleiß:** beginnt an der Schneidkante und erzeugt eine ähnliche Verschleißmarke wie der Freiflächenverschleiß
- **Kantenabrundung:** wenn bei langsam arbeitenden Schneiden Spanflächen- und Freiflächenverschleiß gleichzeitig einsetzen
- **Eckenverschleiß:** Freiflächenverschleiß von 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

Quelle: Pauksch, Zerspantechnik

Ausblicke



Entwicklungstrends



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?

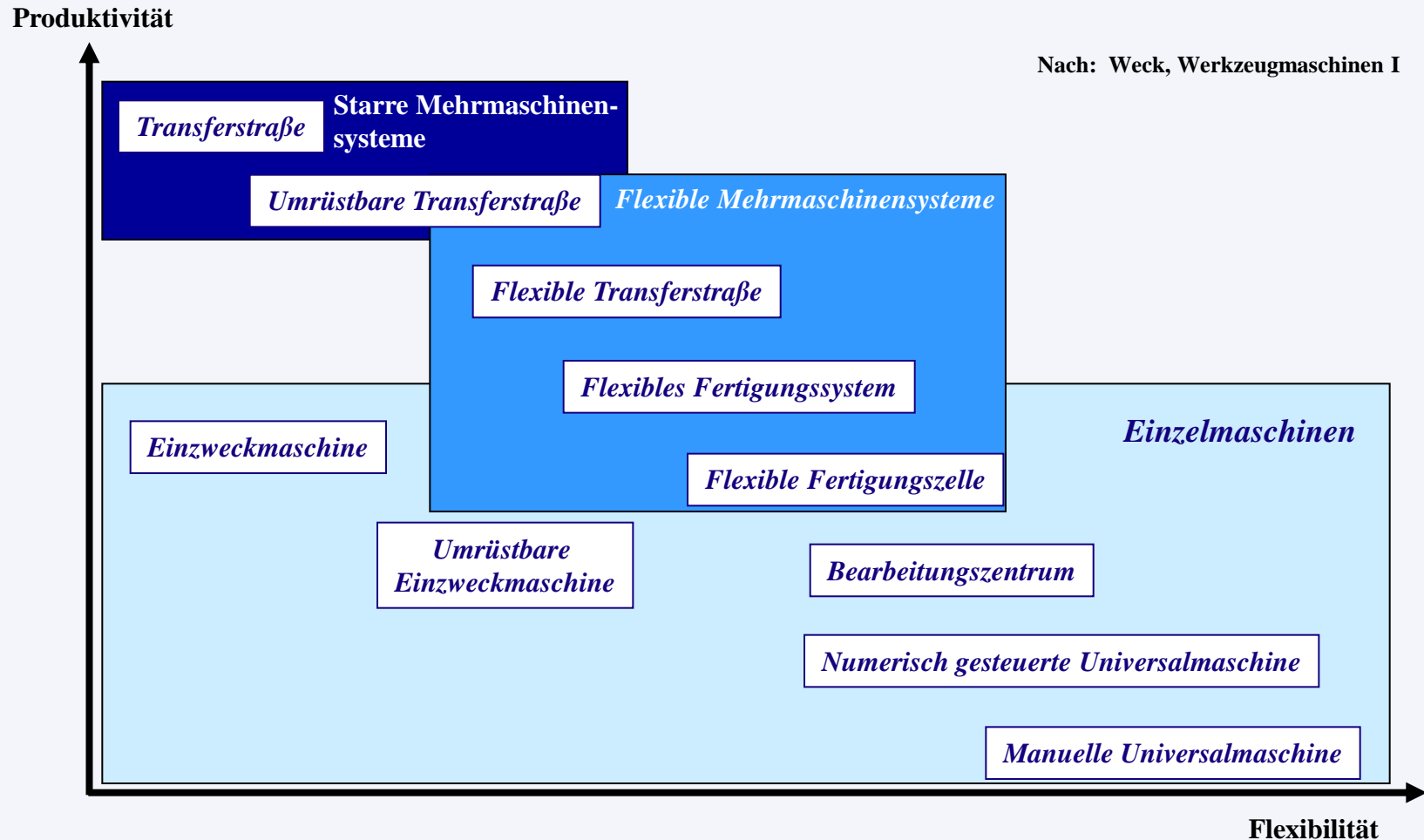
Bei der Umsetzung eines flexiblen Fertigungssystems werden die konträren Ziele

- hohe Flexibilität*
- bei relativ hoher Produktivität*

verfolgt.

Flexibilität erhöhen: Flexible Fertigungssysteme (FFS)

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 Bewegungsachsen 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 serielle zueinander angeordnet sind.

Geschwindigkeiten erhöhen: *High Speed Cutting* -Bearbeitung

Maschinebeispiel: Fahrständerbearbeitungszentrum mit Schwenkkopf



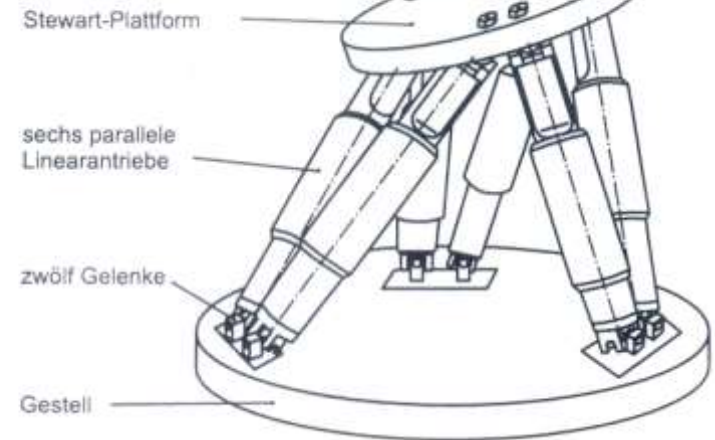
Quelle: AXA-Maschinenbau

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

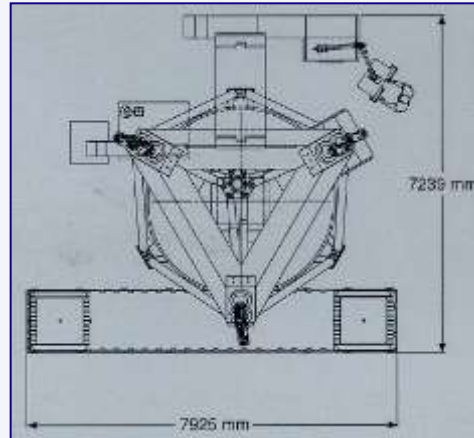
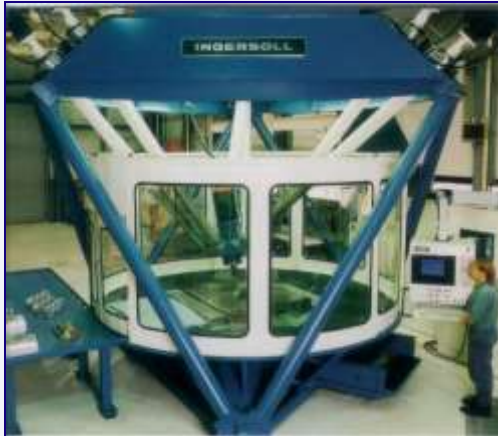
Nachteile:

- 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

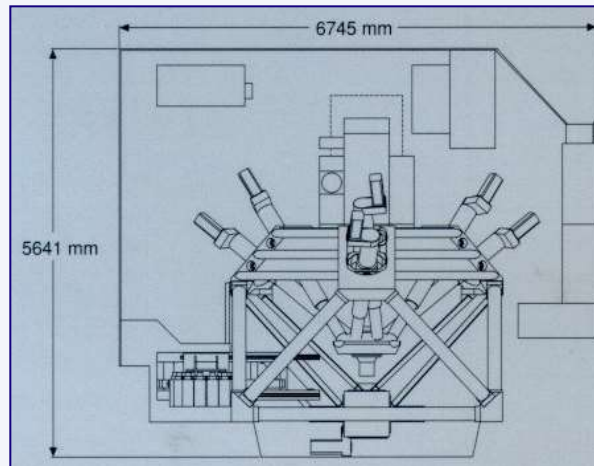
Geschwindigkeiten erhöhen: High Speed Cutting -Bearbeitung

*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)
- Fotokopierer- oder Laserdruckertrommeln (Al, CU)
- Kontaktlinsen (Kunststoffe)
- 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

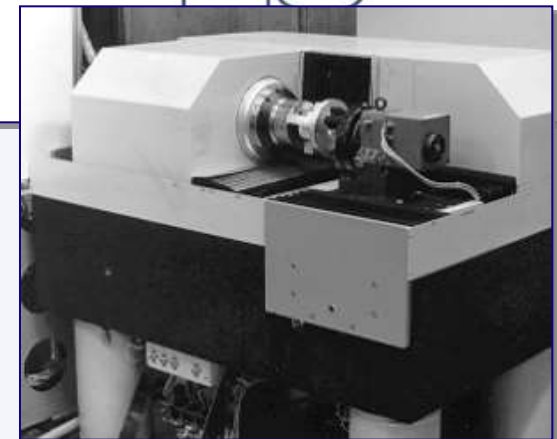
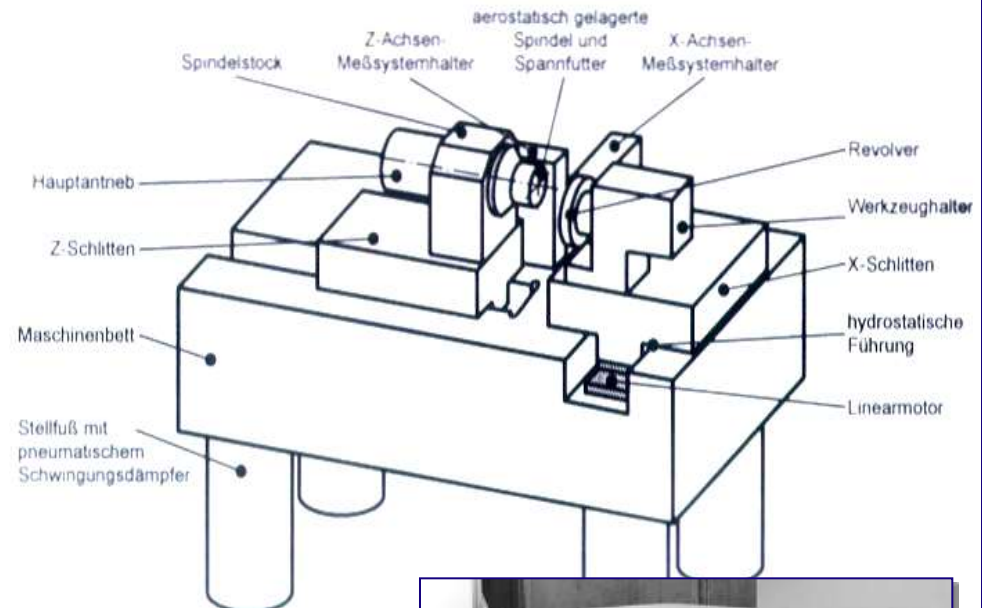
- höhere thermische Stabilität,
- luftgelagerte Führungselemente (verschleißfrei) und
- einem Laserinterferometer-Wegmeßsystem in Verbindung mit einer hochauflösenden Steuerung.

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 Beschleunigungswerten sowie einem weiten Regelbereich
- Hauptspindellagerung muß eine große Steifigkeit und gute Dämpfung aufweisen
- Reitstock sollte auf separater Führungsbahn gelagert sein
- eine trennende Schutteinrichtung (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	Hochpräzisionswerkzeugmaschinen	Ultrapräzisionswerkzeugmaschinen
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

Quelle: Uhlmann: Werkzeugmaschinen

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

Beispiel: Vakuumspannfutter für die Ultrapräzisionsbearbeitung



Quelle: Wittemann, Feinwerktechnik

Vorteile:

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

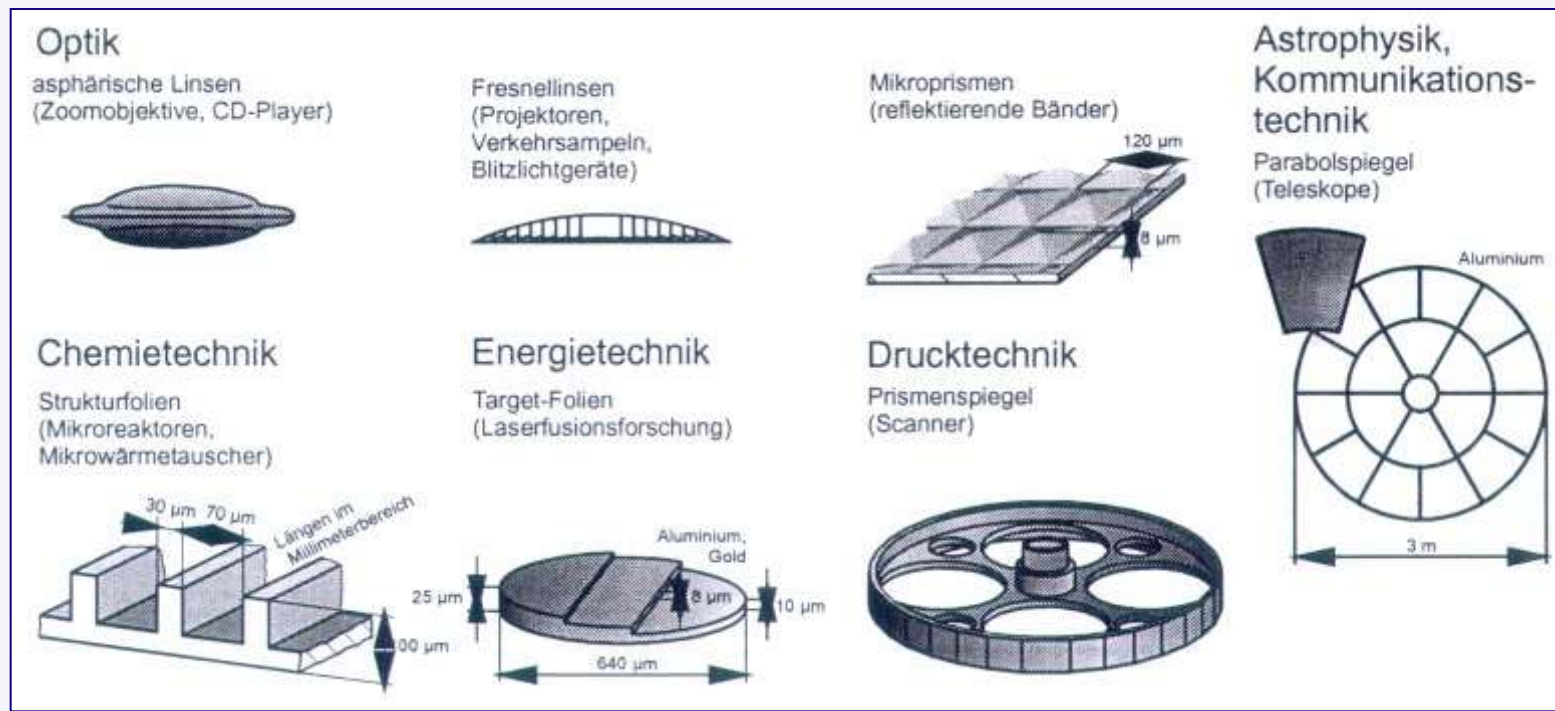
Nachteile:

- *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

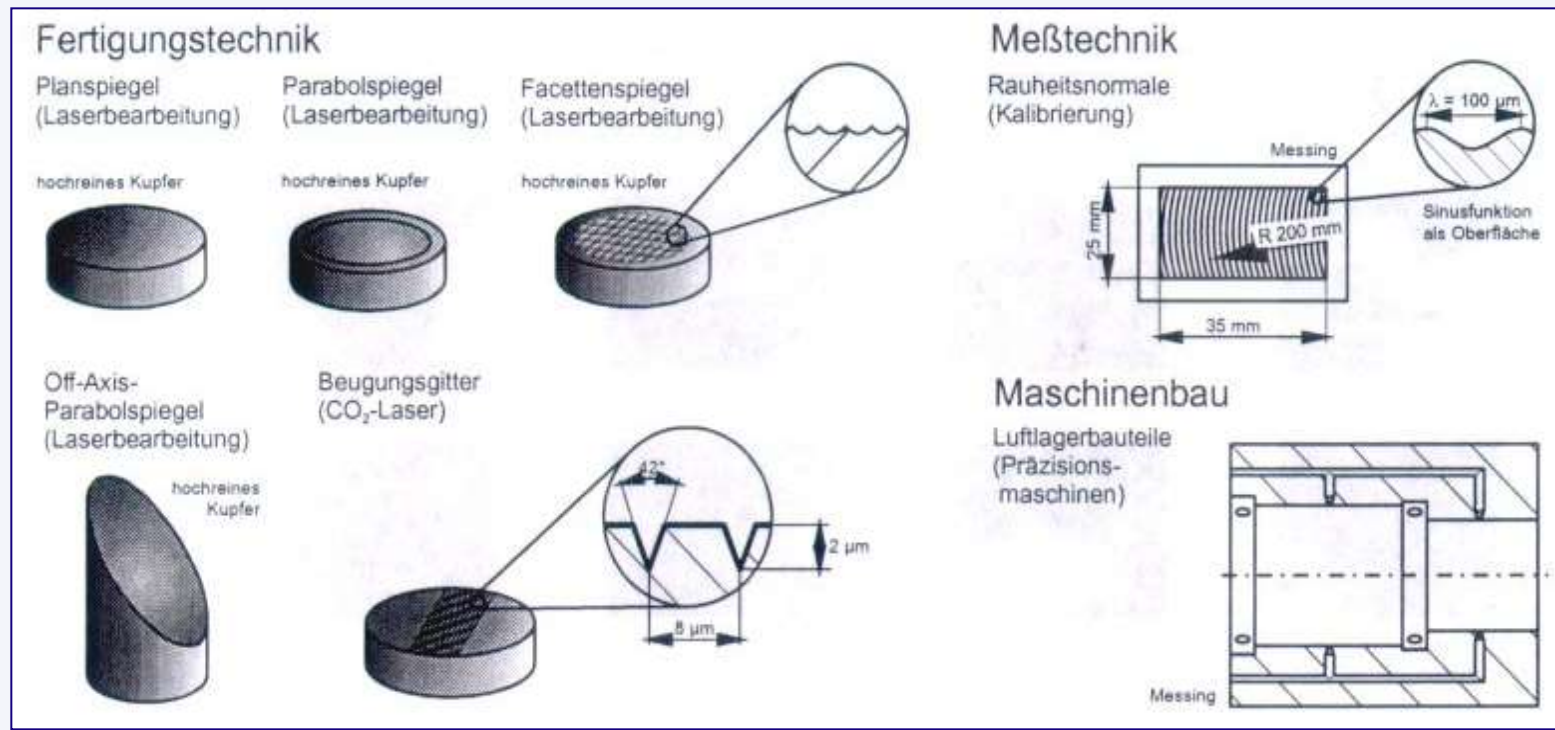
Ultrapräzisionsbearbeitung: Anwendungsbeispiele



Quelle: Uhlmann: Werkzeugmaschinen

Erhöhung der Genauigkeit: Ultra- und Hochpräzisionsbearbeitung

Ultrapräzisionsbearbeitung: Anwendungsbeispiele (2)



Quelle: Uhlmann: Werkzeugmaschinen

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

Hochpräzisions-Hartdrehen

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

Technologische Eigenschaften des Hochpräzisions-Hartdrehen:

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

Vorteile des Hochpräzisions-Hartdrehen gegenüber dem Schleifen:

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

Anforderungen an die Werkzeugmaschine:

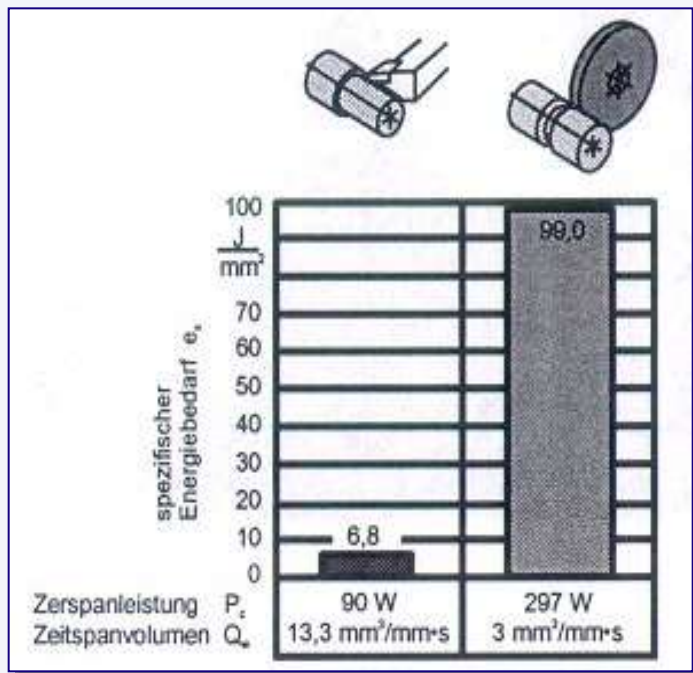
- hohe Systemsteifigkeit
- statische Grundfestigkeit
- thermosymmetrische Stabilität
- verschleißfreie hydrostatische Führungen
- geometrisch günstiger Aufbau der Schlittenführungen
- Rund- und Planlaufgenauigkeit der Arbeitsspindel von $2 \mu m$
- Präzisionsspannmittel
- Werkzeug - Temperatur - Kompensation

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

Vorteile des Hochpräzisions-Hartdrehen gegenüber dem Feinschleifen

Verringerung des Energiebedarfs

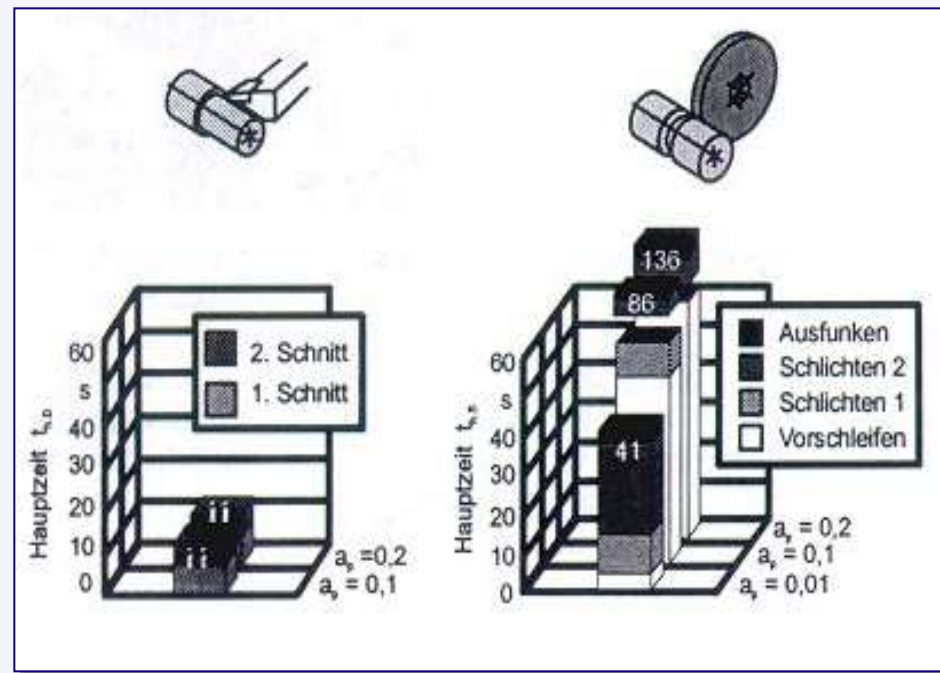
Hochpräzisions-Hartdrehen *Feinschleifen mit Korundscheibe*



Verkürzung der Hauptzeit

Hochpräzisions-Hartdrehen

Feinschleifen mit Korundscheibe



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

Anwendungsbeispiele



*Getriebebauteile
(Wellen, Zahnräder)*



*Werkzeuge
(Hülsen, Stempel,
Preßformen)*



*Lagerbauteile
(Wälzlageringe)*



*Hydraulikbauteile
(Kolben, Ventile)*

Ressourcenverbrauch minimieren: Trockenbearbeitung

Trockenbearbeitung was ist das?

Bei der Trockenbearbeitung wird ganz oder teilweise (Minimalmengen Kühlschmerung) 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
- schlechte Oberflächenqualität
- starken Werkzeugverschleiß
- Maß- und Formfehler
- ungünstige Spanformen



Zerspanprozeß mit Kühlschmierstoff (Quelle: IWU)

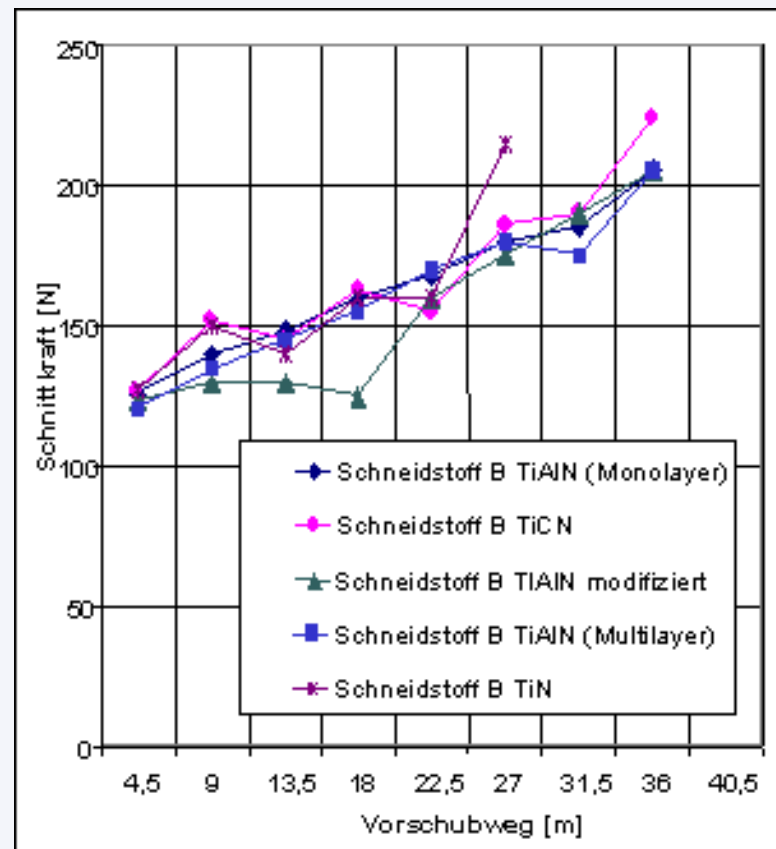


Zerspanprozeß ohne Kühlschmierstoff (Quelle: IWU)

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!



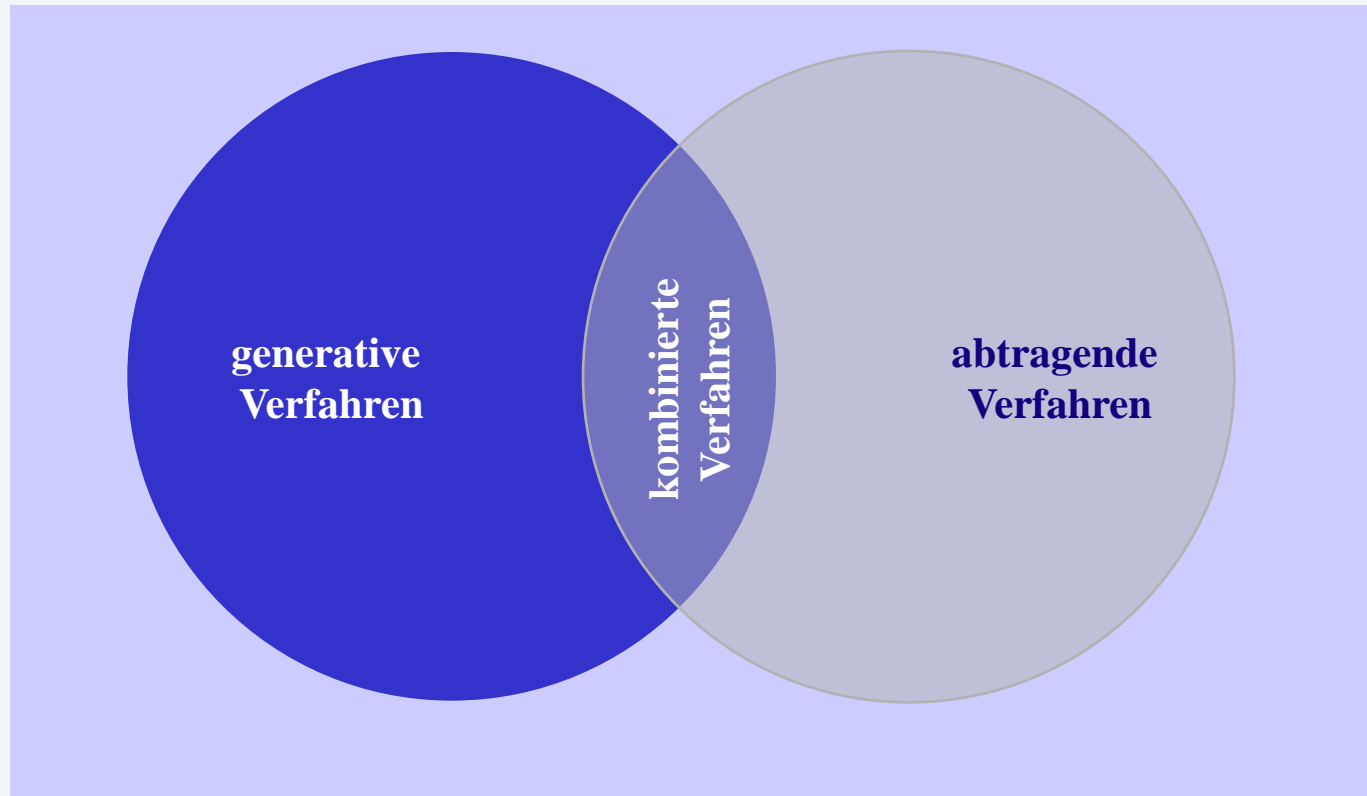
Quelle: IWU, Fraunhofer

Werkzeugmaschinen für generative Fertigungsverfahren



Verfahren: Einteilung

Klassen von Rapid Prototyping - Verfahren

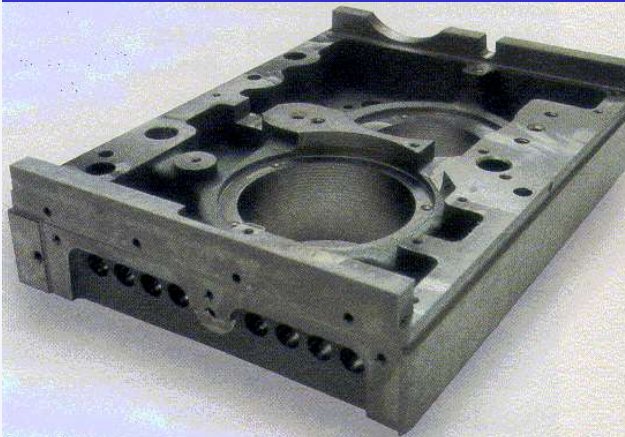


Rapid Prototyping - Verfahren

Verfahren: Einteilung

Abtragende und generative Verfahren

abtragende Fertigungsverfahren



Quelle: Hermle AG

Formgebung durch Materialabtrag
(konventionelle Verfahren)

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

generative Fertigungsverfahren

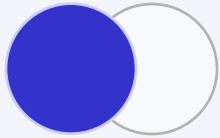


Quelle: Charlyrobot

Formgebung durch
Aneinanderfügen bzw. Aufbau von
Körperschichten

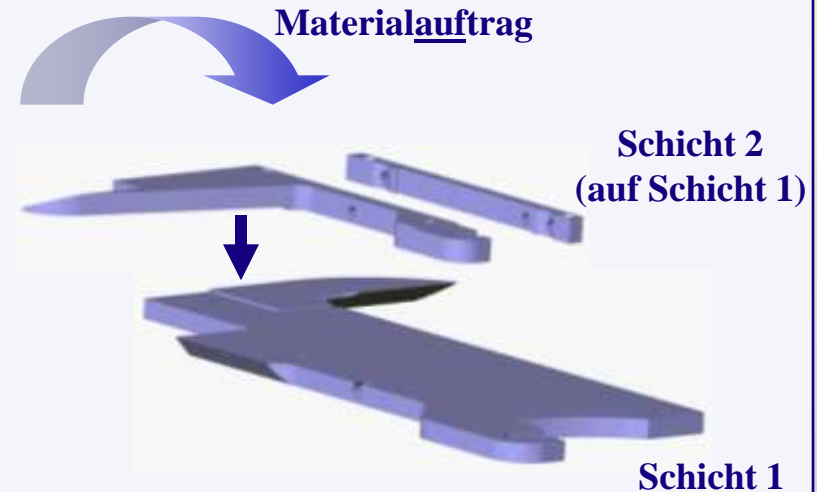
- Verfahren:
- Stereolithographie
 - Selektives Laser-Sintern
 - Laminated Object Manufacturing
 - Fused Deposition Modelling
 - Laser-Auftragsschweißen

Verfahren: Einteilung



Generative Rapid Prototyping - Verfahren

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

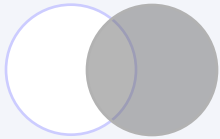


Beispiele:

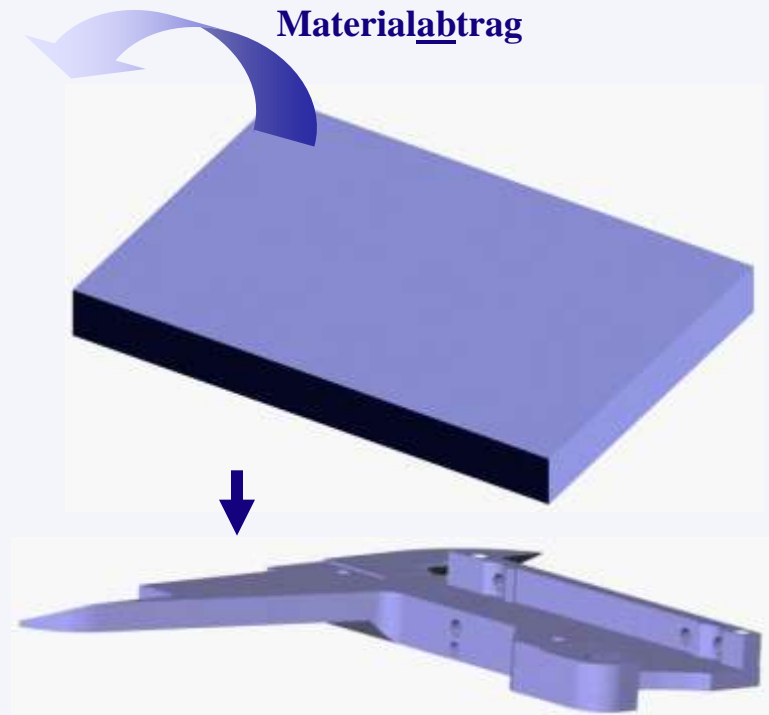
- Sintern
- Laminieren und Ausschneiden
- Aushärten flüssiger Werkstoffe
- ...

Verfahren: Einteilung

Abtragende Rapid Prototyping - Verfahren



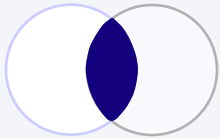
- **Materialabtrag:**
Prototyp wird mittels Entfernen von Material hergestellt
- Schichtorientierung nicht zwingend



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

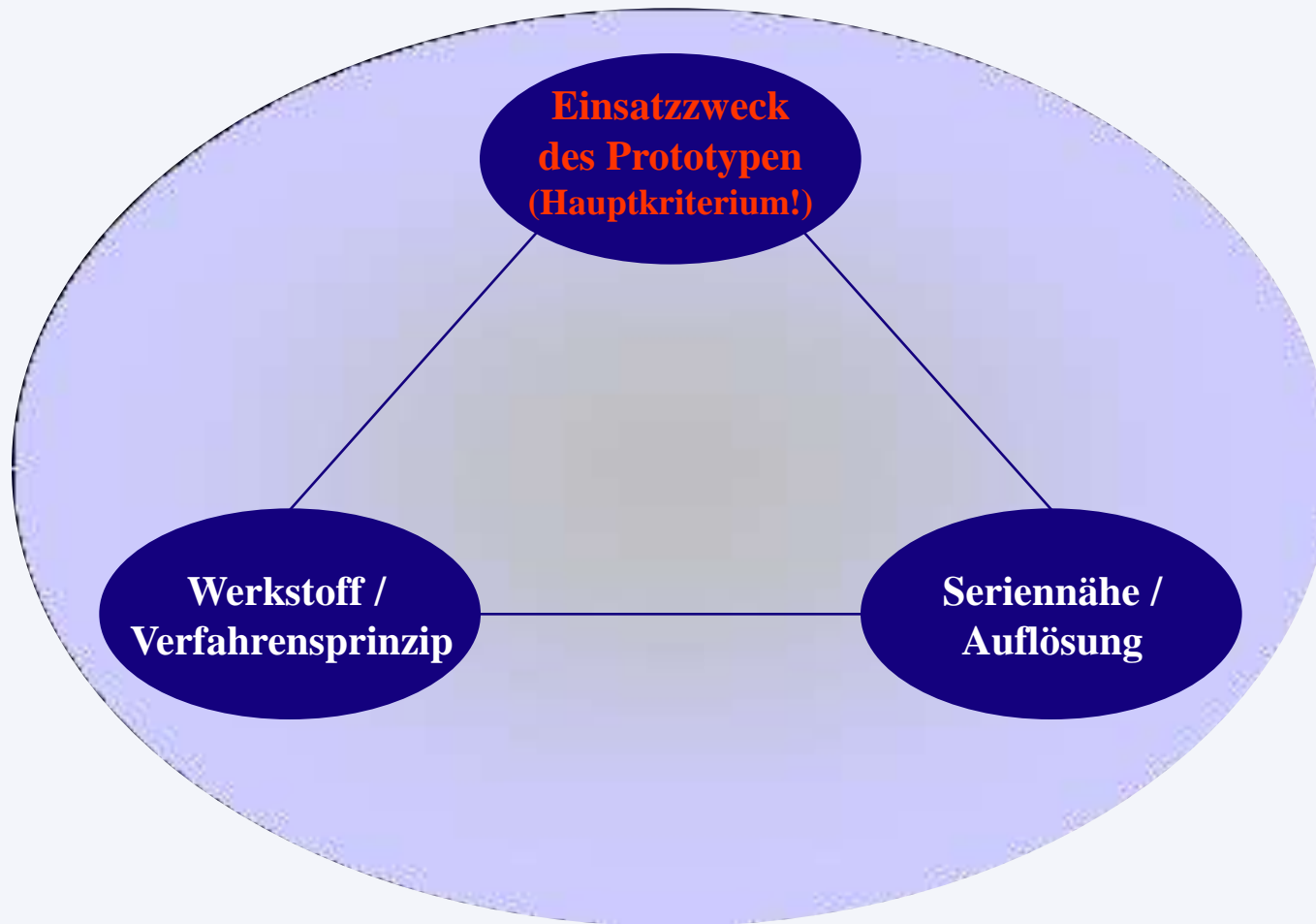


Beispiele:

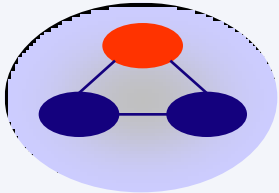
- Fräsen innerhalb einer Schicht und anschließendes Fügen der einzelnen Schichten
- Materialaufbau und anschließendes Herausarbeiten der Kontur, z. B. mittels Fräsen

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
- ...

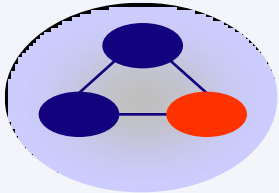
interne Nutzung

externe Nutzung (Kunde / Messe etc.)

Folgeverfahren

...

Verfahren: Einteilung



Seriennähe und Auflösung des Verfahrens

Seriennähe

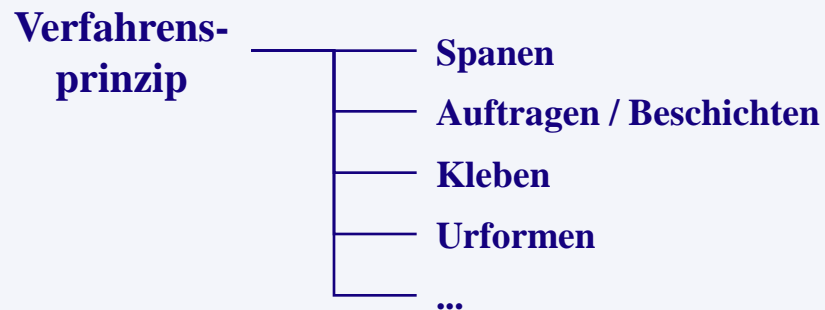
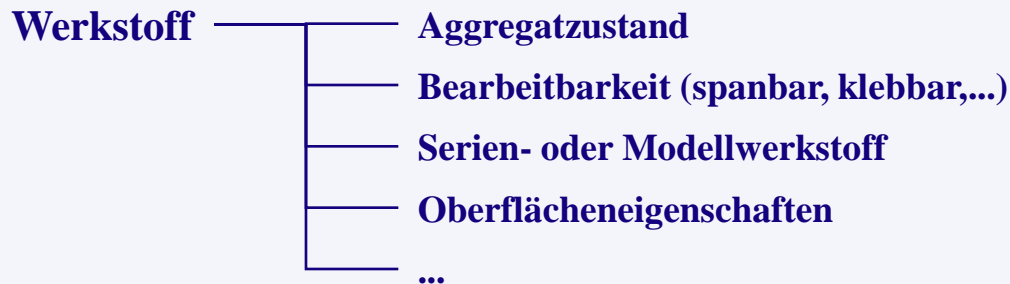
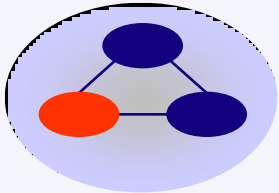
- eher Modellcharakter (noch weit von der Serie entfernt)
- z.T. nicht sehr weit ausgearbeitet, sondern eher Prinzipdarstellungen
- eher Prototypcharakter (seriennah)
- Ausarbeitungsgrad stark vorangeschritten

Auflösung

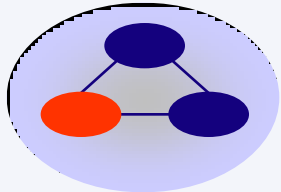
- grob
- wenig Details
- teilweise vereinfacht
- Radien z.T. stark angenähert
- STL-Darstellung grob
- fein
- detailliert, Einzelheiten dargestellt
- Radien und Krümmungen genauer beschrieben
- feine STL-Zerlegung

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

Verkleben von Schichten

- Laminated Object Manufacturing

In Form

- Giessen
- Spritzgiessen

Abtragende Verfahren

Fräsen

- HSC

Anwendung thermischer Energie (=generativ)

Sinter- prozess

- Selective Laser Sintering

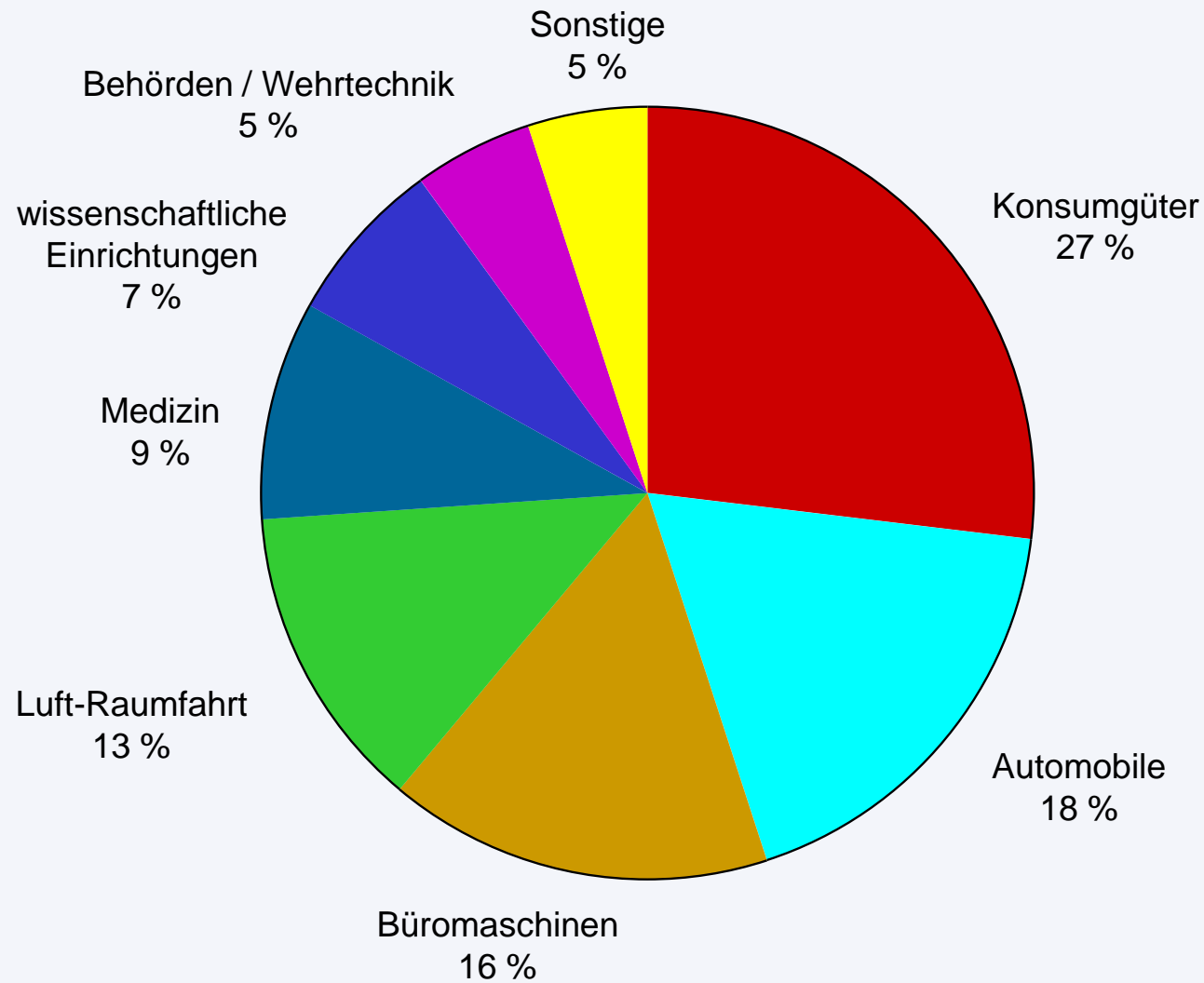
Metall- schweißen

Kombinierte Verfahren

Fräsen + Fügen

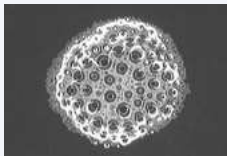
Fräsen + Laser- auftragsschweißen

Generative Verfahren: Verteilung der Rapid Prototyping Verfahren



Rapid Prototyping Verfahren

Fluid

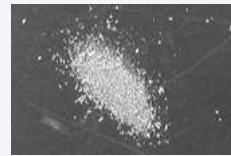


Stereolithographie

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

Solider-Verfahren

Pulver



Selective Laser Sintering

EOS - Verfahren
DTM - Verfahren

3D-Printing

Draht / Folie

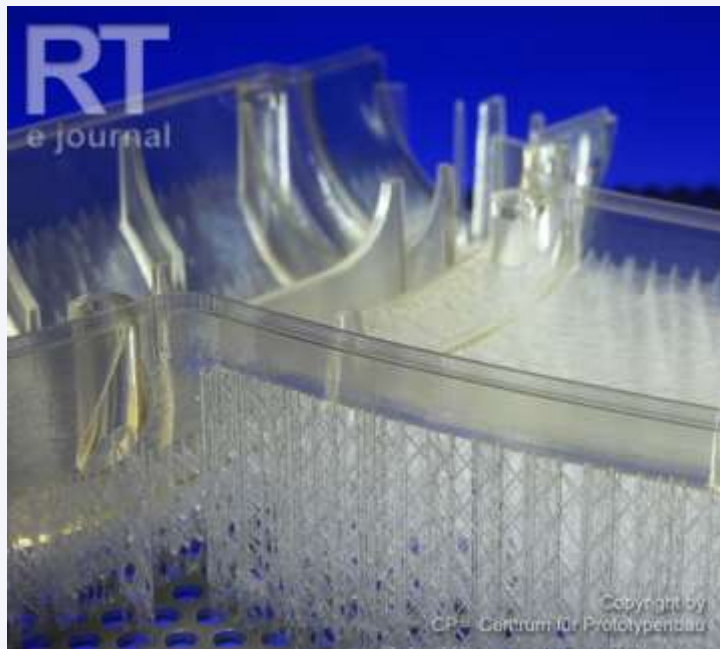


Fused Deposition Molding

Laminated Object Molding (Manufacturing)

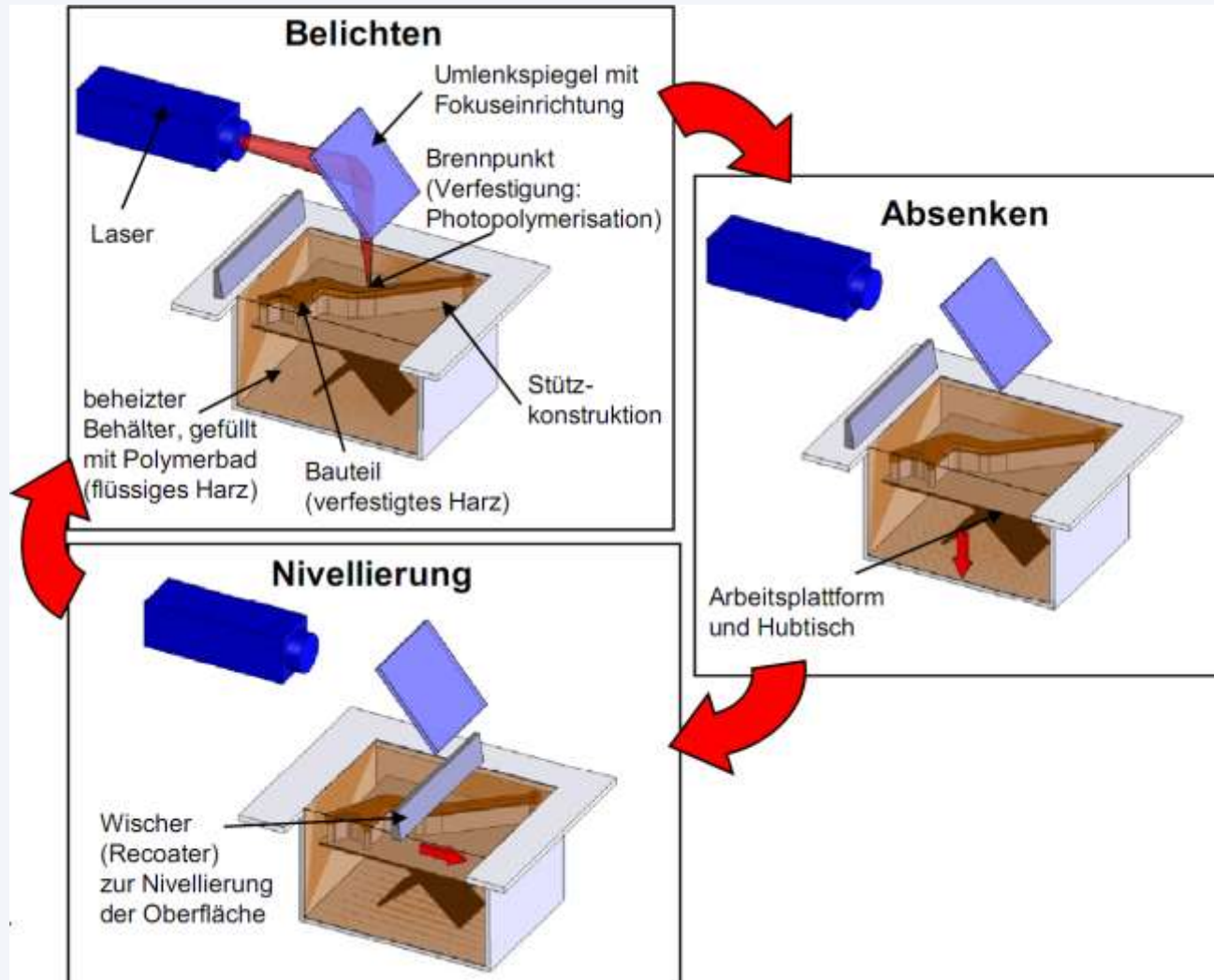
Multi Jet Modeling

Verfahren	Lokale Verfestigung von flüssigem Monomer durch UV-Strahlung (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



SLA 3500 System



SLA 7000 System



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



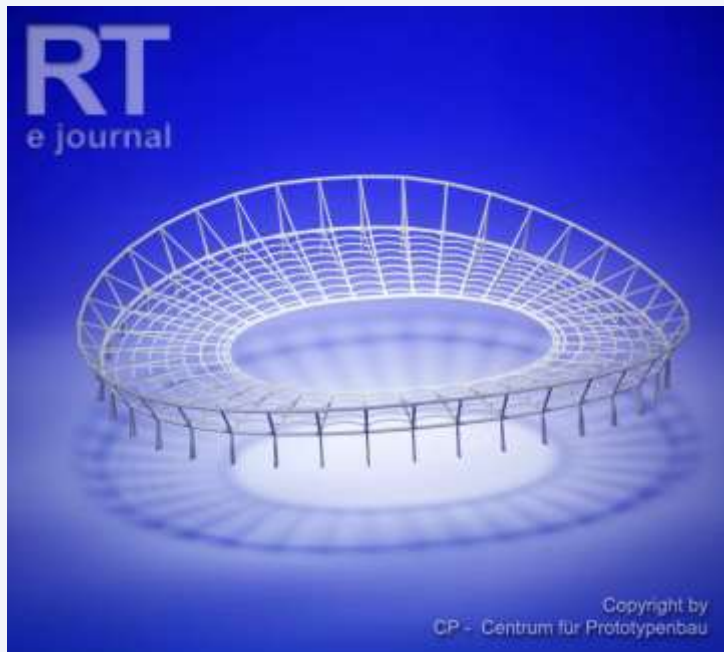
*Gebrauchsfertiges Stereolithographie-Modell:
Gesichtsschädel*



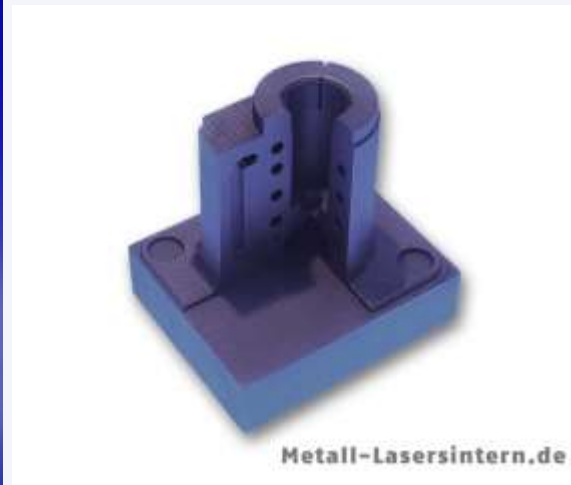
(Quelle: FA. Weihbrecht)

Selective Laser-Sintering (Laser Sintern)

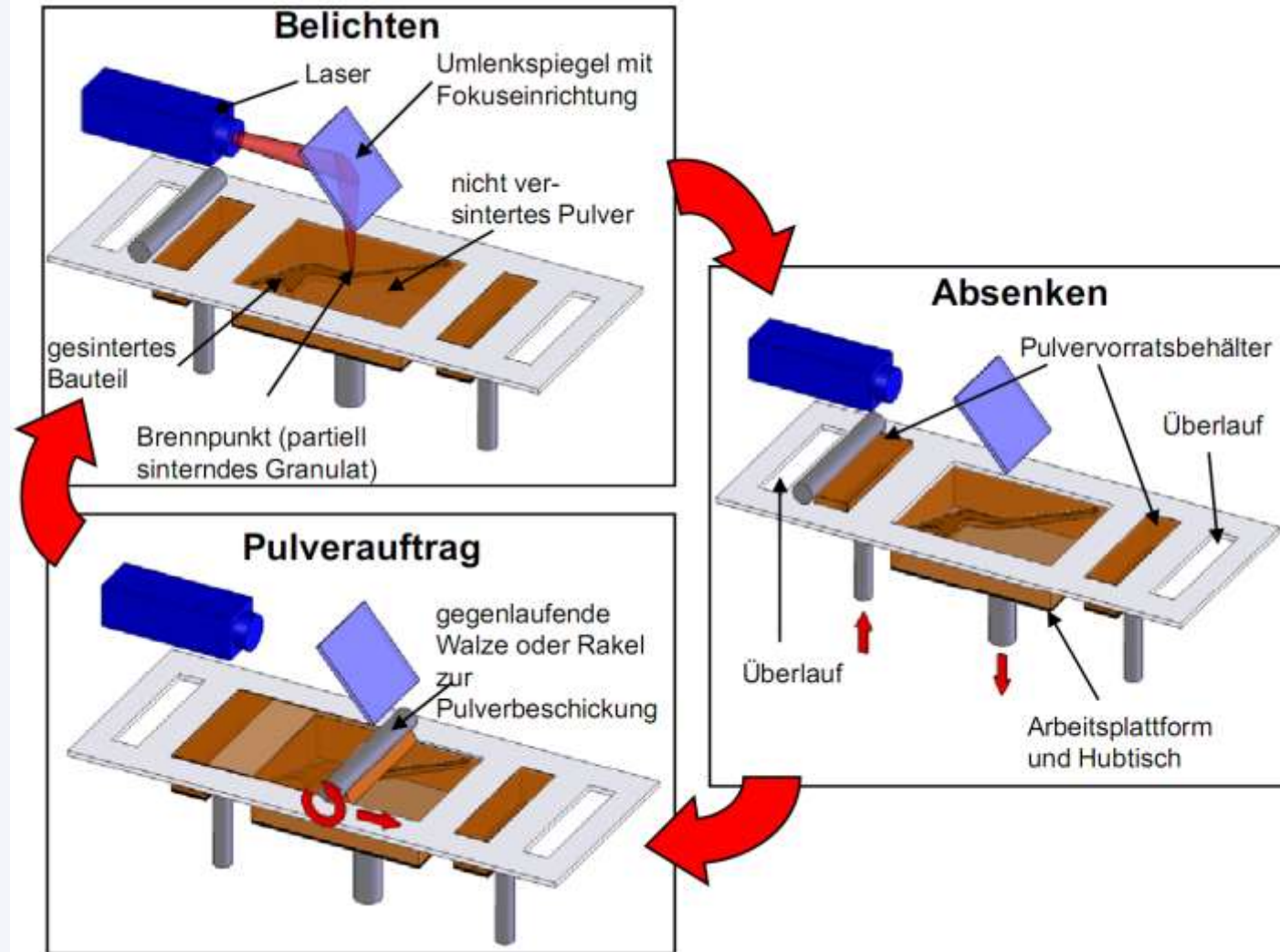
Verfahren	Lokales Aufschmelzen von pulverförmigem thermoplastischem Material, Schichtbildung nach Erstarrung. Keine Stützen erforderlich
Materialien	Kunststoffe (Polyamid, Polystyrol), <u>Metalle</u>, Sande, Keramiken
Vorteile	Kunststoff: Höhere mechanische und thermische Belastbarkeit als Stereolithographie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



Quelle: RTejournal



Selective Laser-Sintering (Laser Sintern)



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme



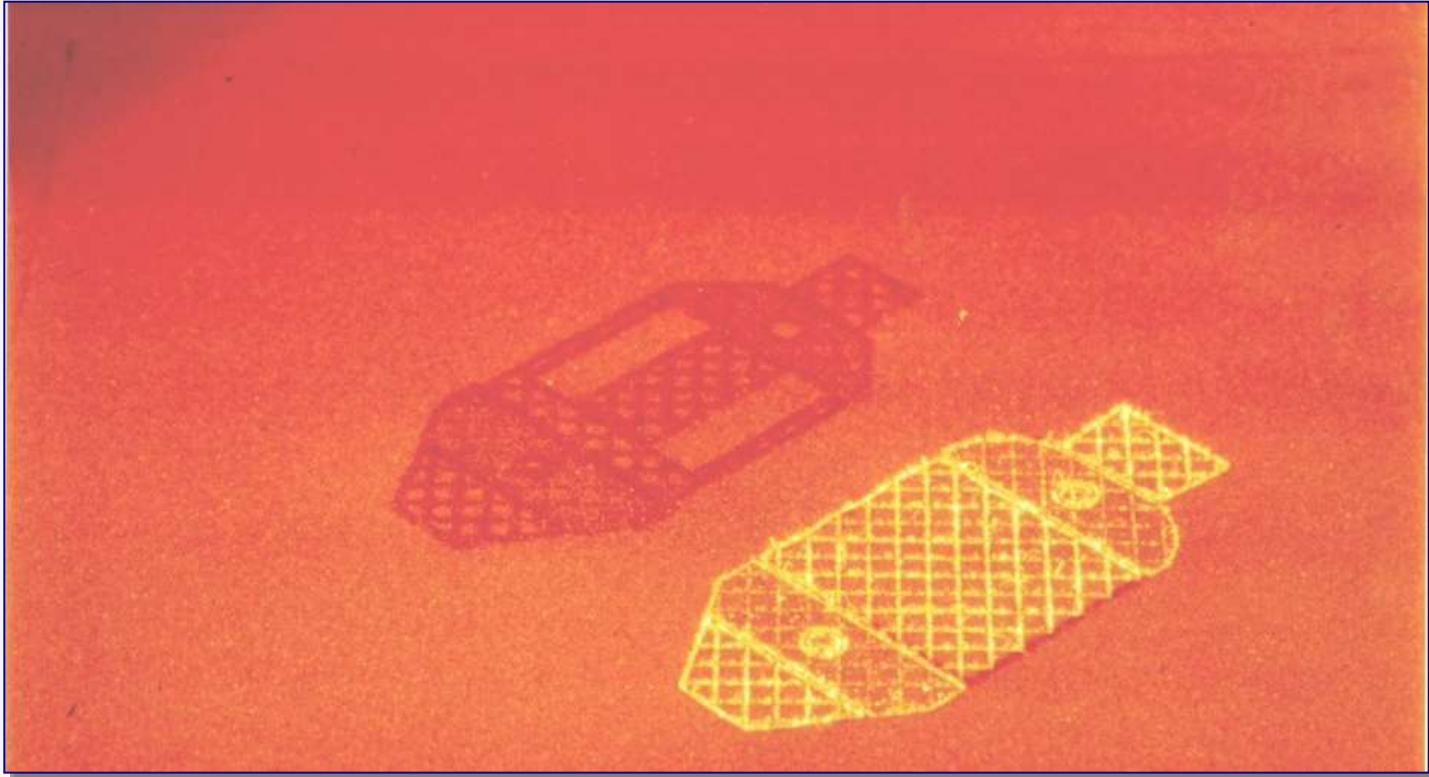
Maschinenbeispiel: EOSINT S (Laser-Sinter-System für Sandformen und -kerne)



Laser-Sinter-Station während der Erstellung einer Sandform. Der Sand wird durch Heizspiralen im Bauraum vorgewärmt, dadurch benötigt der Laser eine geringere Energie zum lokalen verschmelzen des Sandes.

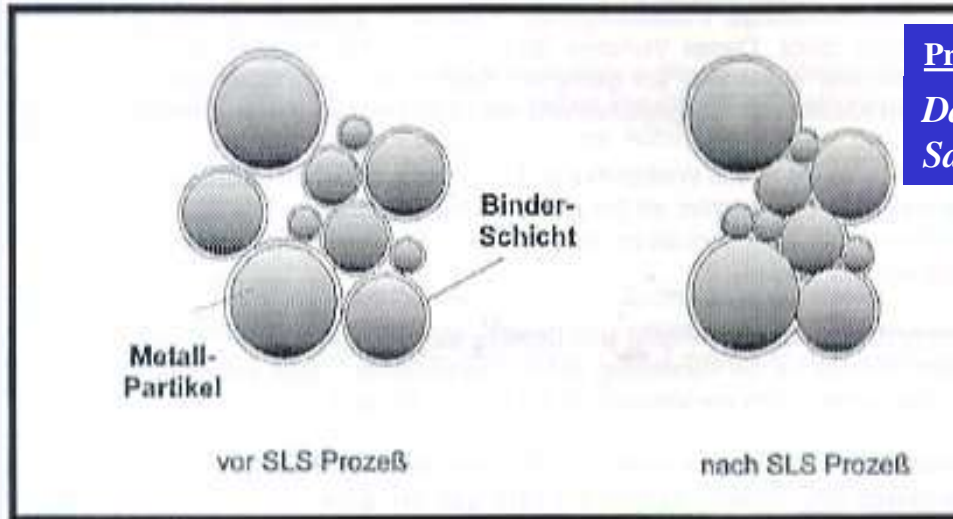


Laser-Sinter-Vorgang (EOSINT S 350/40)



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



Prinzip des RapidSteel Werkstoffes (DTM)

Das Prinzip des Aufschmelzen gilt für Sand und Kunststoff gleichermaßen!



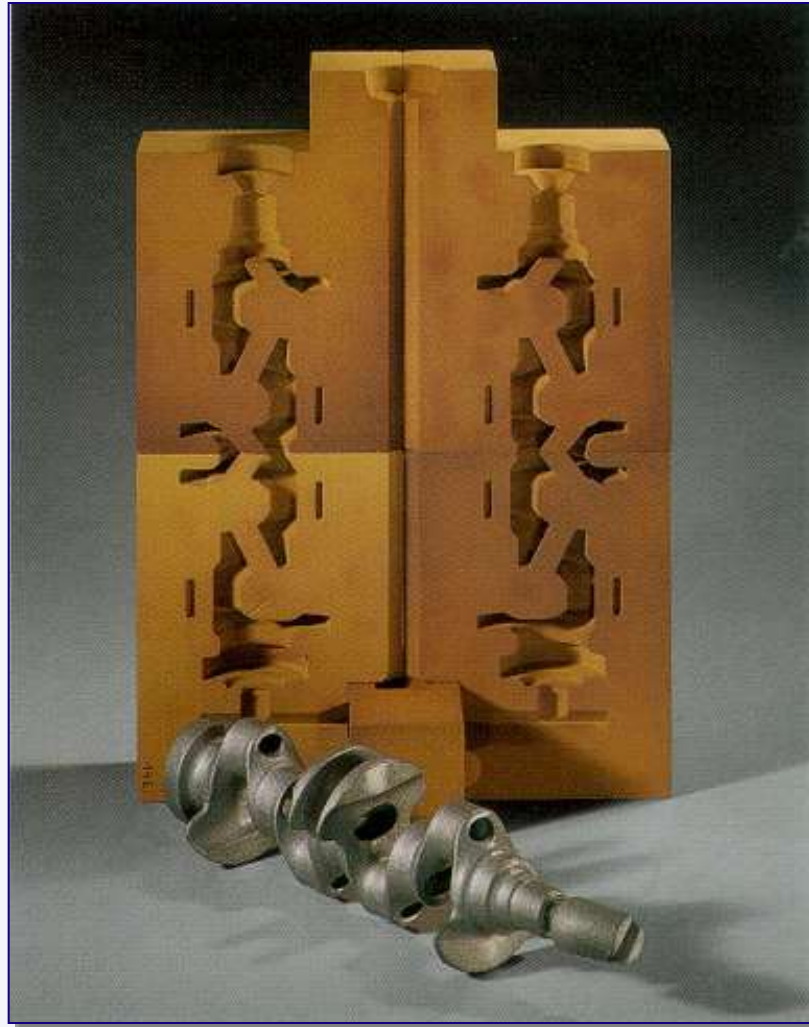
Gegossenes Einzylinder-Motorgehäuse aus Aluminium mit den entsprechenden lasergesinterten Formen und Kernen, einschließlich des in CAD konstruierten Angußsystems.



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

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:

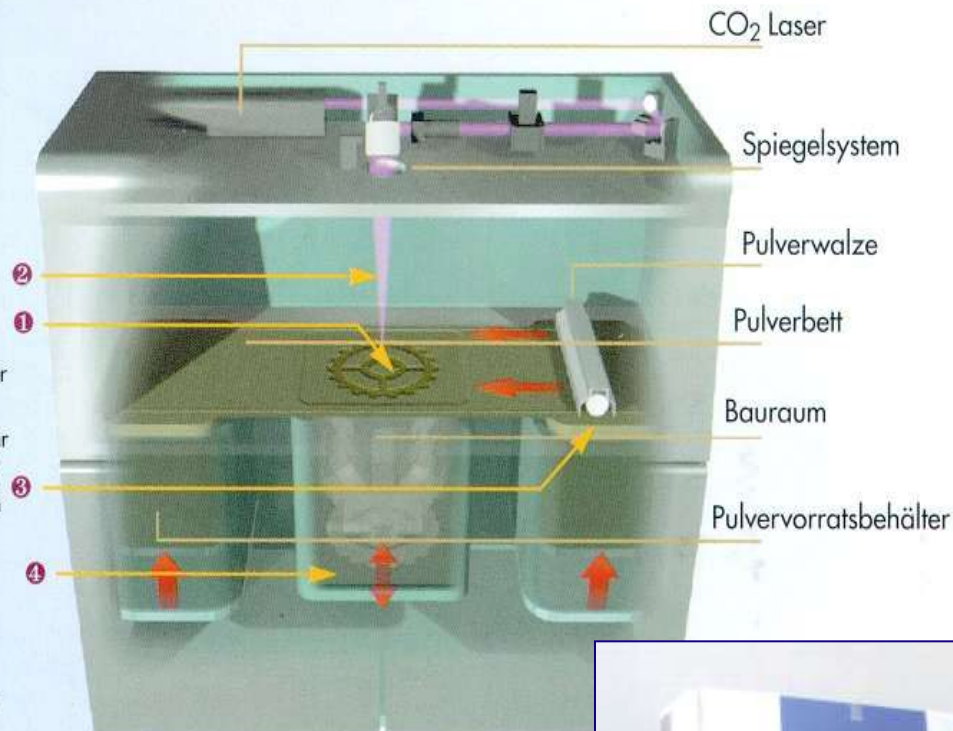
Erstellung eines dreidimensionalen CAD-Datensatzes im genormten STL-Format.

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 erhitzten 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



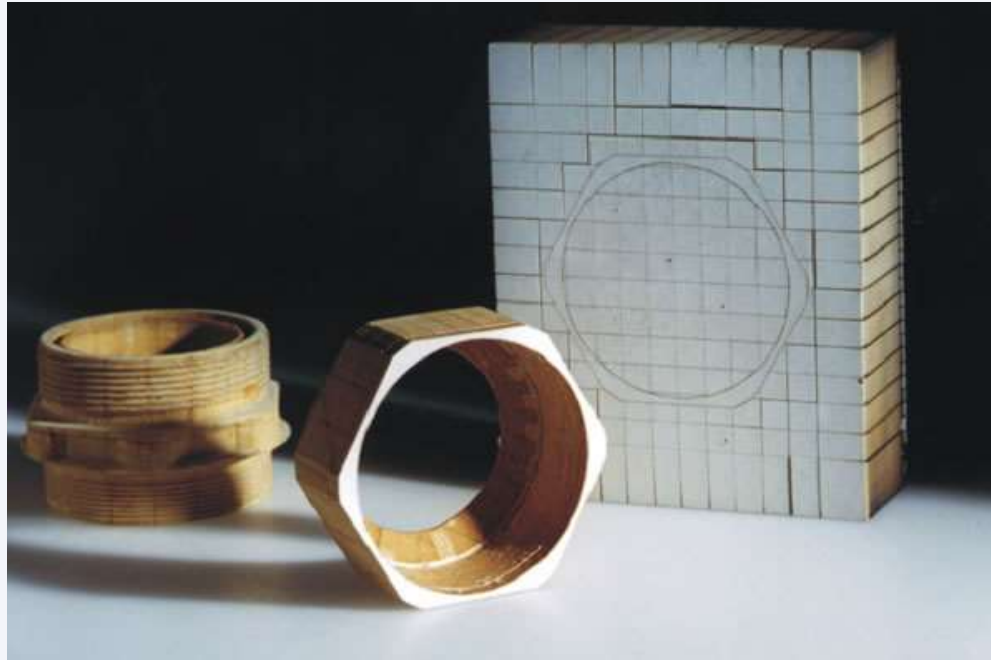
Sandkern und Abguß in Aluminium für Turbinentriebwerk, Fa. Boeing, Abmessungen ca. 430 x 350 x 305 mm³

Selective Laser-Sintering: Rapid-Tooling



*Metallische Werkzeugeinsätze für die Herstellung von Bohrmaschinengehäusen
im Kunststoffspritzguß, Abmessungen ca. 152 x 317 x 38 mm³*

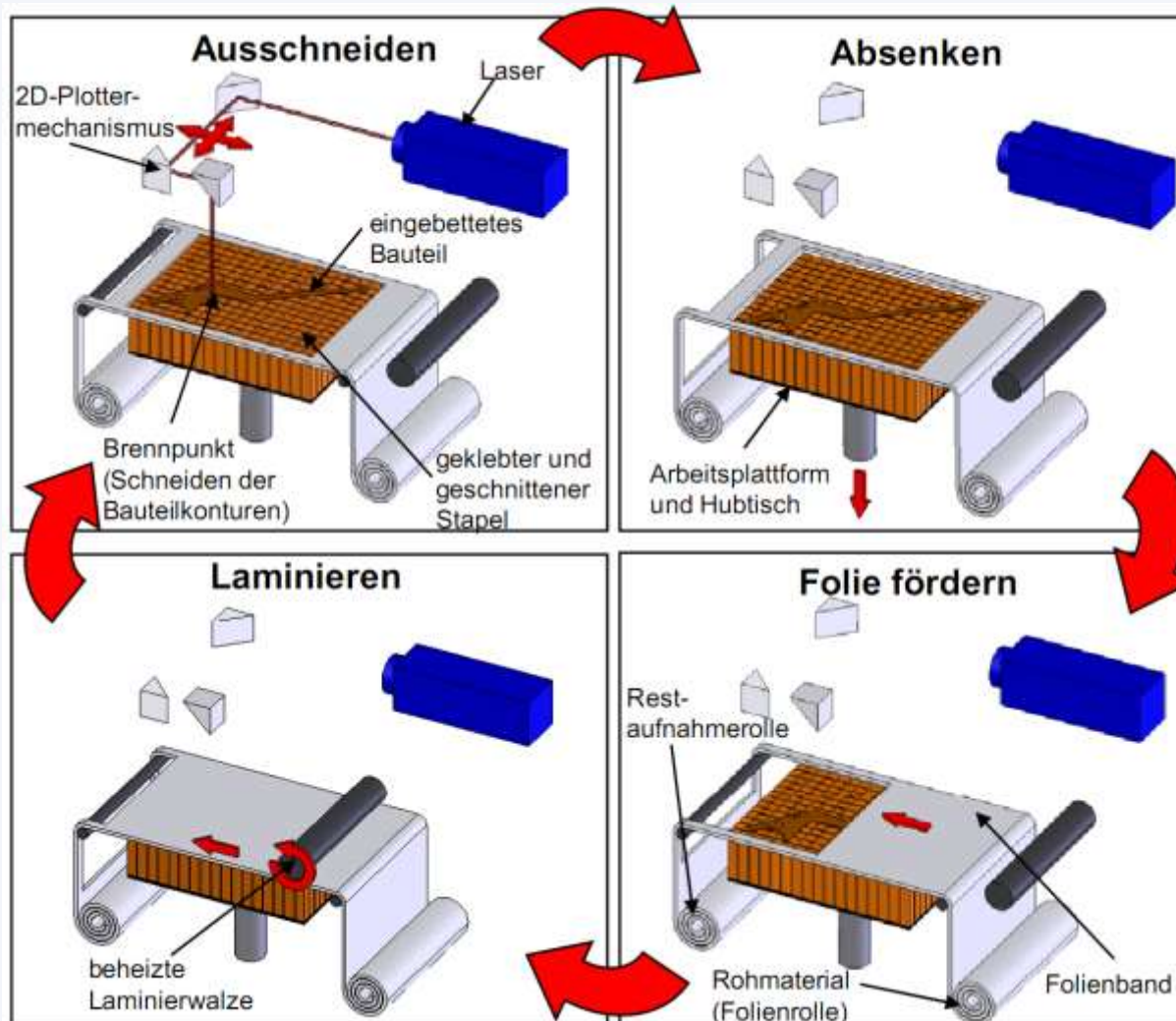
Laminated Object Manufacturing (Layer Laminate Manufacturing)



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)

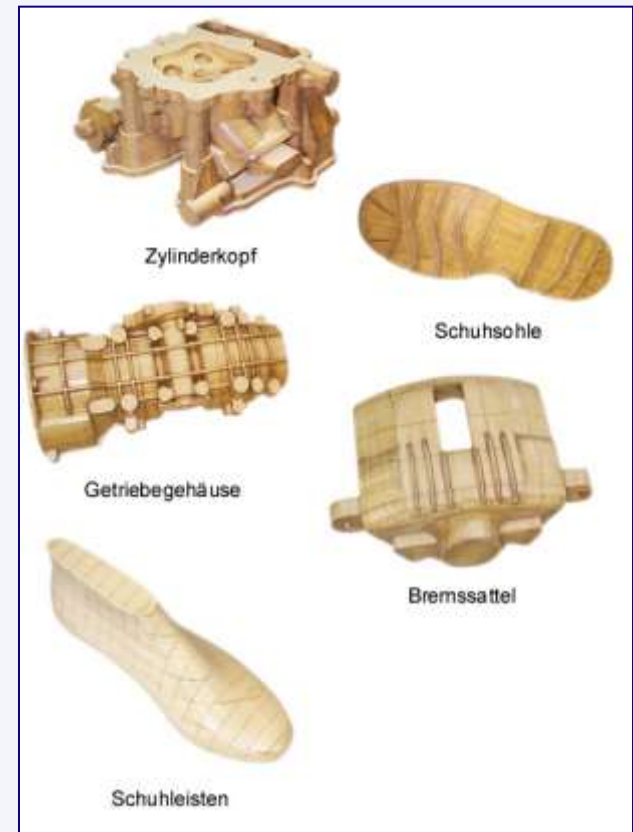


Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

Maschinenbeispiel: LOM-Anlagen der Firma Invenio



LOM-Beispiele



LOM: Metallguß und Silikon-Werkzeuge



Schwindmaße 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 verllorener Kern im Schalenfeinguß. Sie dehnen sich unter Wärmeeinwirkung nicht aus und sprengen somit nicht die Keramikschale während des Ausbrennprozesses. Für kleine Stückzahlen werden Wachsmodele aus LOM-Teilen hergestellt.

LOM-Modelle eignen sich aufgrund ihrer Dimensionsstabilität hervorragend zur Abformung in Silicon. Aus diesen Werkzeugen können dann kleine Serien von Polyurethanteilen 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.

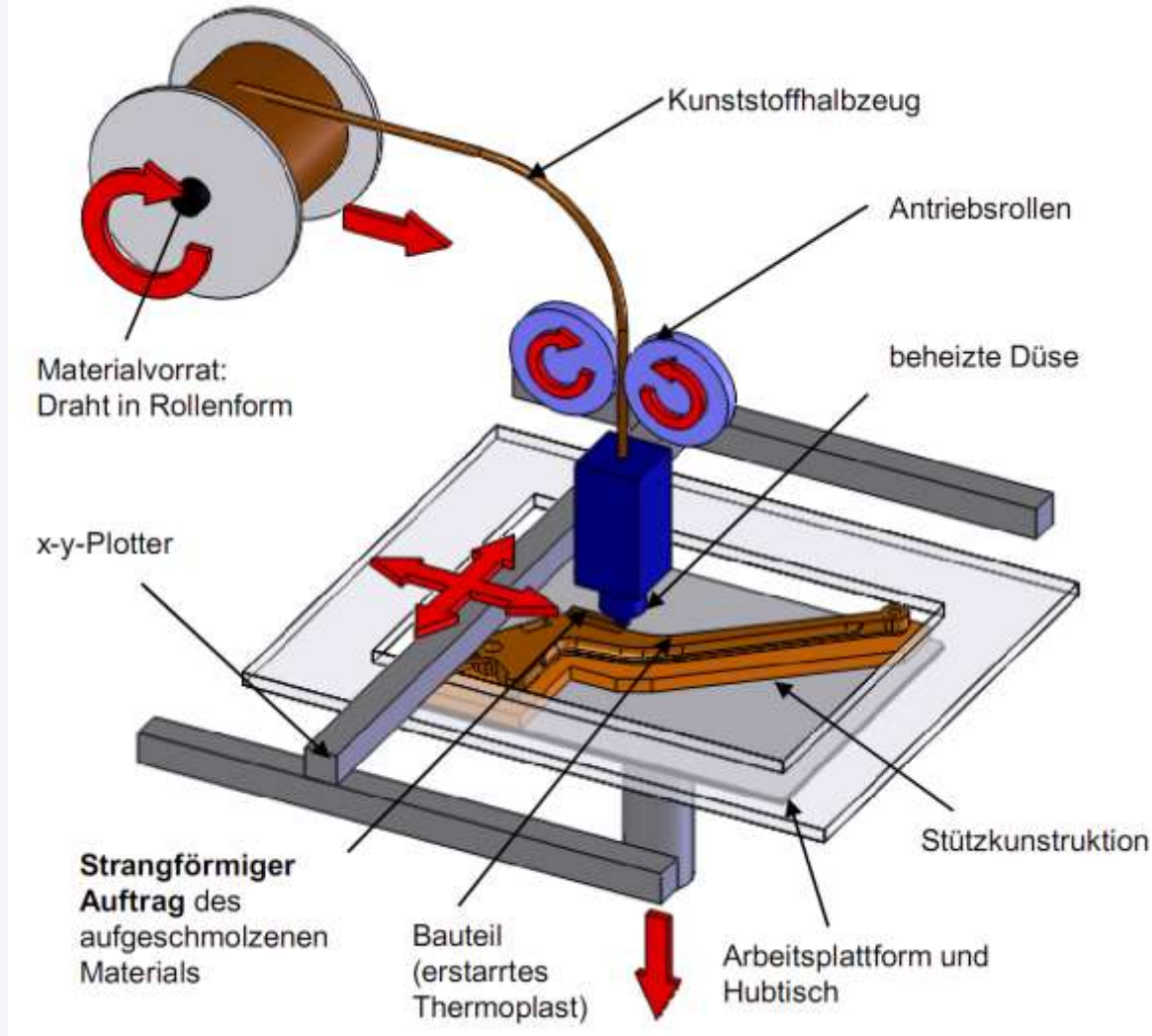
Fused Deposition Modeling (Fused Layer Modeling / Manufacturing)

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



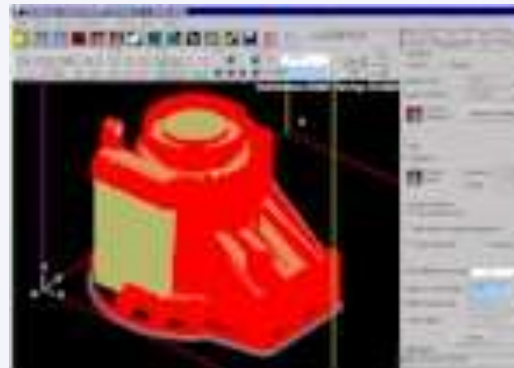
Festlegen der optimalen Baulage

3



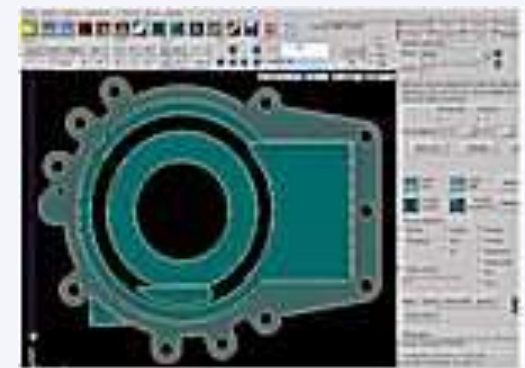
Schneiden des Modells in horizontale Ebenen (Slicen)

4



Automatisches Berechnen der Stützkonstruktionen

5



Berechnen der Verfahrswege

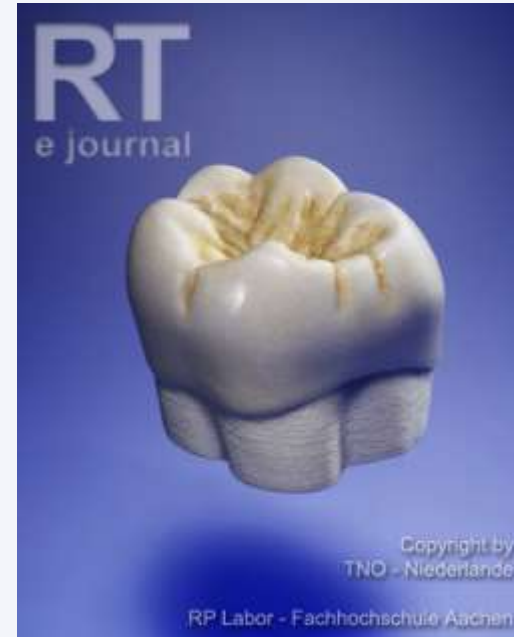
Felge erstellt mit der FDM 8000



Funktionsmodelle aus ABS.



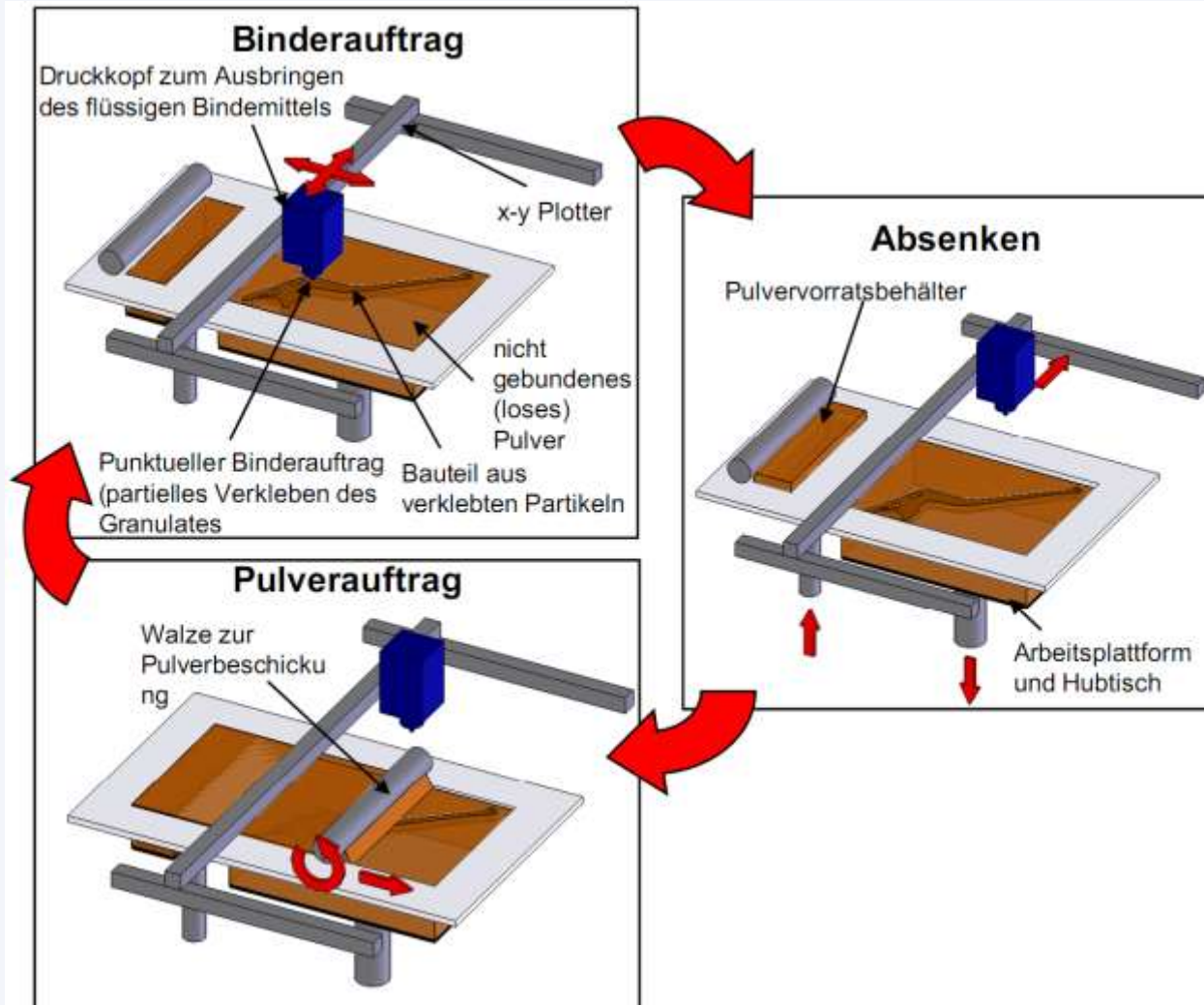
3D Printing



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

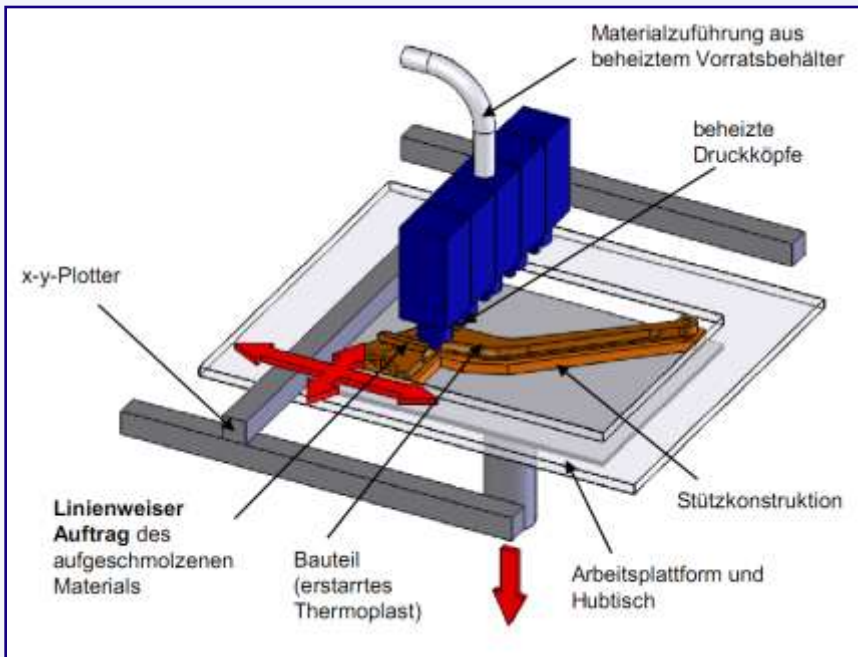
3D Printing



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

Multi Jet Modeling / Poly Jet Modeling

Multi Jet Modeling

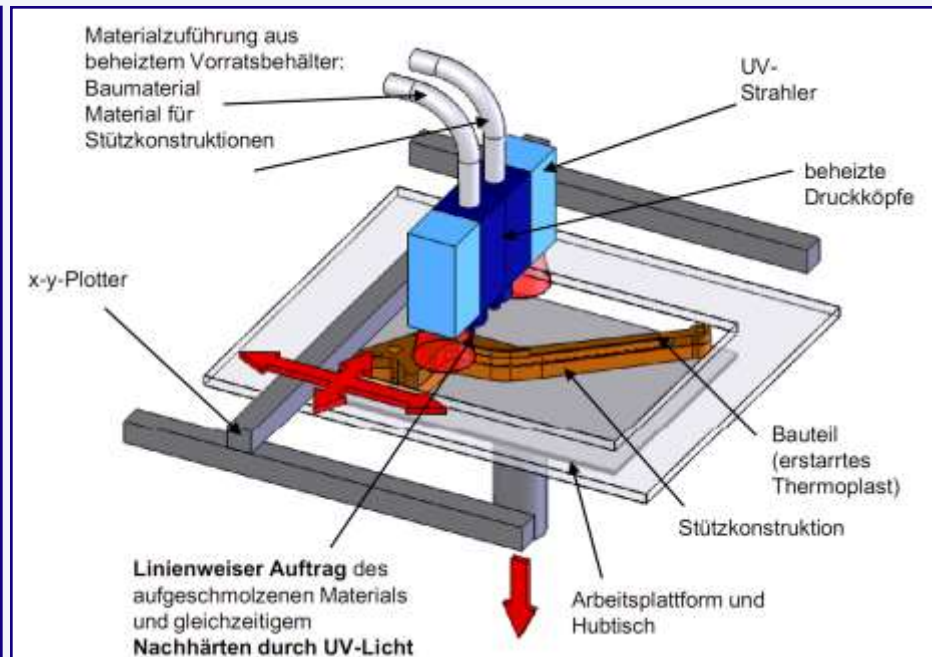


Grundprinzip

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

Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

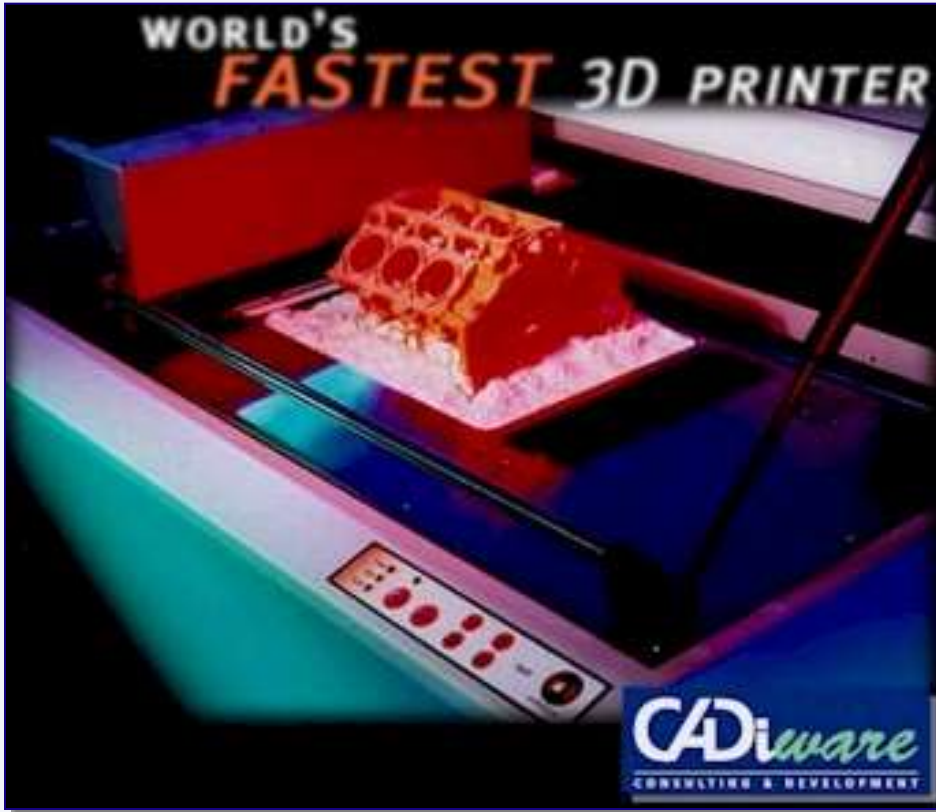
Poly Jet Modeling



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

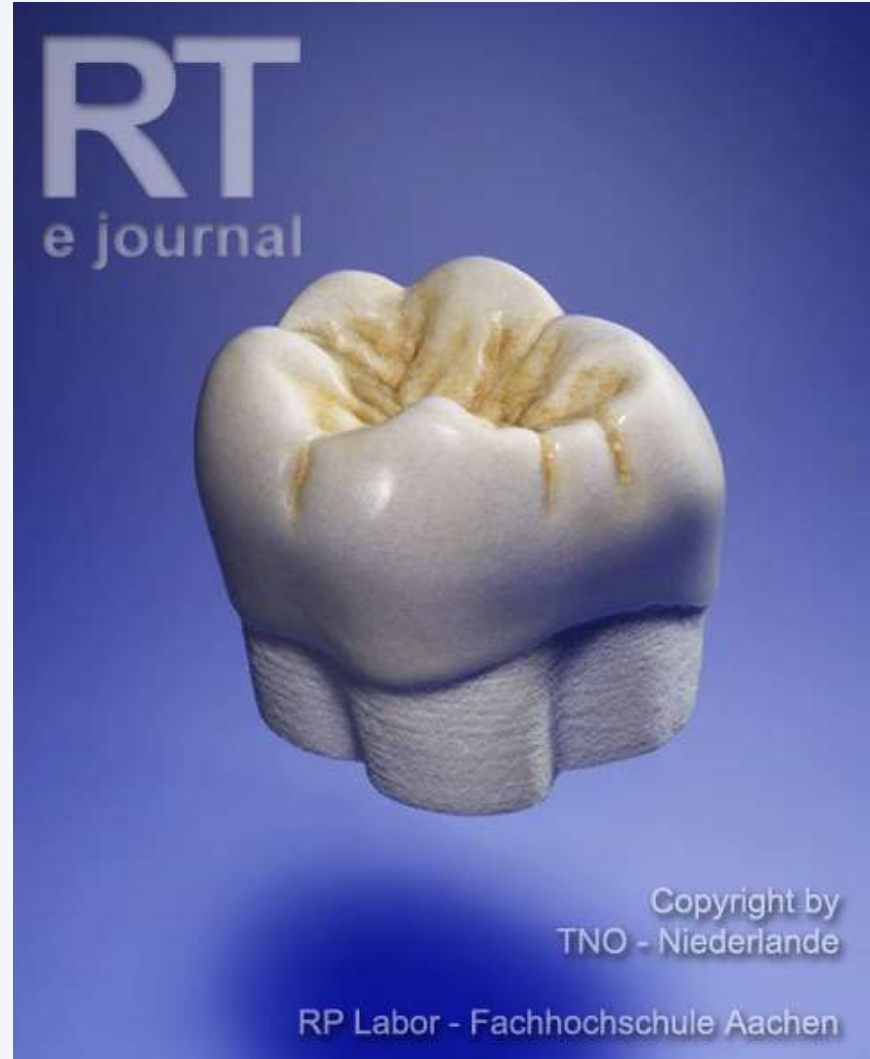


CADiware: Z402 3D Printer

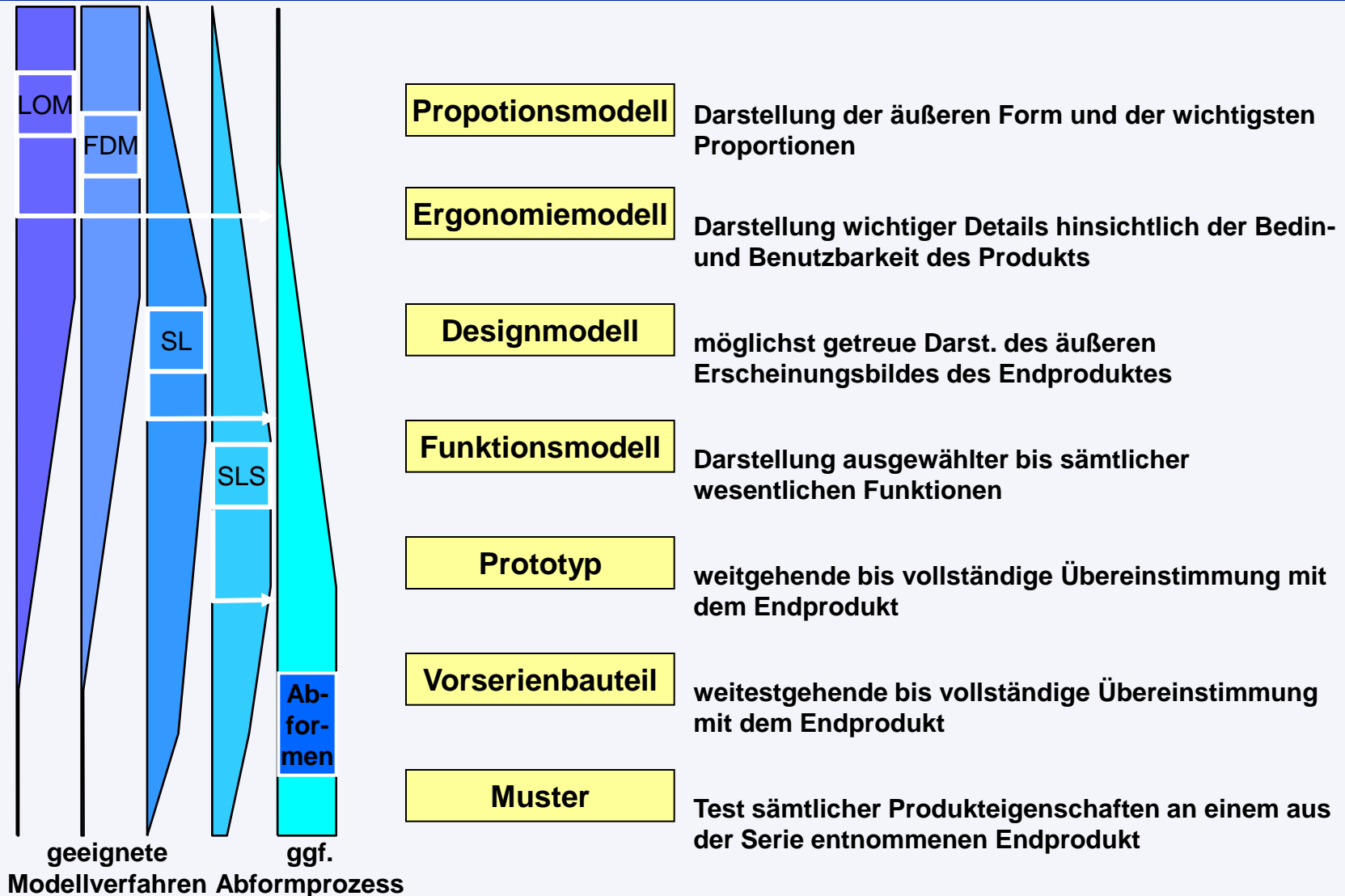
3D Printing: Beispiele (CADIware)



3D Printing: Beispiele



Zuordnung von Rapid Prototyping Verfahren



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.