

# ***Werkzeugmaschinen***

**Prof. Dr.-Ing. D. Bergers / PD 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 Spielzeugsisenbahn 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, .....**

## Literaturhinweise



### **Bruins/Dräger**

Werkzeuge und  
Werkzeugmaschinen

2. Auflage, Carl Hanser Verlag

### **Charcut/Tschätsch**

Werkzeugmaschinen

5. Auflage, Hanser Verlag

### **A. Hirsch**

Werkzeugmaschinen

1. Auflage, Vieweg Verlag

### **B. Perović**

Werkzeugmaschinen

1. Auflage, Vieweg Verlag

### **Prof. Reinhart**

Spanende Werkzeugmaschinen  
(Script zur Vorlesung 1999)

### **H. K. Tönshoff**

Werkzeugmaschinen

1. Auflage, Springer Verlag

### **Prof. Uhlmann**

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

### **M. Weck**

Werkzeugmaschinen  
Fertigungssysteme Band 2-3.2

4. Auflage, VDI Verlag

### **M. Weck – K. Teipel**

Dynamisches Verhalten spanender  
Werkzeugmaschinen

1. Auflage, Springer Verlag

### **H. Witte**

Werkzeugmaschinen

3. Auflage, Vogel Verlag

# *Einleitung*

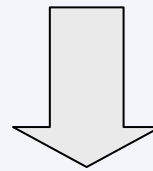


# Das industrielle Produktionssystem

## *Industrielles Produktionssystem*

### **Ziel:**

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



### *Energietechnik*

- Energieerzeugung
- Energieumformung
- Energieverteilung

### *Materialtechnik*

#### *Verfahrenstechnik*

- Stofferzeugung
- Wandlung von physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften

#### *Fertigungstechnik*

- Formgebung von Bauteilen
- Montage zu gebrauchsfähigen Erzeugnissen

#### *Fördertechnik*

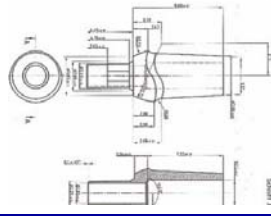
- Transport und Handhabung von Gütern unter zeitlicher und örtlicher Bestimmung

### *Informationstechnik*

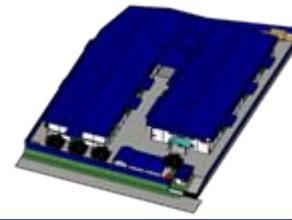
- Informationserstellung
- Informationsverarbeitung
- Informationsverteilung

# Elemente eines Produktionssystems

## Informationen



## Räume



## Energie



## Personal



## Produktionsprozess

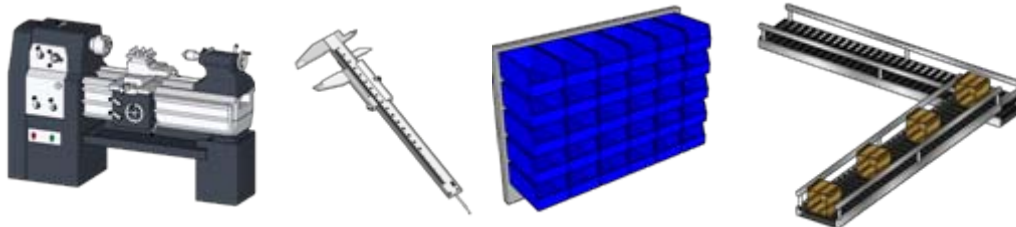
- Rohmaterialien
- Halbzeuge
- Bauteile

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

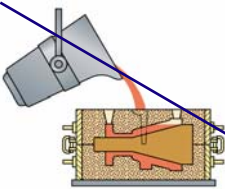
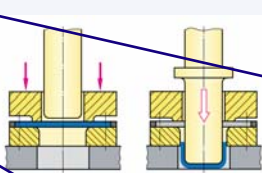
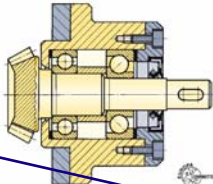
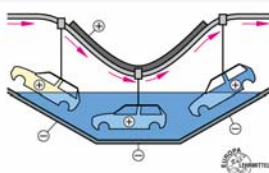
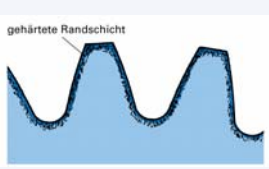
Fertigen ist das Erzeugen von Werkstücken geometrisch bestimmter Gestalt ( *Grundbegriffe*: Maschine, Werkstück, Werkzeug ). Die Fertigung läuft an der Wirkstelle zwischen Werkzeug und Werkstück ab. Energie und Formdefinition werden von der Maschine über das Werkzeug auf das Werkstück übertragen.

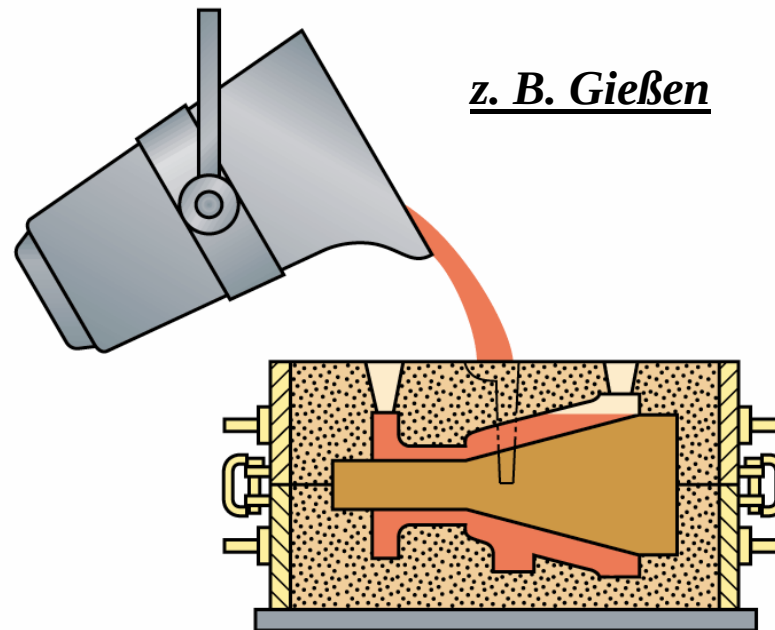
## Einteilung der Fertigungsverfahren

nach DIN 8580

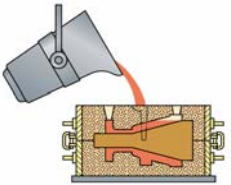
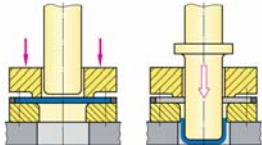
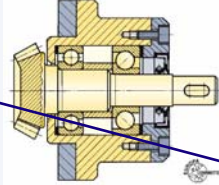
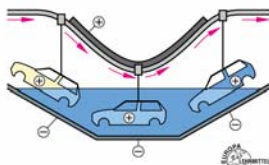
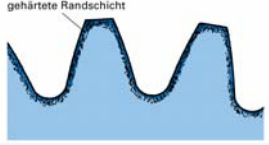
| Zusammenhalt Schaffen                     | Zusammenhalt beibehalten                                                                                                                                 | Zusammenhalt vermindern | Zusammenhalt vermehren |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------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

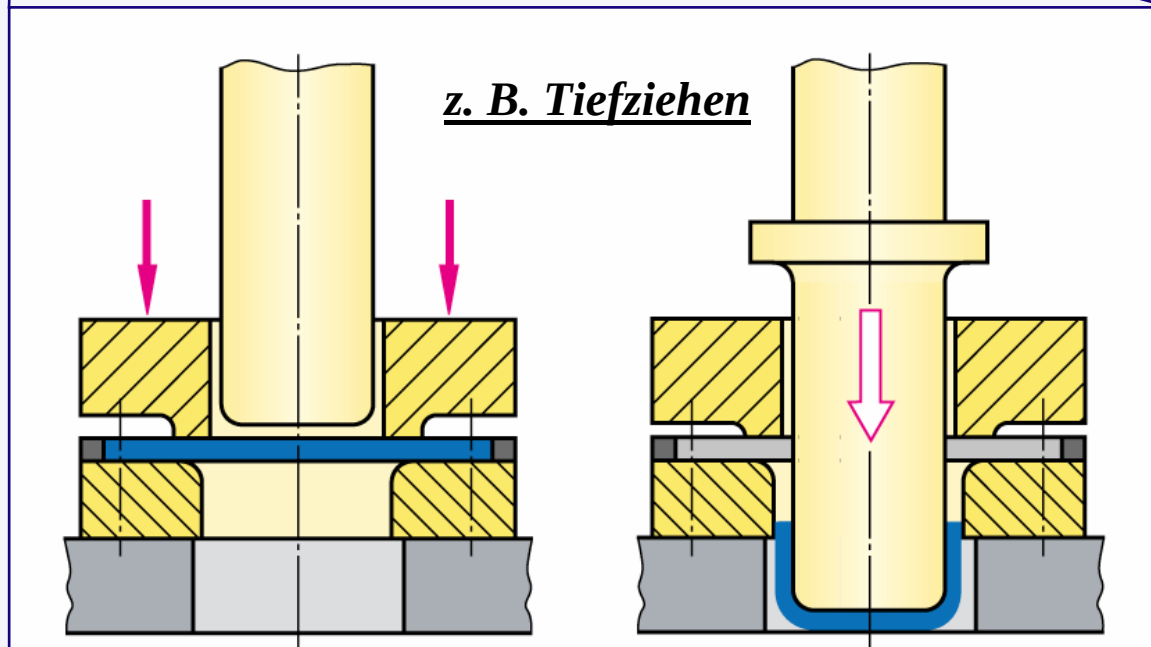
## Gliederung der Fertigungsverfahren

| 1.<br>Urformen                                                                   | 2.<br>Umformen                                                                    | 3.<br>Trennen                                                                     | 4.<br>Fügen                                                                         | 5.<br>Beschichten                                                                   | 6.<br>Stoffeigenschaft<br>ändern                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |

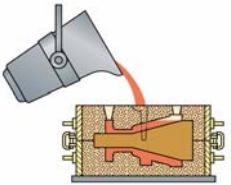
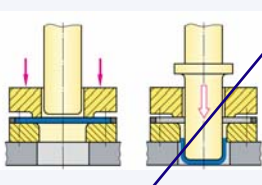
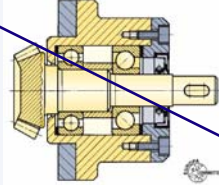
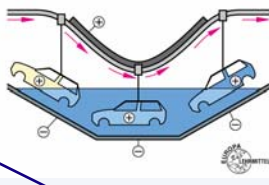
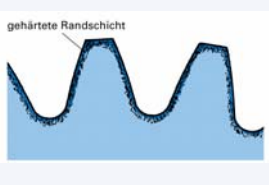


## Gliederung der Fertigungsverfahren

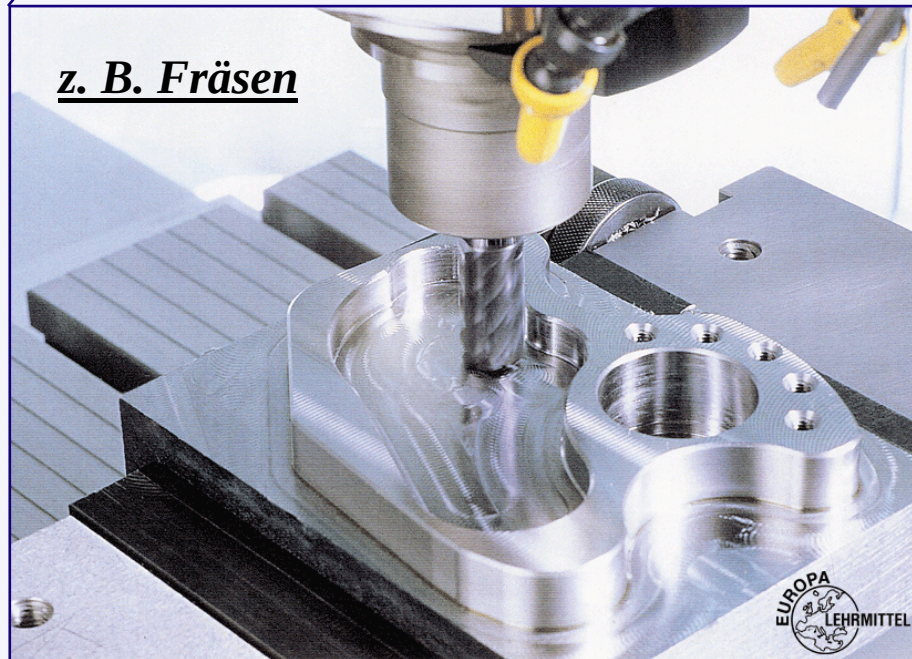
| 1.<br>Urformen                                                                   | 2.<br>Umformen                                                                    | 3.<br>Trennen                                                                     | 4.<br>Fügen                                                                         | 5.<br>Beschichten                                                                   | 6.<br>Stoffeigenschaft<br>ändern                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |



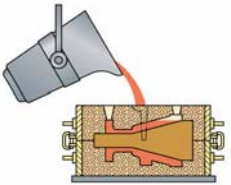
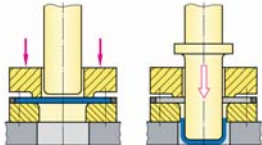
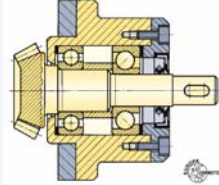
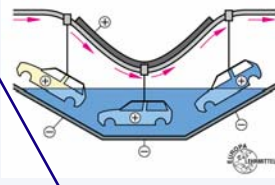
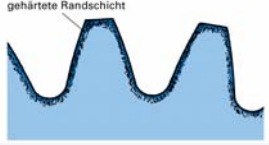
## Gliederung der Fertigungsverfahren

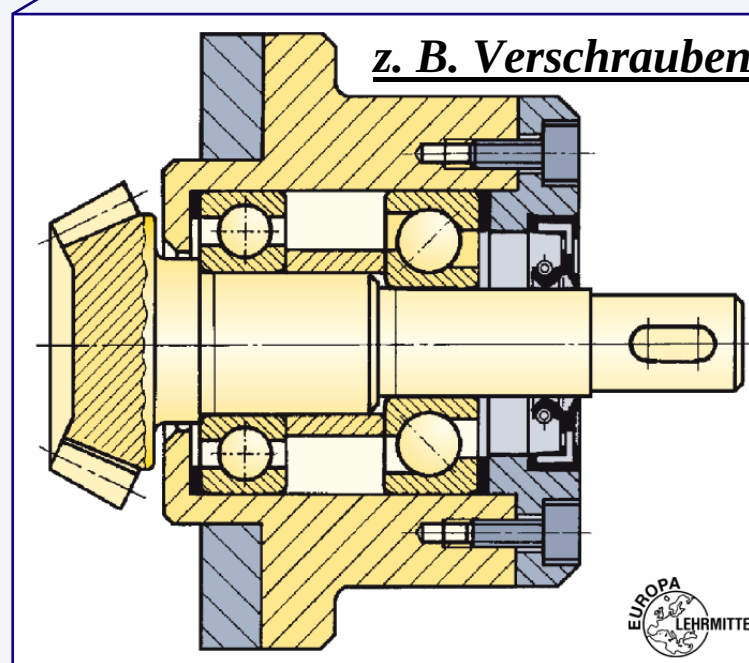
| 1.<br>Urformen                                                                   | 2.<br>Umformen                                                                    | 3.<br>Trennen                                                                     | 4.<br>Fügen                                                                         | 5.<br>Beschichten                                                                   | 6.<br>Stoffeigenschaft<br>ändern                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |

z. B. Fräsen

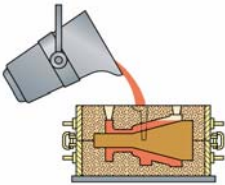
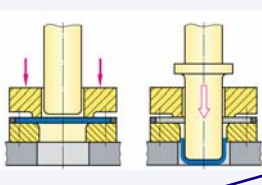
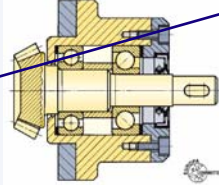
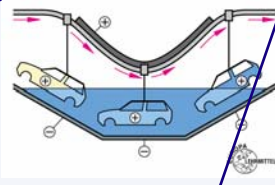
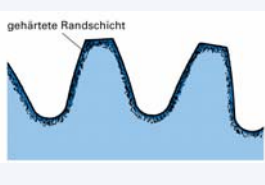


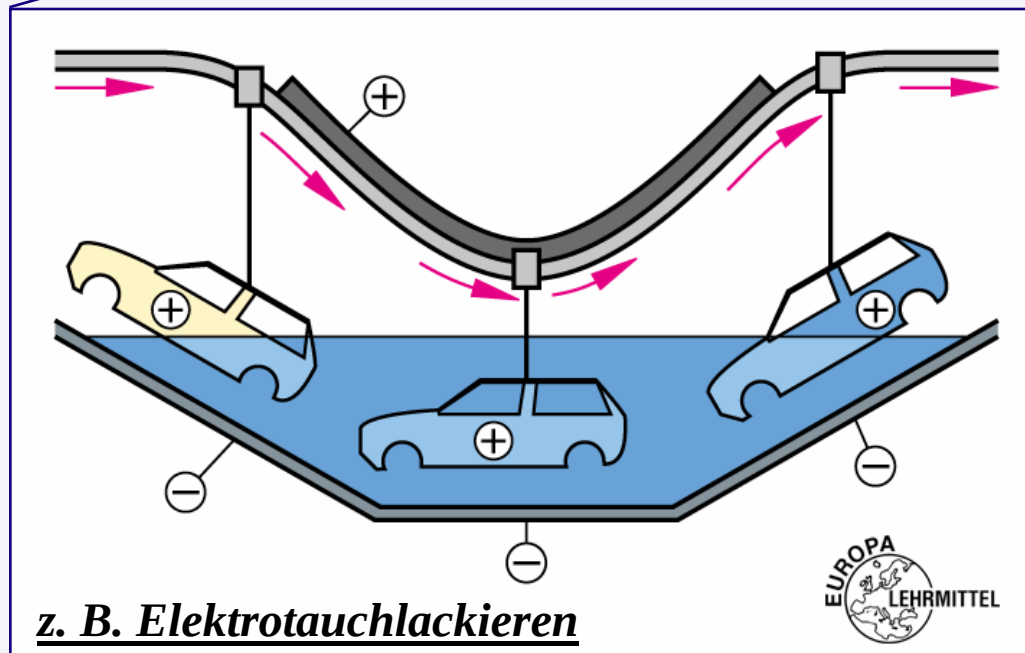
# Gliederung der Fertigungsverfahren

| 1.<br>Urformen                                                                   | 2.<br>Umformen                                                                    | 3.<br>Trennen                                                                     | 4.<br>Fügen                                                                         | 5.<br>Beschichten                                                                   | 6.<br>Stoffeigenschaft<br>ändern                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |

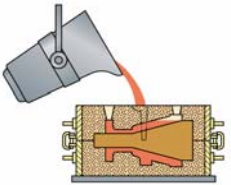
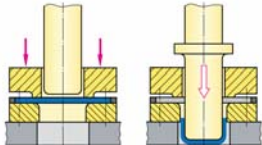
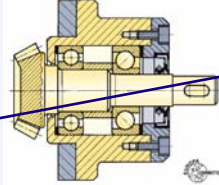
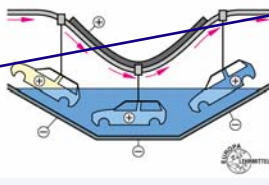
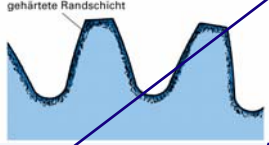


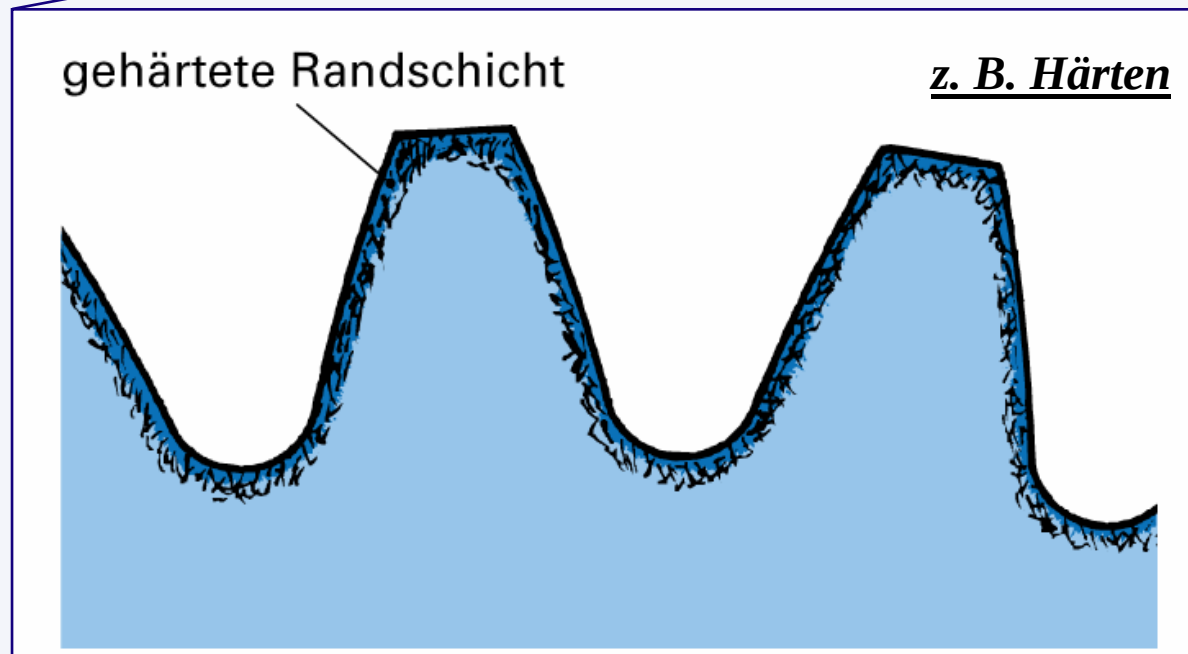
## Gliederung der Fertigungsverfahren

| 1.<br>Urformen                                                                   | 2.<br>Umformen                                                                    | 3.<br>Trennen                                                                     | 4.<br>Fügen                                                                         | 5.<br>Beschichten                                                                   | 6.<br>Stoffeigenschaft<br>ändern                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |



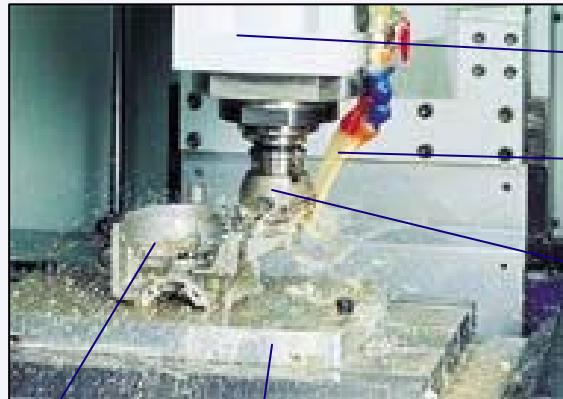
## Gliederung der Fertigungsverfahren

| 1.<br>Urformen                                                                   | 2.<br>Umformen                                                                    | 3.<br>Trennen                                                                     | 4.<br>Fügen                                                                         | 5.<br>Beschichten                                                                   | 6.<br>Stoffeigenschaft<br>ändern                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |



## Einschub: Fräsen und Bohren

### Der Fräsprozeß



Z-Schlitten

Kühlmittel

Fräser

Quelle: WZM-Markt

Werkstück

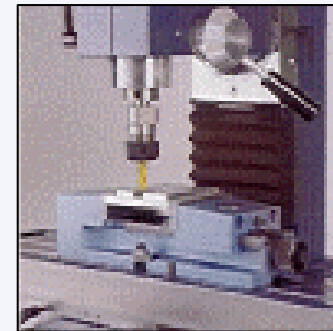
Maschinentisch  
(Kreuztisch für x-  
und y-Bewegung)

### Frästeil



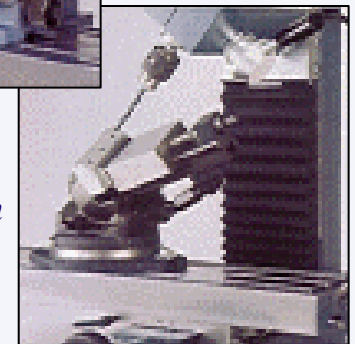
Hinterschnidungen sind nicht  
möglich! (Quelle: Mastercam)

### Fräsen und Bohren



Vertikalfräsen

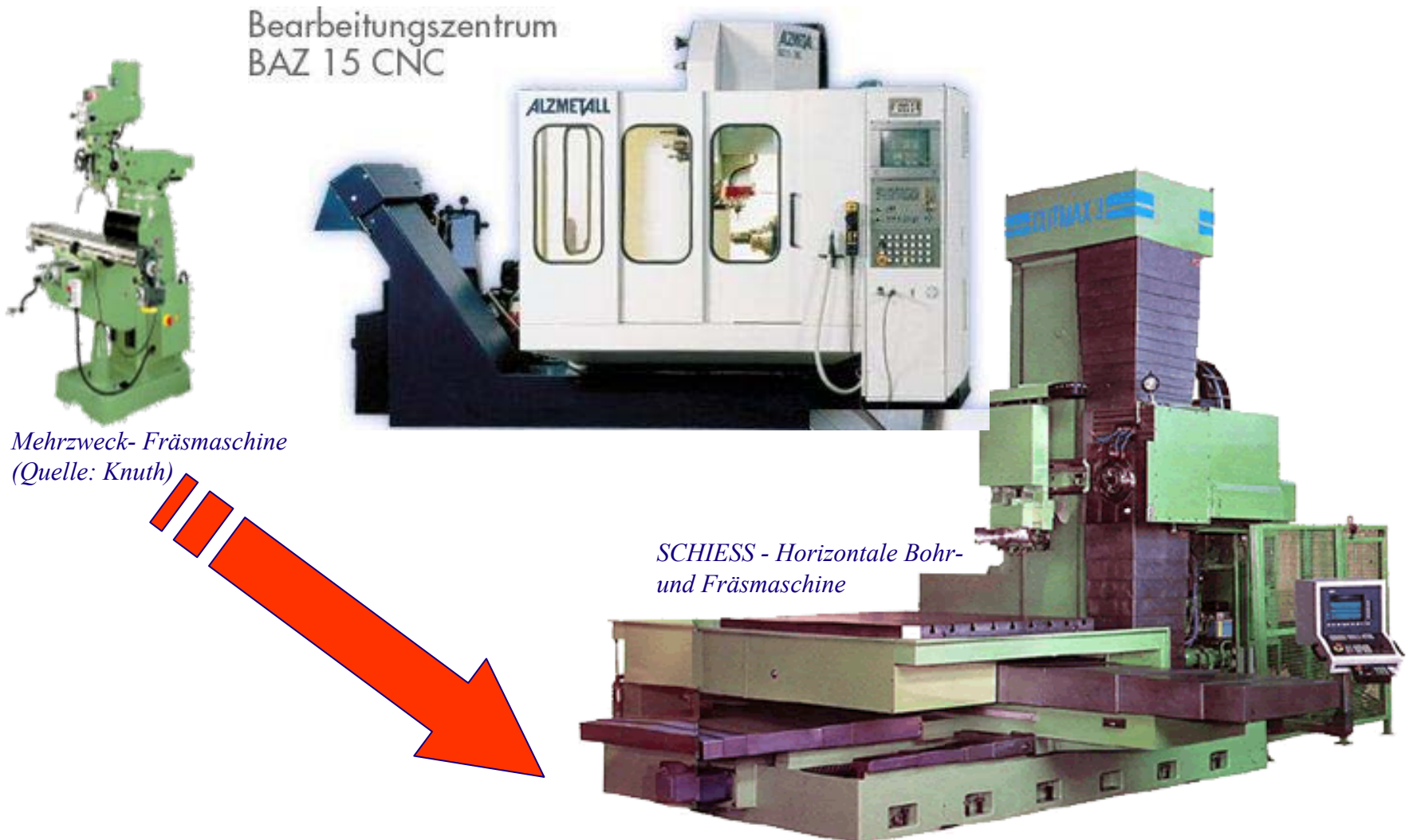
Quelle: Baxmeier



Schrägbohren  
(45 Grad)

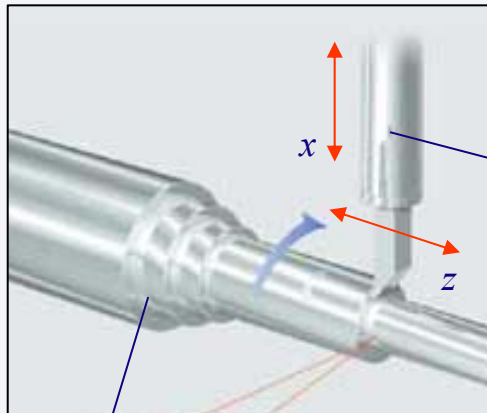
Quelle: Baxmeier

## Fräsen und Bohren: Maschinenbeispiele



## Einschub: Drehen

### Der Drehprozeß



Werkzeug  
(Drehmeißel)

Quelle: Keyence

Werkstück



Werkzeugaufnahme  
mit Werkzeug

Werkstück

Quelle: Berufenet / Arbeitsamt

Werkstückaufnahme

### Drehteil

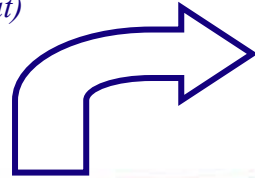


Drehteile sind stets  
rotationssymmetrisch!

## Drehen: Maschinenbeispiele

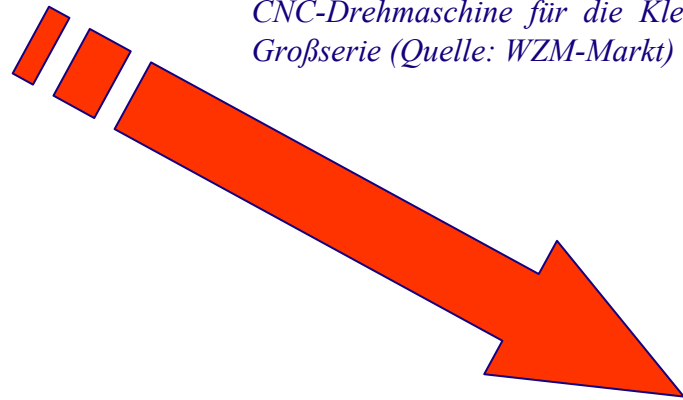


*Feinmechaniker-Drehmaschine  
(Quelle: Unimat)*



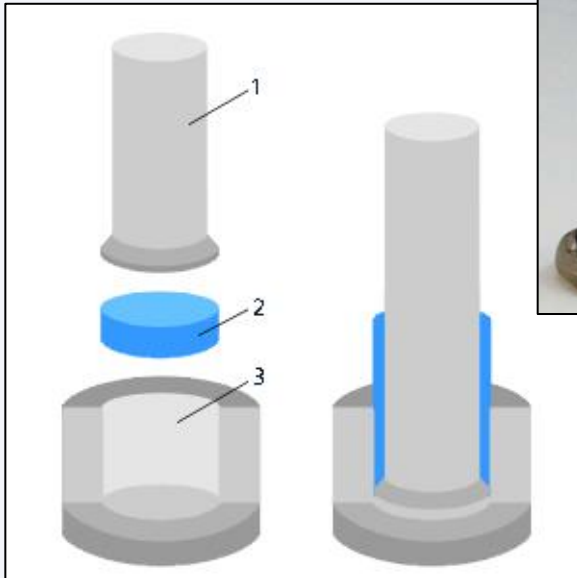
*CNC-Drehmaschine für die Klein- und  
Großserie (Quelle: WZM-Markt)*

*Schwerdrehmaschine (Quelle: Surplex)*



## Einschub: Umformen (ausgewählte Verfahren)

### Fließpressen

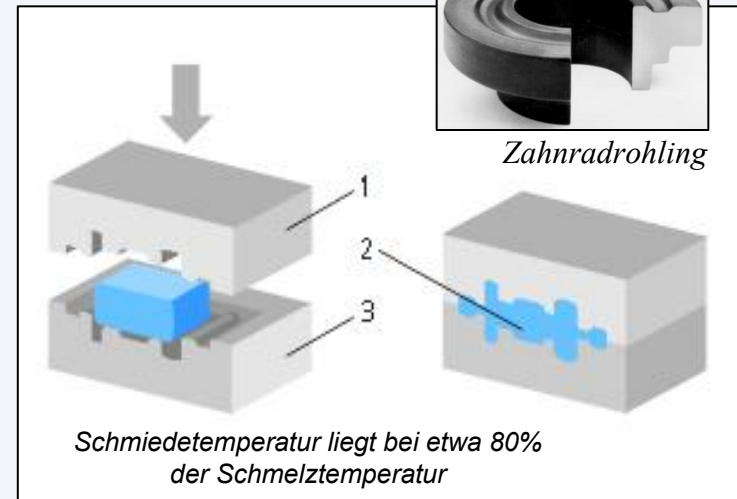


1 Stempel 2 Werkstück 3 Pressform



Schweißbolzen

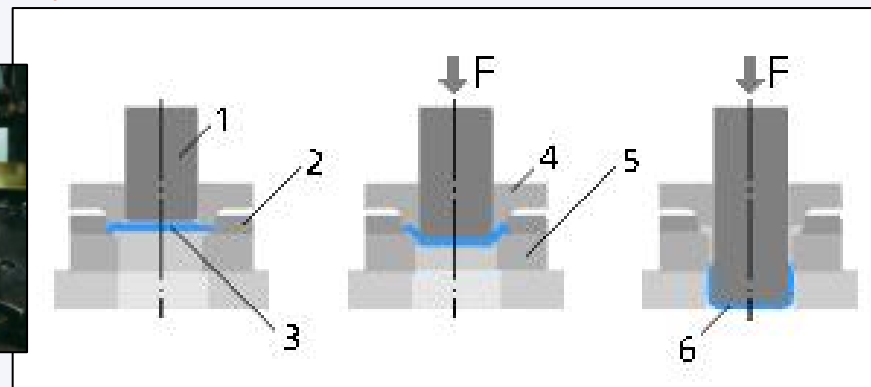
### Gesenkschmieden



1 Obergesenk 2 Werkstück 3 Untergesenk

Schmiedetemperatur liegt bei etwa 80%  
der Schmelztemperatur

### Tiefziehen



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

Gewindehülsen



## Umformen: Maschinenbeispiele (mechanische Pressen)



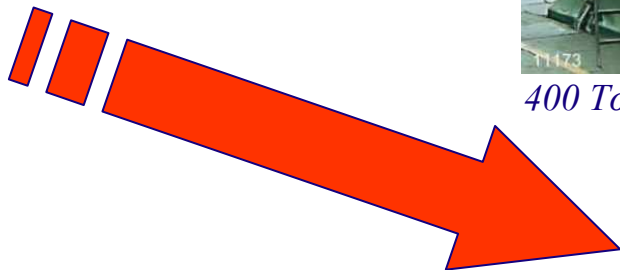
60 Tonnen



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.**

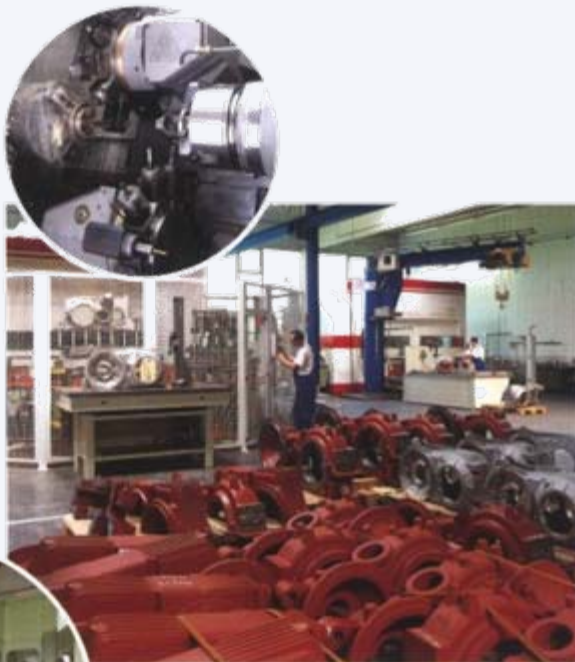
## Definition einer Werkzeugmaschine

### Gliederung der Fertigungsmaschinen

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

## Definition einer Werkzeugmaschine

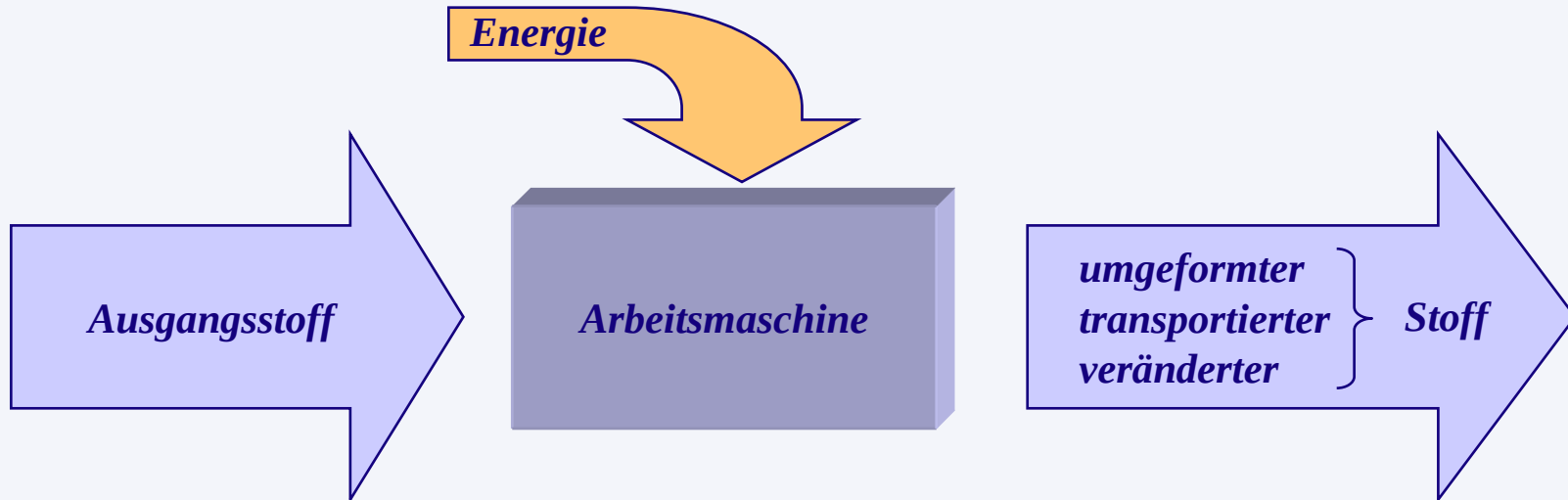
**Fertigungsmaschinen zum Umformen, Trennen und Fügen werden nach DIN 69651 als Werkzeugmaschine bezeichnet.**



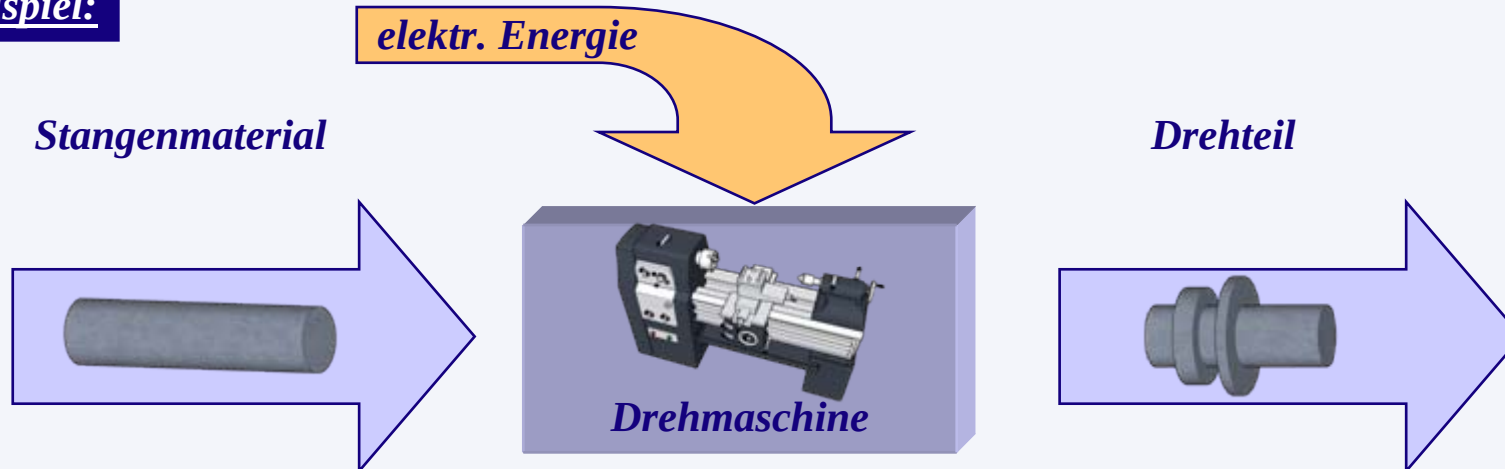
Werkzeugmaschinen werden in der Literatur definiert als „mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen“.



## 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*

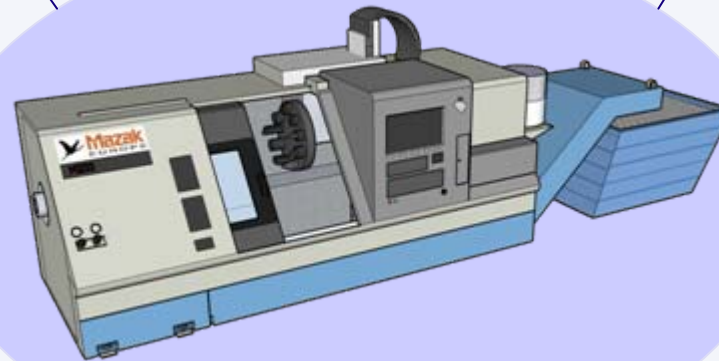
*Impulsgeber für  
Rationalisierung und  
Automatisierung der  
Produktion*

*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](http://www.mazak.de)*

## Eckdaten des Maschinenbaus (Daten für 2008 / Quelle: VDMA)

| Bezeichnung                                     | Einheit            | 2000                  | 2001             | %-Änderung<br>2001/2000 |
|-------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|
| <b>Unternehmen</b> <sup>1</sup>                 | Anzahl             | 5.836                 |                  |                         |
| <b>Beschäftigte</b>                             | 1.000              | 892                   | 902              | 1,2                     |
| <b>Umsatz</b>                                   | Mrd.<br>EUR        | 128,9                 | 133,1            | 3,2                     |
| <b>Exportquote</b>                              | Prozent            | 63,8                  | 66,8 (Schätzung) |                         |
| <b>Welthandelsanteil</b>                        | Prozent            | 18,6<br>(1999: 20%)   |                  |                         |
| <b>Wichtigste<br/>Exportmärkte</b> <sup>2</sup> | <b>Mio<br/>EUR</b> | <b>2001/2000 in %</b> |                  | <b>%-Anteil</b>         |
| USA                                             | 9.681,6            | 3,9                   |                  | 12,2                    |
| Frankreich                                      | 6.560,5            | 3,2                   |                  | 8,3                     |
| Italien                                         | 4.914,8            | 8,5                   |                  | 6,2                     |
| Vereinigtes Königreich                          | 4.318,7            | -3,1                  |                  | 5,5                     |
| Spanien                                         | 3.466,6            | 24,0                  |                  | 4,4                     |

<sup>1</sup> Angaben der Unternehmen ab 20 Beschäftigten

<sup>2</sup> Deutscher Anteil an den Maschinenexporten der wichtigsten Maschinenlieferländer

*Der Maschinenbau ist sehr stark mittelständisch geprägt. Die knapp 6.000 Unternehmen beschäftigen im Durchschnitt 155 Personen. Zwei Drittel der Unternehmen haben sogar weniger als 100 Beschäftigte. Bemerkenswert ist zudem der hohe Exportanteil der Branche. Zwei von drei in Deutschland produzierten Maschinen gehen ins Ausland, davon sind rund 33% für Europa bestimmt. Um ihre Spitzenposition in der Welt zu behaupten, investieren die deutschen Unternehmen jährlich 3,9 Mio. EUR in Forschung und Entwicklung.*

## Die größten Industriezweige (Daten für 2001 / Quelle: VDMA)

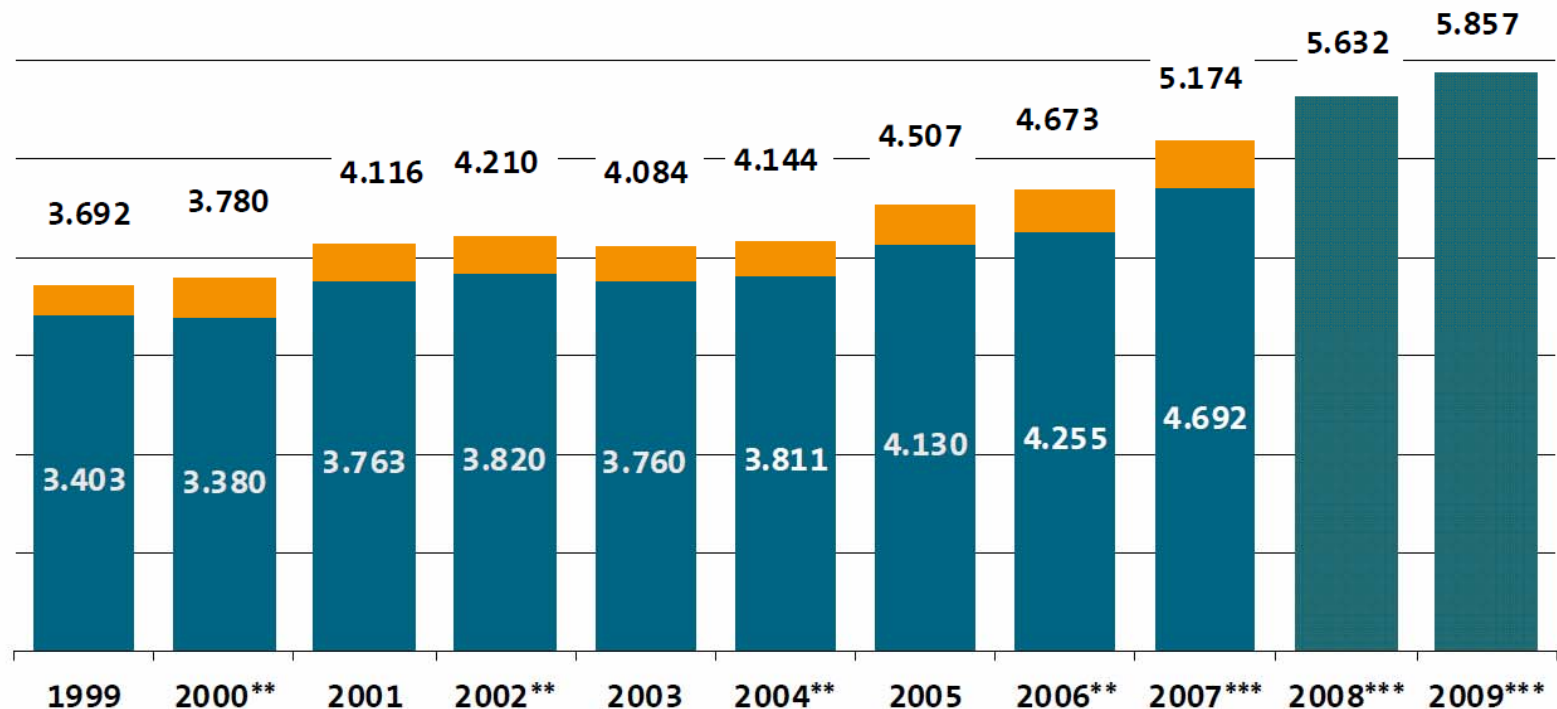
| Wirtschaftsgruppe         | Zahl der Unternehmen<br>2000 | Beschäftigte in Tsd.<br>Jahresdurchschnitt |       | % - Änderung<br>zum Vorjahr | Umsatz Mrd.<br>EUR |       | % - Änderungen<br>zum Vorjahr |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|-------|-----------------------------|--------------------|-------|-------------------------------|
|                           |                              | 2000                                       | 2001  |                             | 2000               | 2001  |                               |
| Maschinenbau              | 5.836                        | 892                                        | 905   | 1,2                         | 129                | 133   | 3,2                           |
| Elektrotechnik            | 3.414                        | 843                                        | 855   | 1,4                         | 149                | 149   | -0,5                          |
| Straßenfahrzeugbau        | 1.007                        | 757                                        | 779   | 2,9                         | 190                | 204   | 7,0                           |
| Chemische Industrie       | 1.282                        | 452                                        | 448   | -0,9                        | 109                | 107   | -1,3                          |
| Ernährungs-<br>gewerbe    | 5.448                        | 523                                        | 518   | -1,1                        | 106                | 112   | 5,0                           |
| Verarbeitendes<br>Gewerbe | 40.052                       | 6.106                                      | 6.134 | 0,4                         | 1.128              | 1.150 | 1,9                           |

*Auch im Jahr 2001 hat der Maschinenbau seine Position als größter industrielle Arbeitgeber in Deutschland behaupten können. Damit liegt der Maschinenbau vor der Elektrotechnik und dem Straßenfahrzeugbau. Der Pro-Kopf-Umsatz im Maschinenbau betrug im Jahre 2001 rund 147 TEUR.. Hier liegt die Branche deutlich hinter dem Straßenfahrzeugbau und der Elektrotechnik. Die Differenzen sind durch die unterschiedliche Fertigungsart- und tiefe zu erklären. Während im Fahrzeugbau und der Elektrotechnik Großserienfertigung mit weitgehend standardisierten Komponenten vorherrschen, dominiert im Maschinenbau die Einzelfertigung bzw. Kleinserie.*

## FuE-Aufwendungen des Maschinenbaus

in Mill. Euro

■ interne FuE ■ externe FuE



\*) Maschinenbau inkl. Waffen und Haushaltsgeräte

\*\*) Erhebung bei ausgewählten Unternehmen, Plandaten der Institutionen für Gemeinschaftsforschung

\*\*\*) vorläufige oder Plandaten; Stand: Dez. 2008

Quelle: Stifterverband Wissenschaftsstatistik

# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

## Kapazitätsauslastung und Auftragsbestand der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie Capacity utilization and order backlog of the German machine tool industry

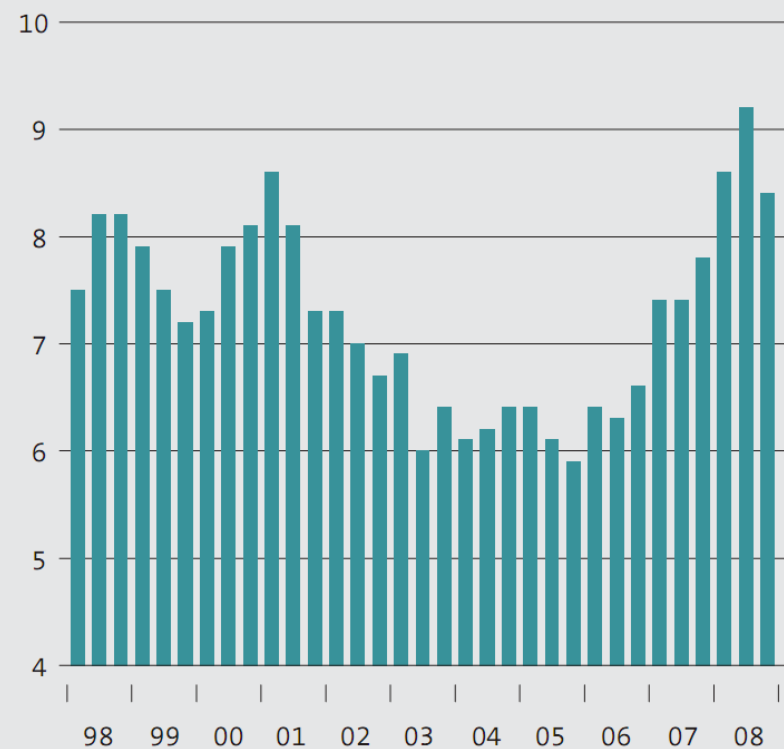
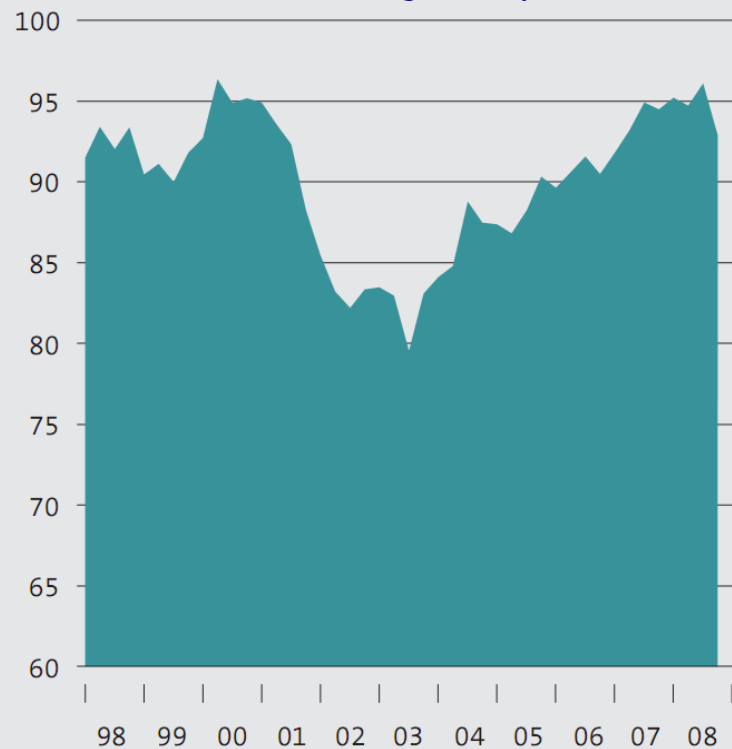
Kapazitätsauslastung (%)\*  
Capacity utilization (%)\*

\* Okt 08 = 92,9%

Jan 09 = 83,0%

Quellen: Ifo-Institut, VDMA

Auftragsbestand (Monate)  
Order backlog (months)



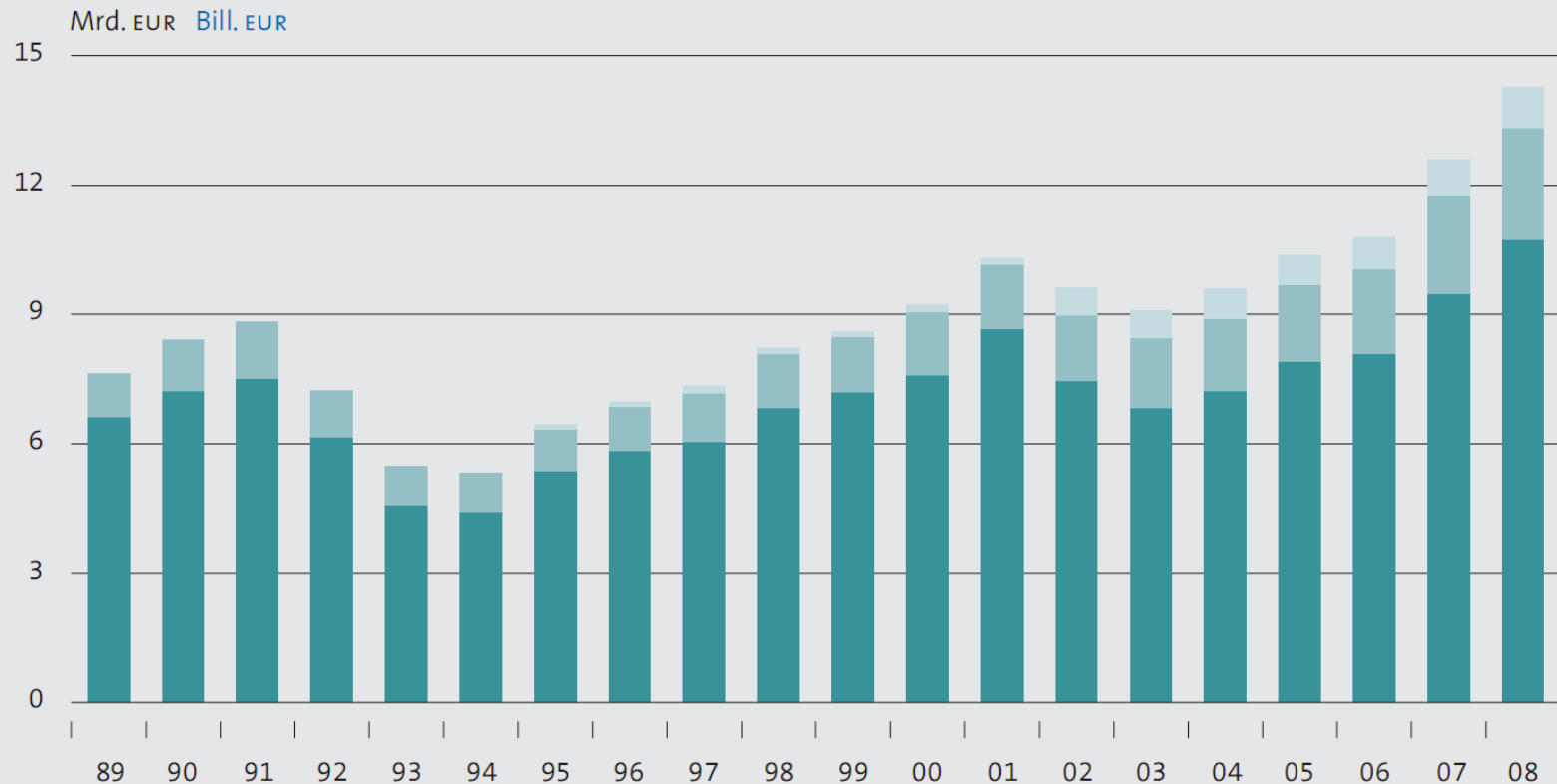
# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

## Werkzeugmaschinen-Produktion Deutschland

### Machine tool production Germany

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

2008 = 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

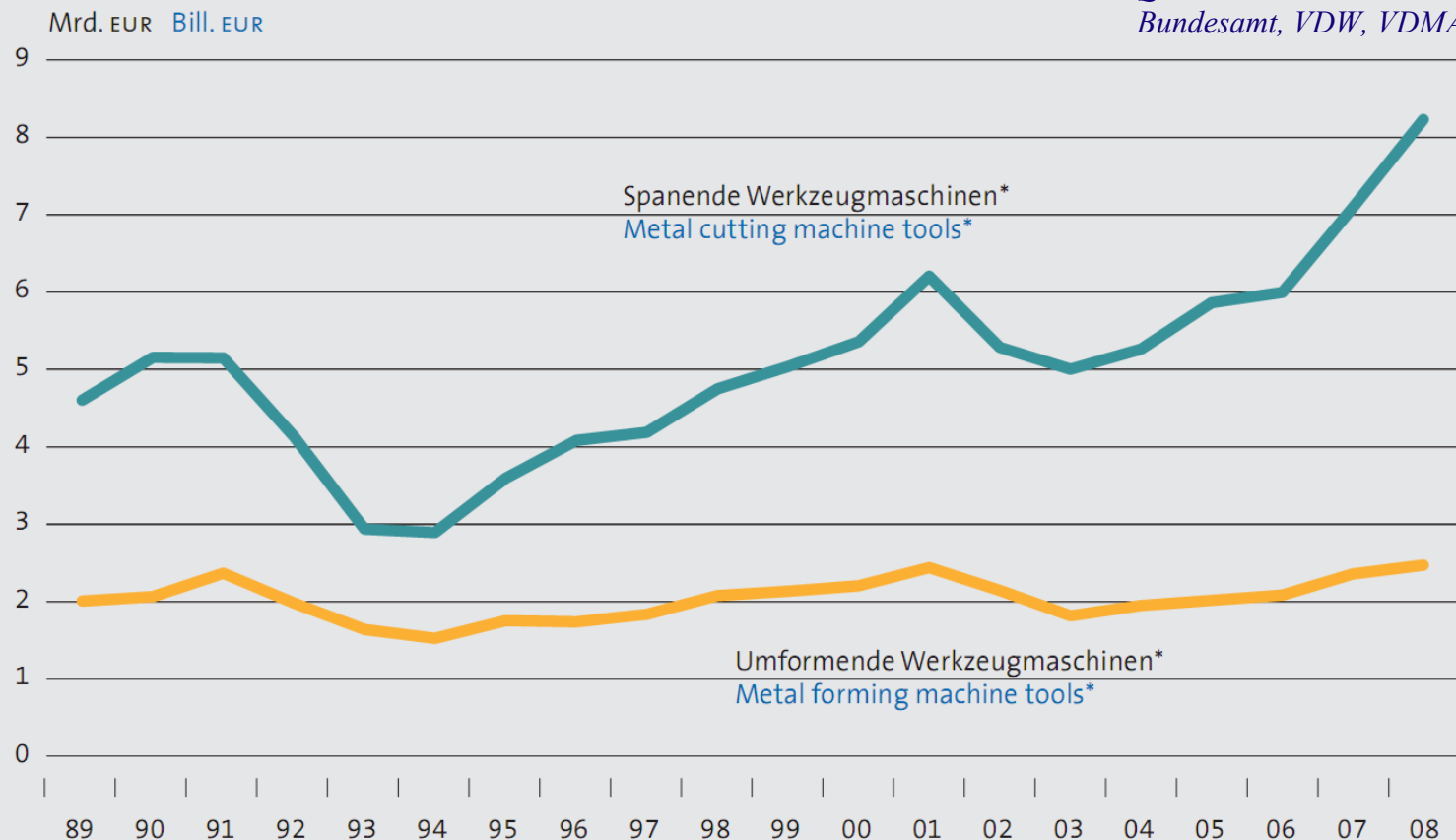
### Production of metal cutting and forming machine tools in Germany

2008 = VDW-Schätzung

\* ohne Teile, Zubehör

Quellen: Statistisches

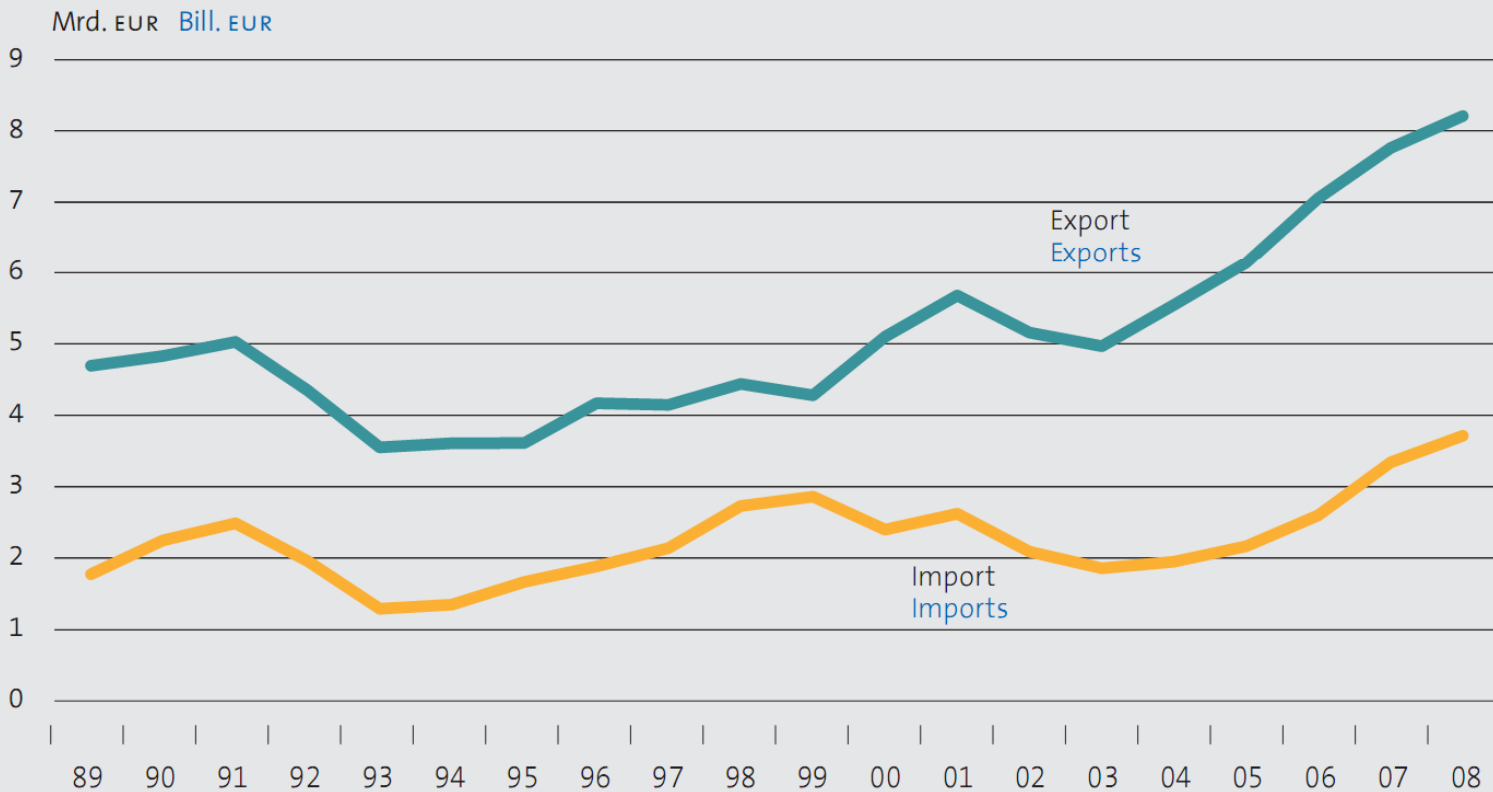
Bundesamt, VDW, VDMA



# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

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



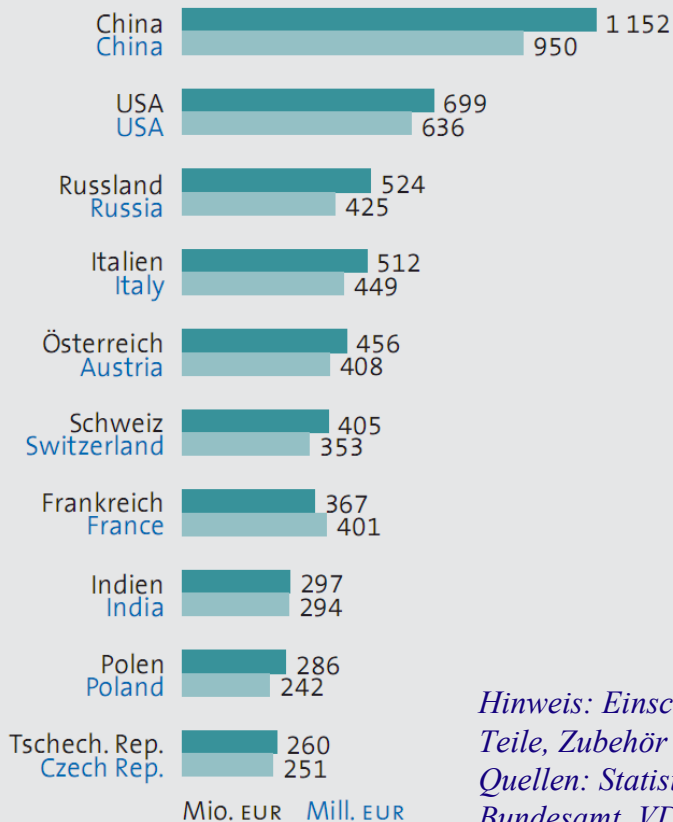
# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

## Deutscher Werkzeugmaschinen-Export: Wichtigste Absatzmärkte

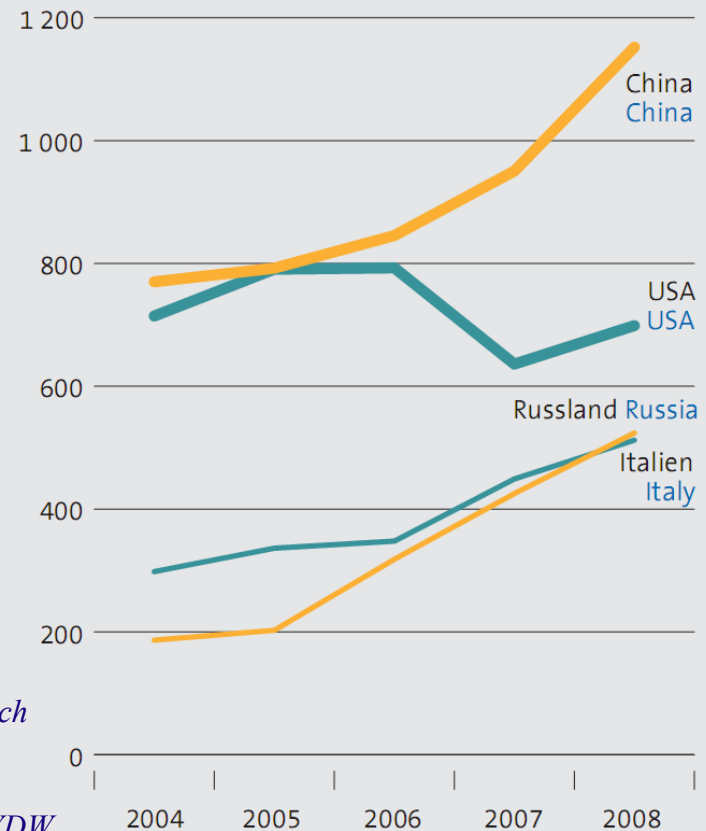
### German machine tool exports: major customer markets

Top-10-Absatzmärkte  
Top 10 customer markets

■ 2008  
■ 2007



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



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

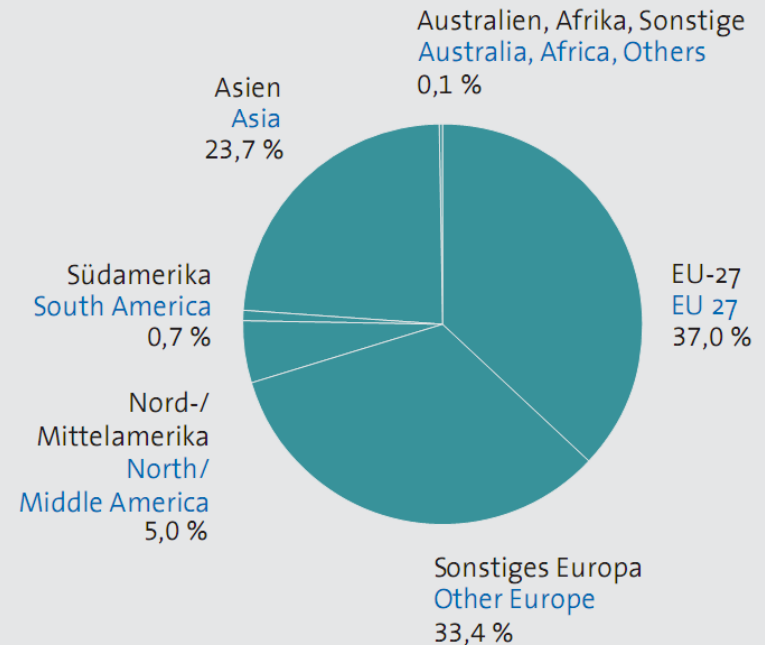
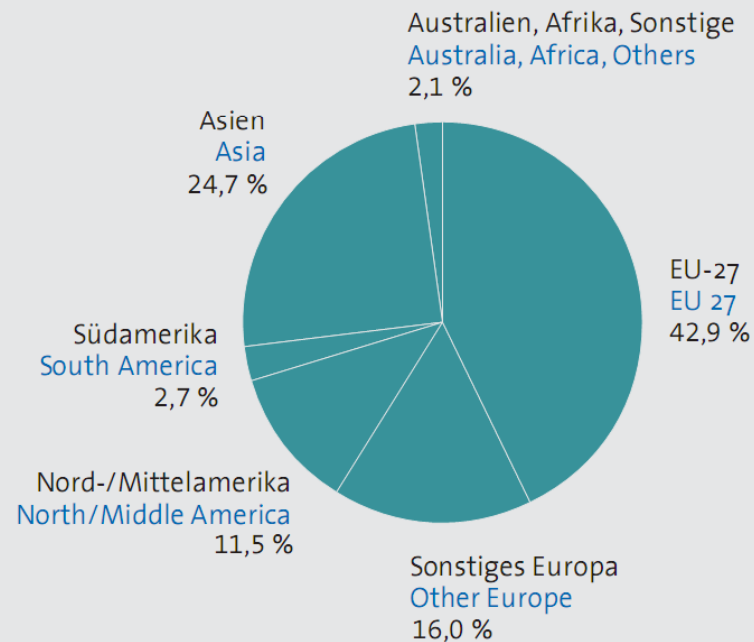
# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

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

Export 2008 = 8 206 Mio. EUR  
Exports 2008 = 8 206 mill. EUR

Import 2008 = 3 712 Mio. EUR  
Imports 2008 = 3 712 mill. EUR



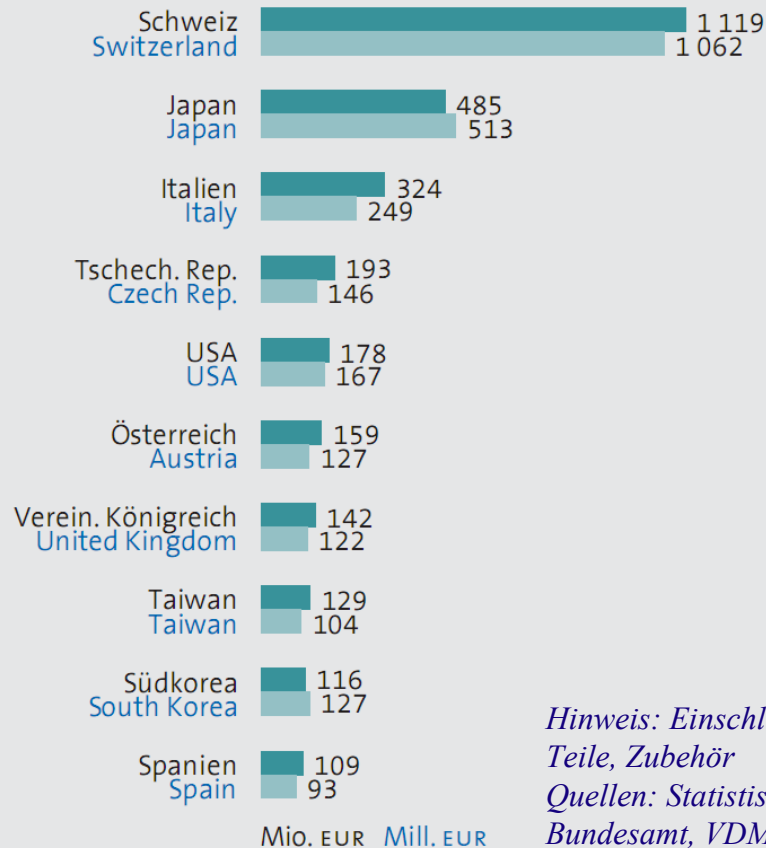
# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

## Deutscher Werkzeugmaschinen-Import: Wichtigste Lieferländer

### German machine tool imports: major supplier countries

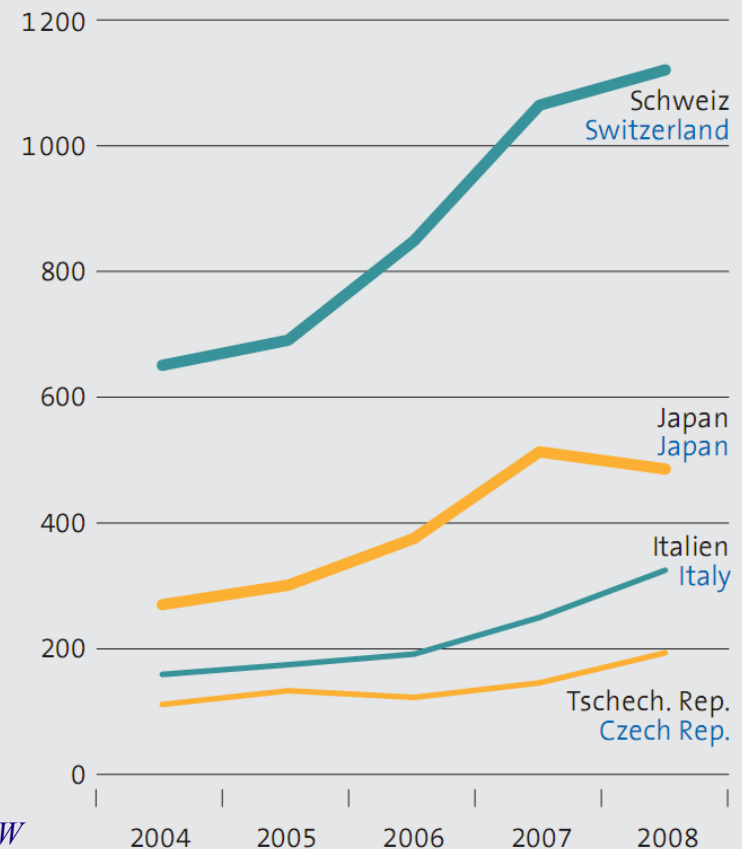
Top-10-Lieferländer  
Top 10 supplier countries

2008  
2007



Entwicklung der Top-4-Lieferländer (Mio. EUR)

Development of the top 4 supplier countries (mill. EUR)

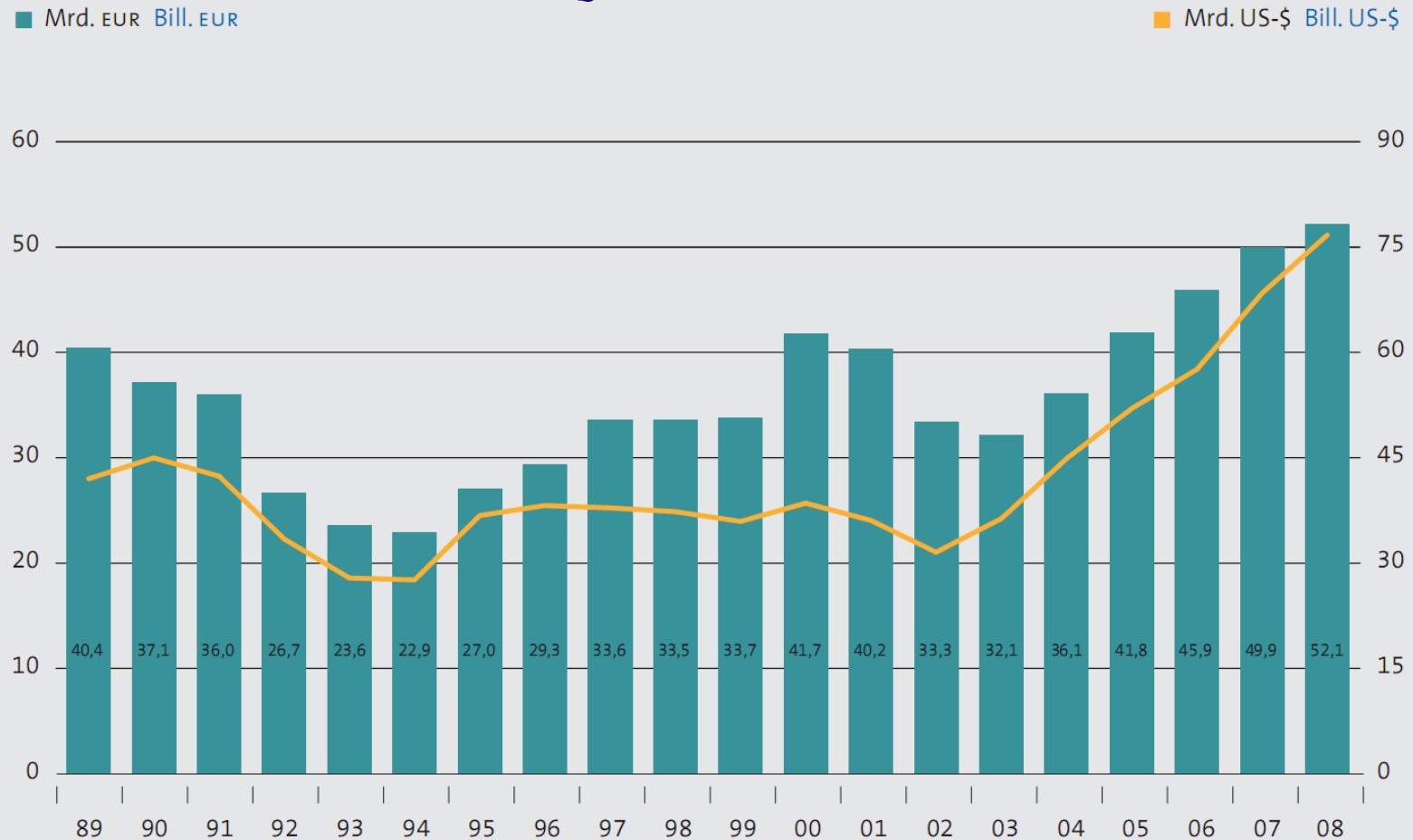


*Hinweis: Einschließlich  
Teile, Zubehör  
Quellen: Statistisches  
Bundesamt, VDMA, VDW*

# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

## Welt-Produktion Werkzeugmaschinen World machine tool production

*Hinweis: revidierte  
Zeitreihe; ohne Teile, Zubehör;  
2008 = Schätzung  
Quelle: VDW*



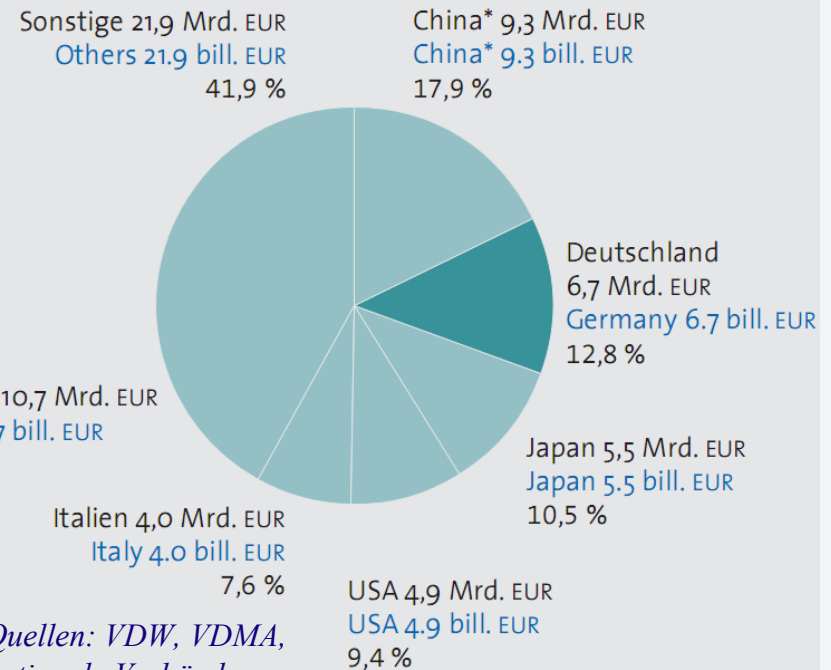
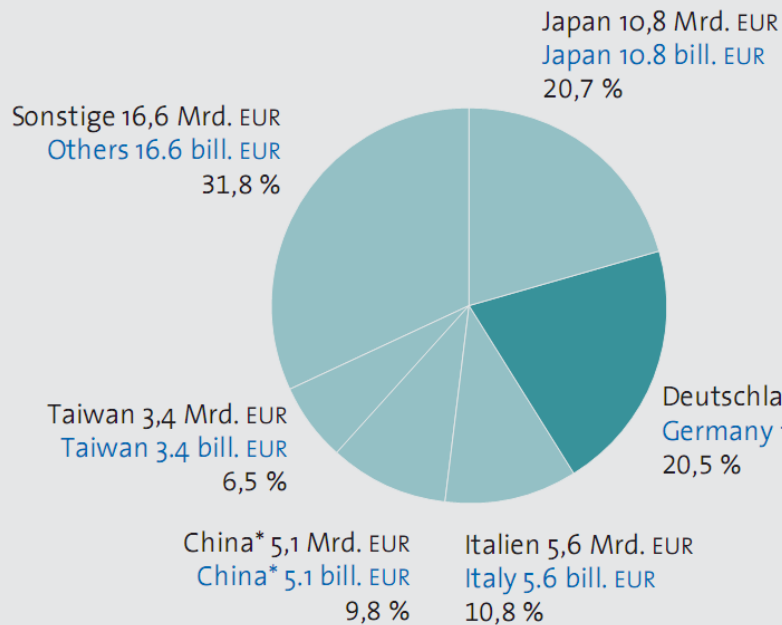
# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

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

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

*\* VDW-Bereinigung von  
Produktion und Export um  
40% => Verbrauch um  
23% (vgl. Anhang,  
methodische Hinweise);  
Hinweis: Ohne Teile,  
Zubehör; 2008 =  
Schätzungen; VDW-  
Annahme: Welt-Produktion  
= Welt-Verbrauch*



Welt-Produktion = Welt-Verbrauch 2008: 52,1 Mrd. EUR  
World production = world consumption 2008: 52.1 bill. EUR

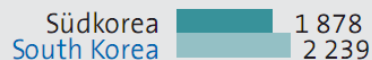
Quellen: VDW, VDMA,  
nationale Verbände,  
Gardner publications

# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

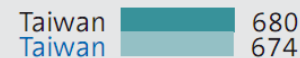
### Machine tool production cutting/forming: top 10 countries worldwide

Produktion spanende Maschinen in Mio. EUR  
Production cutting machines in mill. EUR  
■ 2008 ■ 2007



\* VDW-Bereinigung um 40% (vgl. Anhang, methodische Hinweise)  
\*\* inkl. Teile  
\*\*\* Wert erscheint zu niedrig, japanischer Verband JFMA meldet nur Daten für Firmen > 50 Beschäftigte  
Hinweis: Ohne Teile, Zubehör; 2008 = Schätzungen  
Quellen: VDW, VDMA, nationale Verbände, Gardner publications

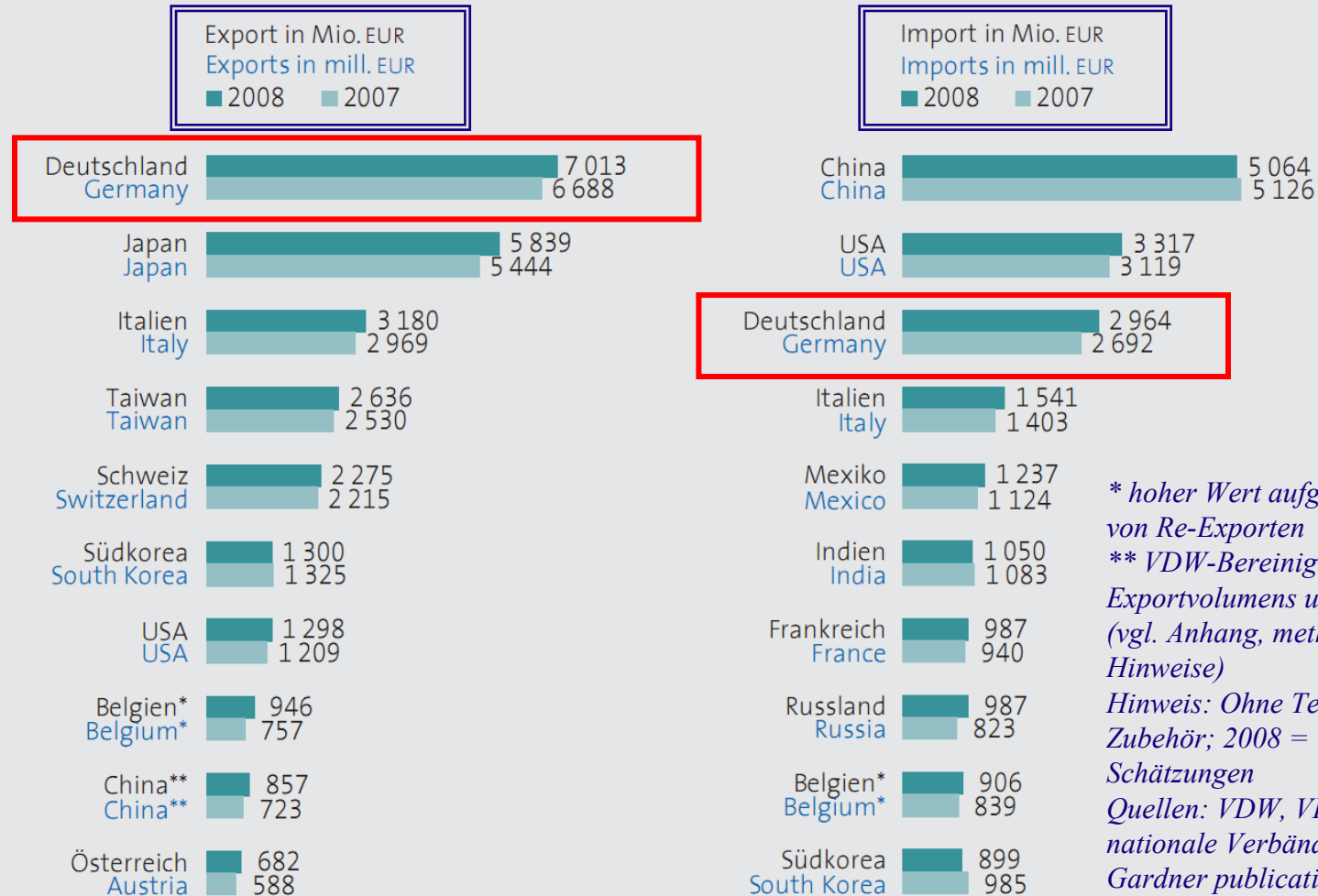
Produktion umformende Maschinen in Mio. EUR  
Production forming machines in mill. EUR  
■ 2008 ■ 2007



# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

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

### Machine tool exports and imports: top 10 countries worldwide



\* hoher Wert aufgrund von Re-Exporten  
 \*\* VDW-Bereinigung des Exportvolumens um 40% (vgl. Anhang, methodische Hinweise)  
 Hinweis: Ohne Teile, Zubehör; 2008 = Schätzungen  
 Quellen: VDW, VDMA, nationale Verbände, Gardner publications

# Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

## Deutsche Werkzeugmaschinenindustrie nach Betriebsgrößenklassen (%-Anteile)\*

### German machine tool industry by company size (%-shares)\*

| Zahl der Beschäftigten<br>Number of employees | Betriebe<br>Companies |         | Beschäftigte<br>Employment |         | Produktion<br>Production |         |
|-----------------------------------------------|-----------------------|---------|----------------------------|---------|--------------------------|---------|
|                                               | 2007                  | (2006)  | 2007                       | (2006)  | 2007                     | (2006)  |
| 1 – 50                                        | 13,5                  | (15,7)  | 1,1                        | (1,2)   | 0,9                      | (1,1)   |
| 51 – 100                                      | 19,8                  | (22,4)  | 5,3                        | (6,4)   | 4,3                      | (5,2)   |
| 101 – 250                                     | 30,2                  | (25,4)  | 19,0                       | (15,6)  | 17,7                     | (14,8)  |
| 251 – 500                                     | 23,0                  | (21,6)  | 30,6                       | (27,5)  | 31,3                     | (27,5)  |
| 501 – 1000                                    | 9,5                   | (10,4)  | 22,8                       | (24,0)  | 24,3                     | (26,8)  |
| > 1000                                        | 4,0                   | (4,5)   | 21,2                       | (25,3)  | 21,4                     | (24,7)  |
| Gesamt<br>Total                               | 100,0                 | (100,0) | 100,0                      | (100,0) | 100,0                    | (100,0) |

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

Hinweis: Reduzierter Anteil der Größenklasse > 1 000 Beschäftigte in 2007 aufgrund von Veränderungen im Melderkreis

# 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 |         |
|--------------------------------------------|--------------------|---------|-------------------------|---------|-----------------------|---------|
|                                            | 2007               | (2006)  | 2007                    | (2006)  | 2007                  | (2006)  |
| Baden-Württemberg Baden-Württemberg        | 46,8               | (46,3)  | 54,7                    | (52,0)  | 54,7                  | (54,1)  |
| Nordrhein-Westfalen North Rhine-Westphalia | 15,9               | (16,4)  | 13,7                    | (13,1)  | 15,3                  | (14,1)  |
| Bayern Bavaria                             | 11,9               | (12,7)  | 15,2                    | (20,0)  | 14,4                  | (17,9)  |
| Hessen Hesse                               | 6,3                | (6,7)   | 2,4                     | (2,5)   | 2,3                   | (2,1)   |
| Sachsen Saxony                             | 5,6                | (5,2)   | 4,5                     | (4,0)   | 3,6                   | (3,5)   |
| Thüringen Thuringia                        | 5,6                | (5,2)   | 5,6                     | (5,1)   | 6,5                   | (5,9)   |
| Hamburg Hamburg                            | 2,4                | (2,2)   | 1,3                     | (1,2)   | 0,7                   | (0,5)   |
| Sonstige Others                            | 5,6                | (5,2)   | 2,5                     | (2,1)   | 2,5                   | (1,9)   |
| Gesamt Total                               | 100,0              | (100,0) | 100,0                   | (100,0) | 100,0                 | (100,0) |

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

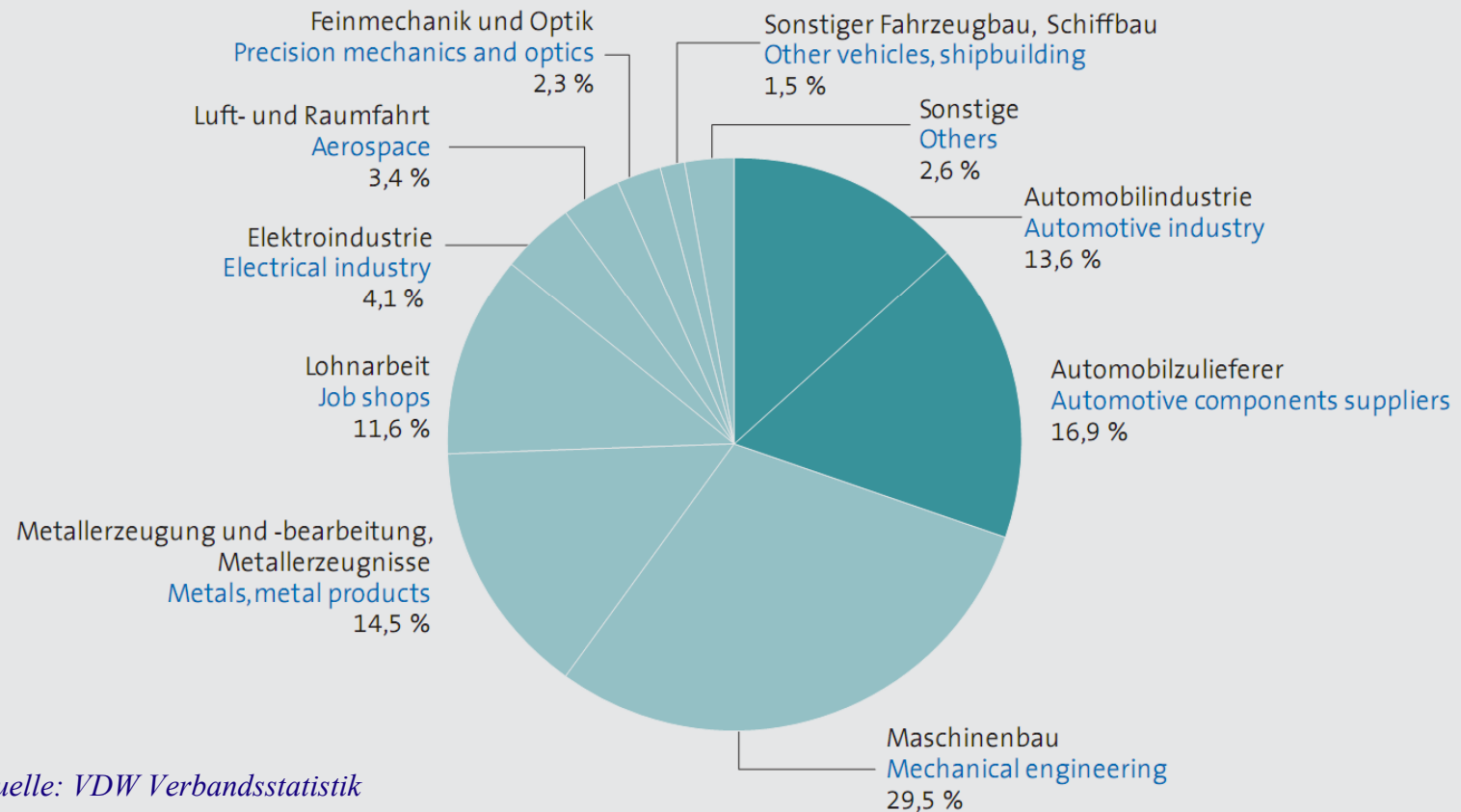
Hinweis: Reduzierter Anteil des Bundeslandes Bayern in 2007 aufgrund von Veränderungen im Melderkreis

## Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

### Abnehmerbranchen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie

### Customer branches of the German machine tool industry

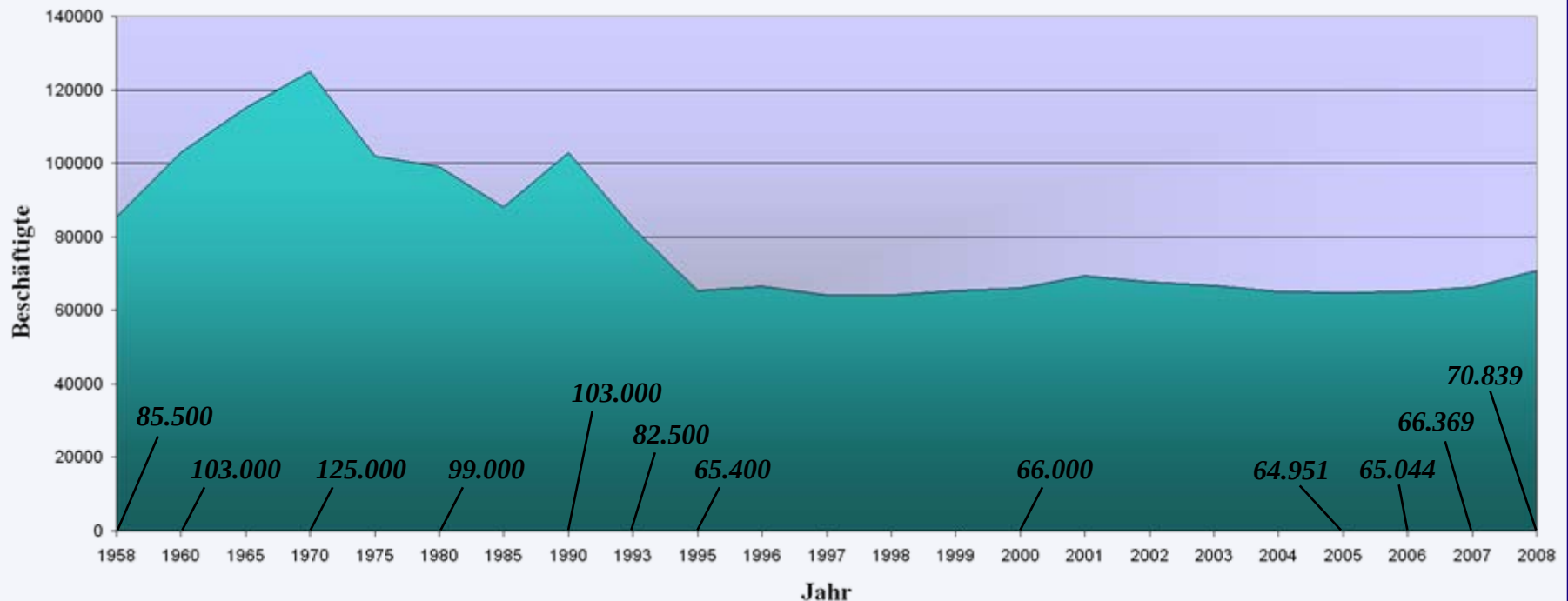
Prozentuale Verteilung des Produktionswertes 2007 *Percental distribution of the production value 2007*



Quelle: VDW Verbandsstatistik

## Kennzahlen des Werkzeugmaschinenbaus

### Beschäftigungsentwicklung in der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie



Aus: Historische Zeitreihen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie

2008: Daten teilweise geschätzt

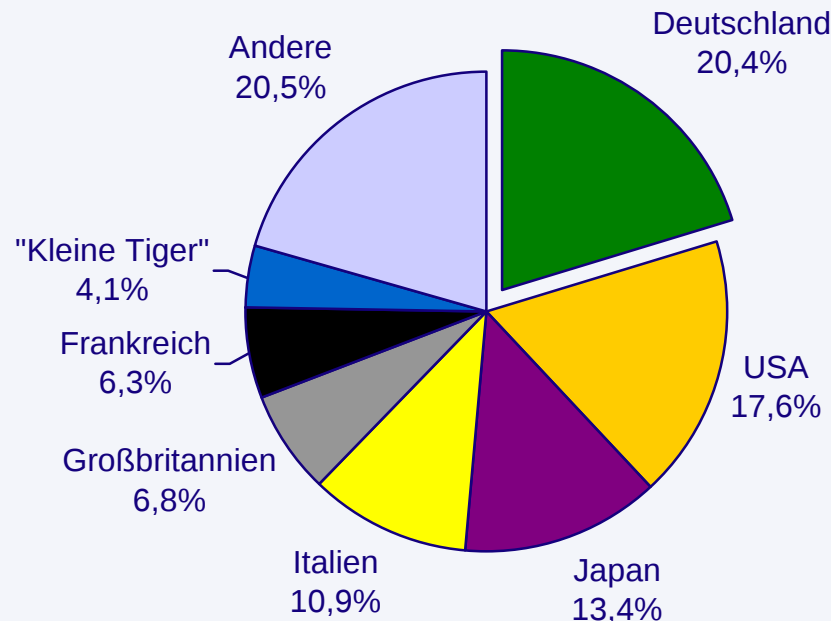
- Beschäftigte sind Jahresdurchschnitte

- Daten ab 1991 inkl. Neue Bundesländer (Beschäftigte ab 1993)

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

## Exportzahlen der wichtigsten Länder im Vergleich

*Fast 70% des Maschinenumsatzes geht ins Ausland.  
Der deutsche Maschinenbau führt im Welthandel mit  
rd. 20 % Anteil vor seinen schärfsten Wettbewerbern  
USA und Japan.*

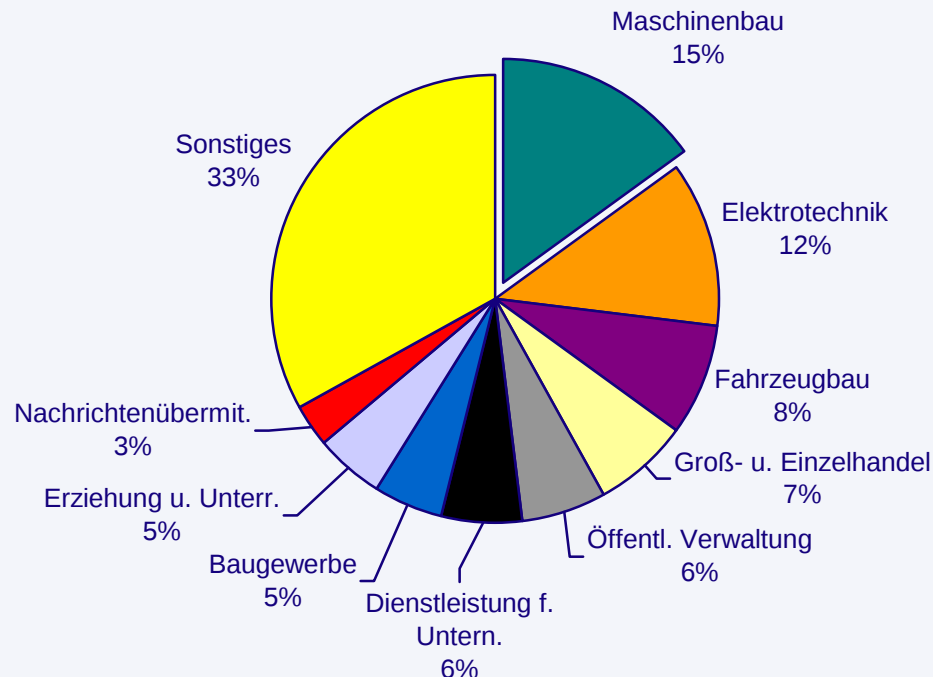


Maschinenausfuhr\* der wichtigsten  
Lieferländer 1998; \* Maschinenbau o.  
Büro- und Informationstechnik \*\*  
Hongkong, Singapur, Südkorea,  
Taiwan Quelle: nat. stat. Ämter, eigene  
Berechnungen

Quelle: VDMA

## Anteil der Ingenieure an den Beschäftigten

*Mit 120.000 Ingenieuren, das ist jeder achte Mitarbeiter, ist der Maschinenbau der größte Arbeitgeber für Ingenieure. Auch im gewerblichen Bereich beschäftigt er fast ausschließlich Facharbeiter.*

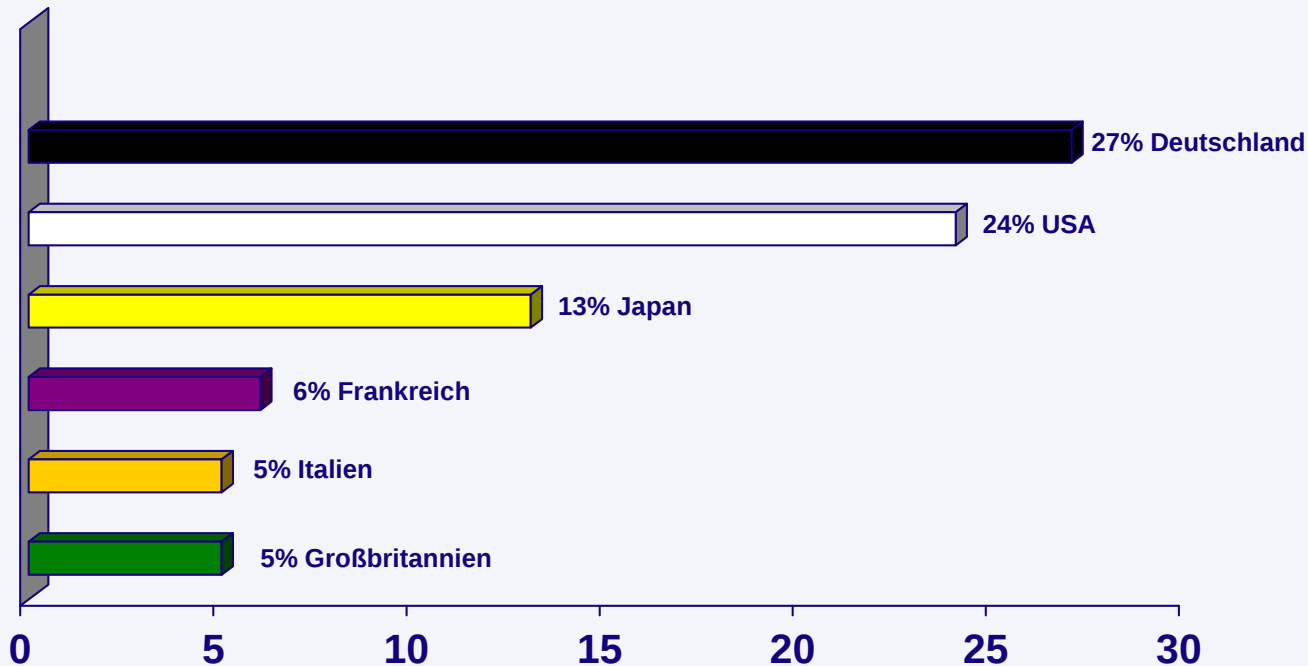


Anteil der Ingenieure an den Beschäftigten nach Industriezweigen Quelle: Mikrozensus (ZEW)

Quelle: VDMA

## Patentanmeldungen im Maschinenbau

*Als einzige Branche in Deutschland liegt der Maschinenbau im weltweiten Vergleich bei den Patentanmeldungen in Führung vor den Hauptkonkurrenten USA und Japan.*



Patente im Maschinenbau\* ausgewählte Länder 1995 - 1997 \*) Anteile der Erfindungen mit Patentanmeldung in mindestens zwei Ländern Quelle: Ifo-Institut

Quelle: VDMA

## Größenklassengliederung\* im Maschinenbau

*Kleine und mittlere Unternehmen dominieren:  
Über 80 % der Unternehmen beschäftigen weniger  
als 200, nur etwa 2,2 % mehr als 1000 Mitarbeiter.*

| Unternehmensgröße<br>nach Zahl der<br>Beschäftigten | Unternehmen in<br>Prozent | Beschäftigte in<br>Prozent | Umsatz in Prozent |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|
| 20 - 49                                             | 40,6                      | 8,3                        | 6,2               |
| 50 - 99                                             | 25,8                      | 11,0                       | 9,0               |
| 100 - 199                                           | 16,1                      | 13,7                       | 12,2              |
| 200 - 499                                           | 11,9                      | 21,8                       | 21,3              |
| 500 - 999                                           | 3,3                       | 12,5                       | 14,1              |
| 1000 und mehr                                       | 2,3                       | 32,7                       | 37,1              |
| Insgesamt                                           | 100,0                     | 100,0                      | 100,0             |

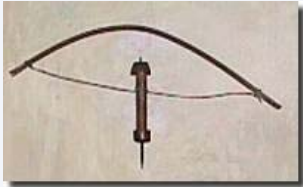
\* Unternehmen mit 20 und mehr  
Beschäftigten, Daten für 1998

Quelle: VDMA

# Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

## Steinzeit

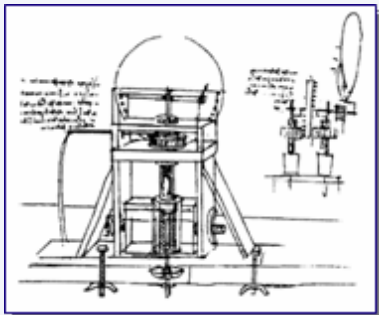
Meißel und Schabewerkzeuge  
Bohrer (Antrieb über Fiedelbogen)



*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.



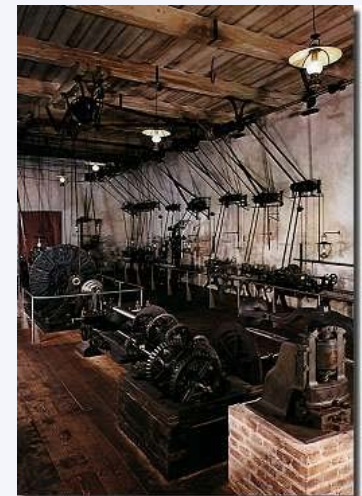
*Zylinderschleifmaschine*

## 8. Jahrhundert v. Chr.

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

## 1711 James Watt

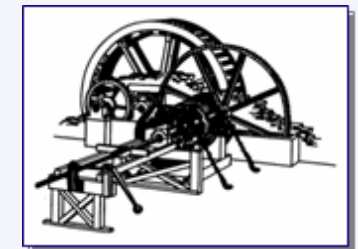
Weiterentwicklung der  
Dampfmaschine. Die  
Werkzeugmaschinen  
konnten nunmehr  
motorisch über Trans-  
missionswellen ange-  
trieben werden.



*Werkzeugmaschinenhalle*

## 1774 John Wilkinson

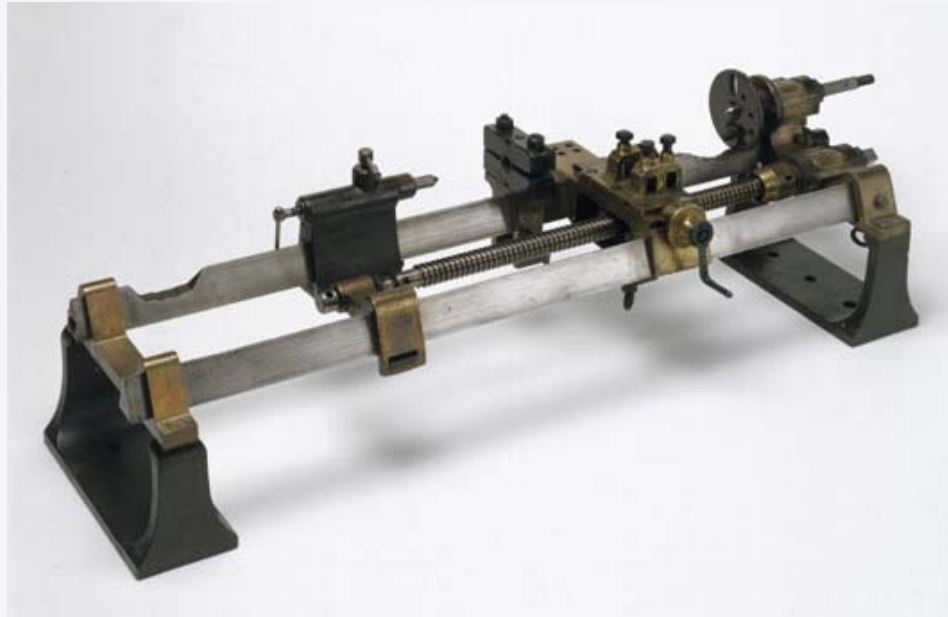
Erste richtige Metallbearbeitungs-  
maschine bzw. Werkzeugmaschine.  
Diese Maschine bot eine relativ gute  
Arbeitsgenauigkeit, so daß Dampf-  
maschinenzylinder für James Watt auf ihr  
gebohrt werden konnten.



*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

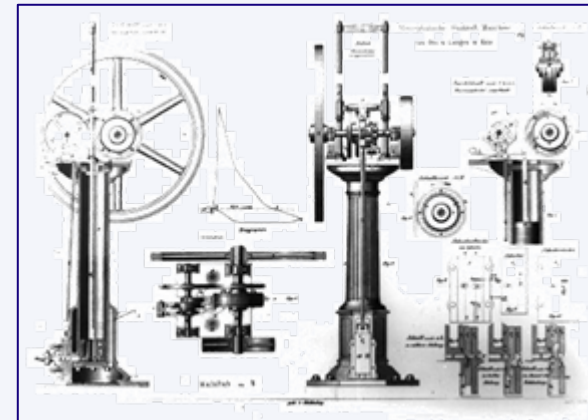
Die Entwicklung der Standardwerkzeugmaschinen, wie Dreh-, Hobel-, Stoß-, Bohr- und Fräsmaschine war im wesentlichen abgeschlossen.

## Nicolaus August Otto

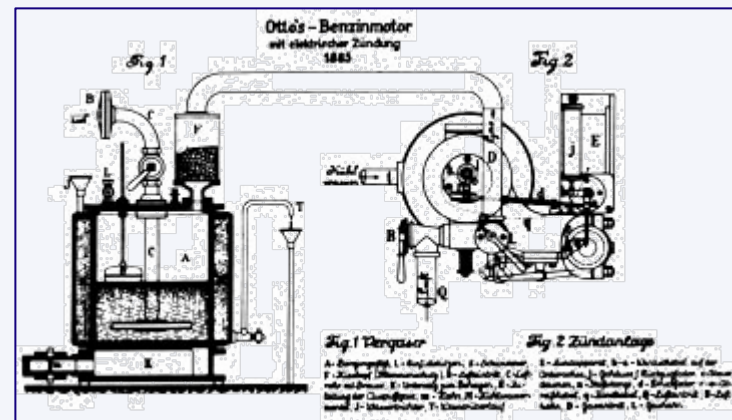
1864: Erfindung des atmosphärischen Gasmotors

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

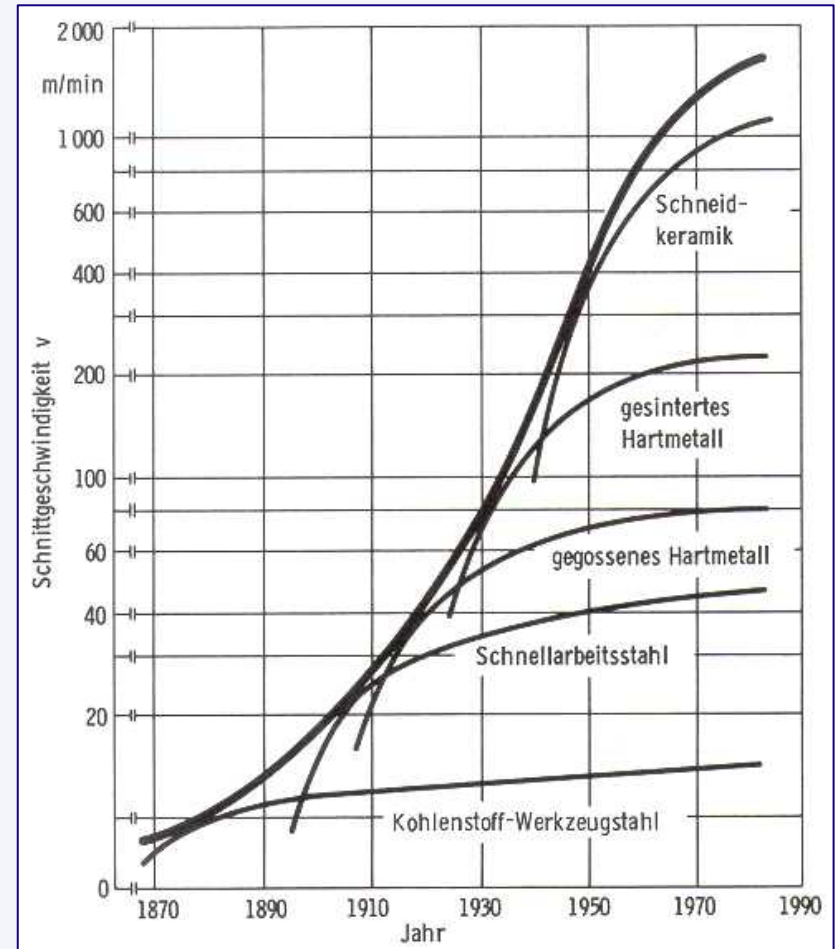
Entwicklung des Schnellarbeitstahls

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



## Neue Anforderungen an Werkzeugmaschinen

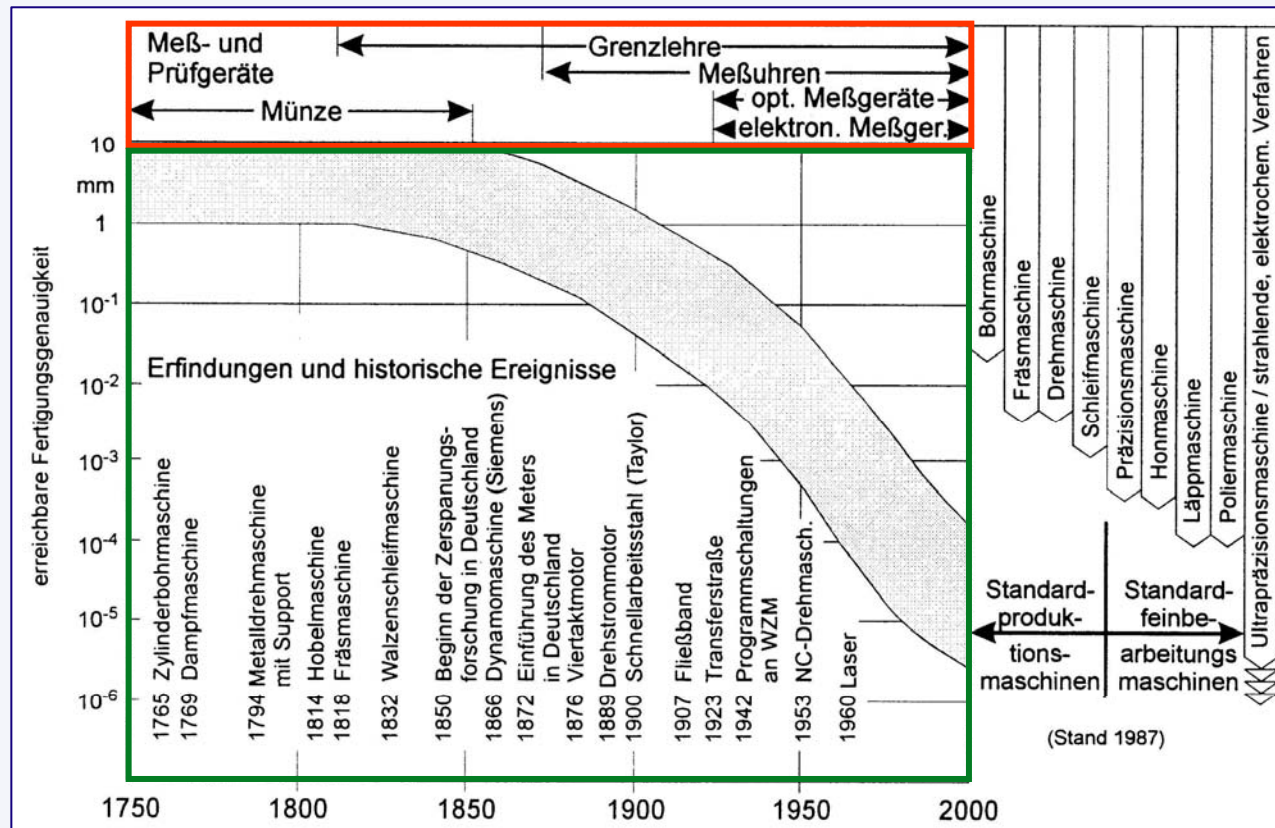
- höhere Antriebskräfte
- höhere Arbeitsspindeldrehzahl
- steifere, höher belastbare Führungen, Arbeitsspindeln und Gestellbauteile
- verbesserte Getriebe
- verbesserte Schwingungseigenschaften



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

# Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

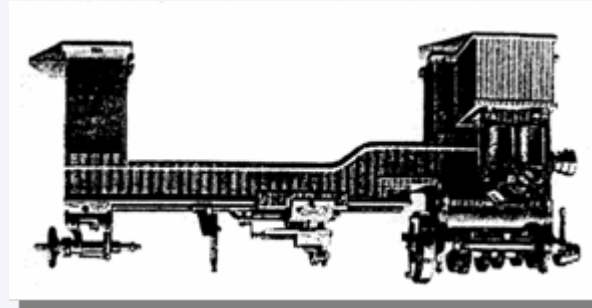
Parallel zur Verbesserung der **Fertigungsgenauigkeit** von Werkzeugmaschinen mussten auch entsprechende **Messmittel** zum Nachweis der Fertigungsqualität entwickelt werden.



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.



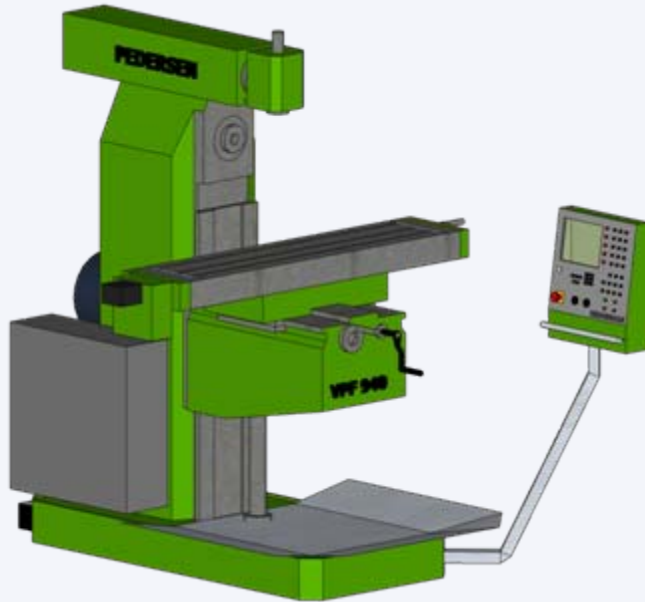
*Drehmaschine mit eigenem Antrieb*

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).

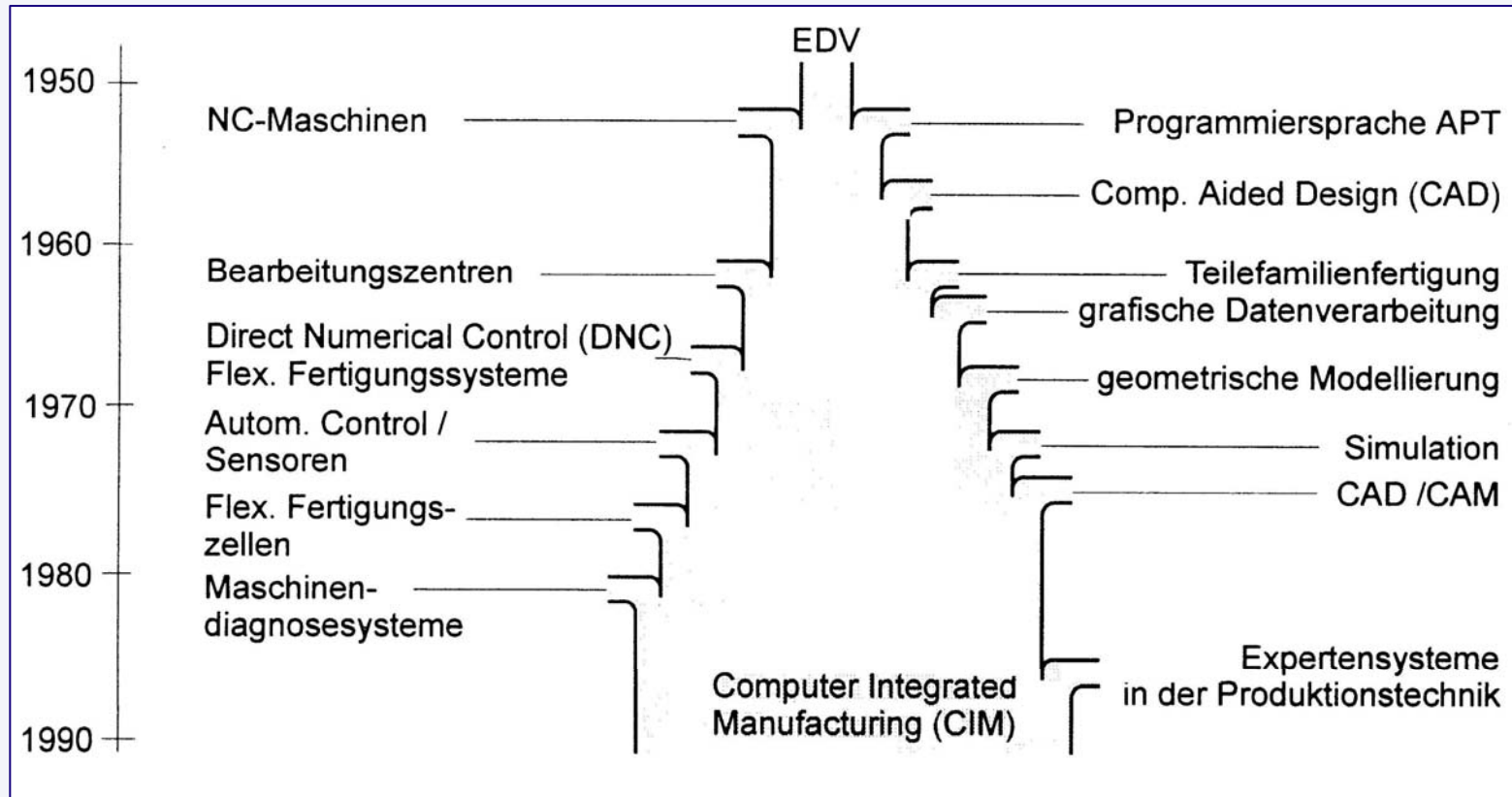
In den **siebziger Jahren** wurden die Werkzeugmaschinen zunehmend numerisch gesteuert. Die Maschinen erhielten über Lochstreifen oder Magnetkassetten ihre Steuerungsbefehle. Der Befehlsdatensatz (NC-Programm) konnte an einem separaten Arbeitsplatz offline oder an dem Bedienfeld der Werkzeugmaschine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

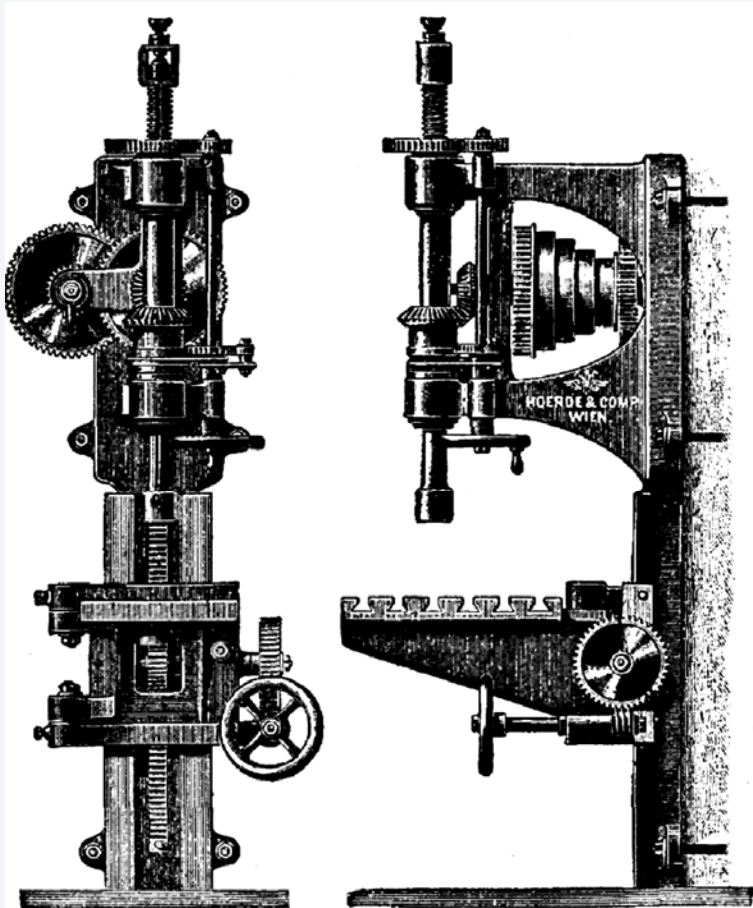


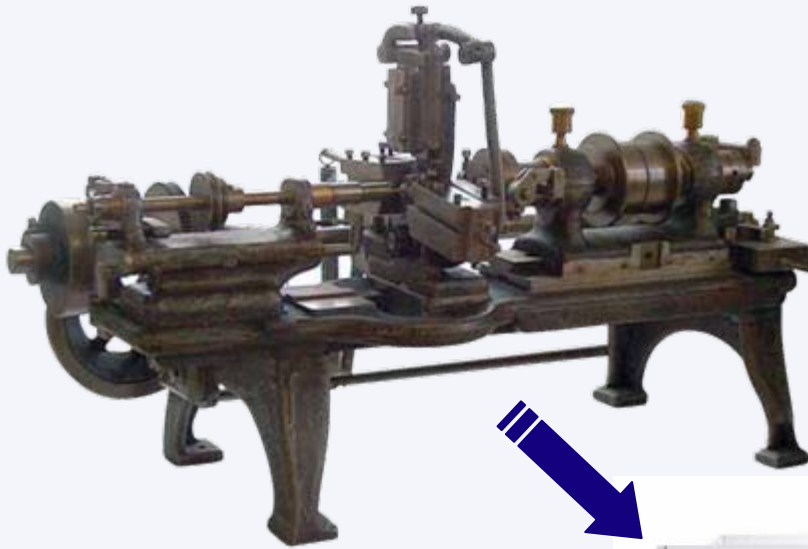
Fig. 6.

*Historische Ständerbohrmaschine*  
*Quelle: Wikipedia*



*Ständerbohrmaschine*

## Werkzeugmaschinen – Früher und Heute

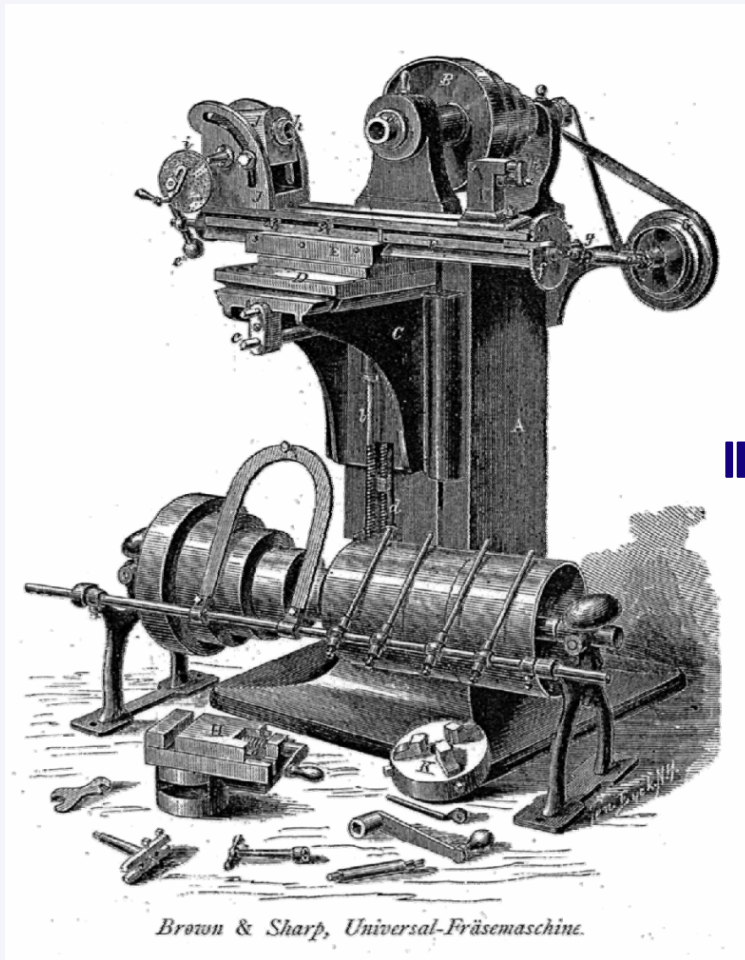


*Drehmaschine Junker 1900*  
*Quelle: decomagazine (www.decomag.ch)*

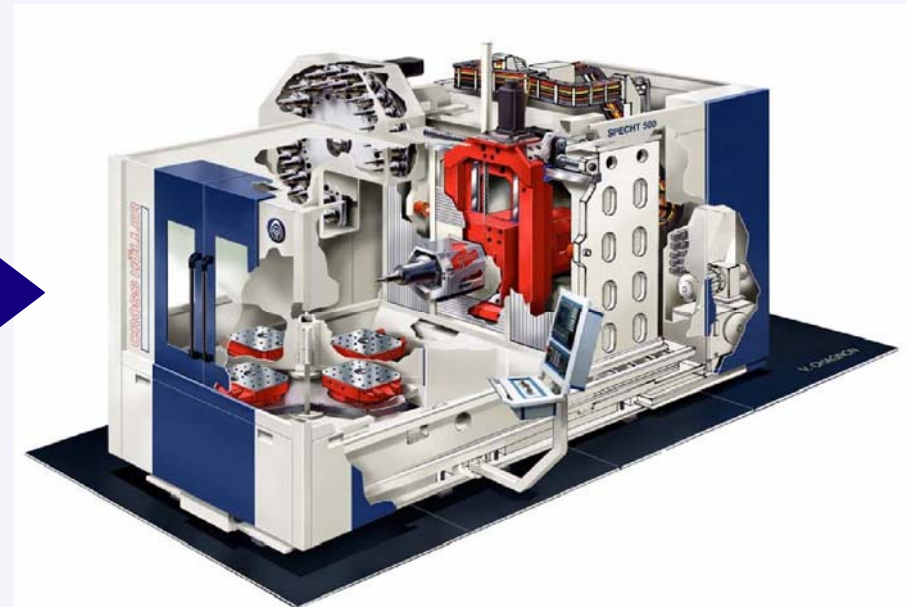
*Horizontaldrehmaschine MAG Boehringer*  
*Quelle: www.mag-ias.com*



## Werkzeugmaschinen – Früher und Heute



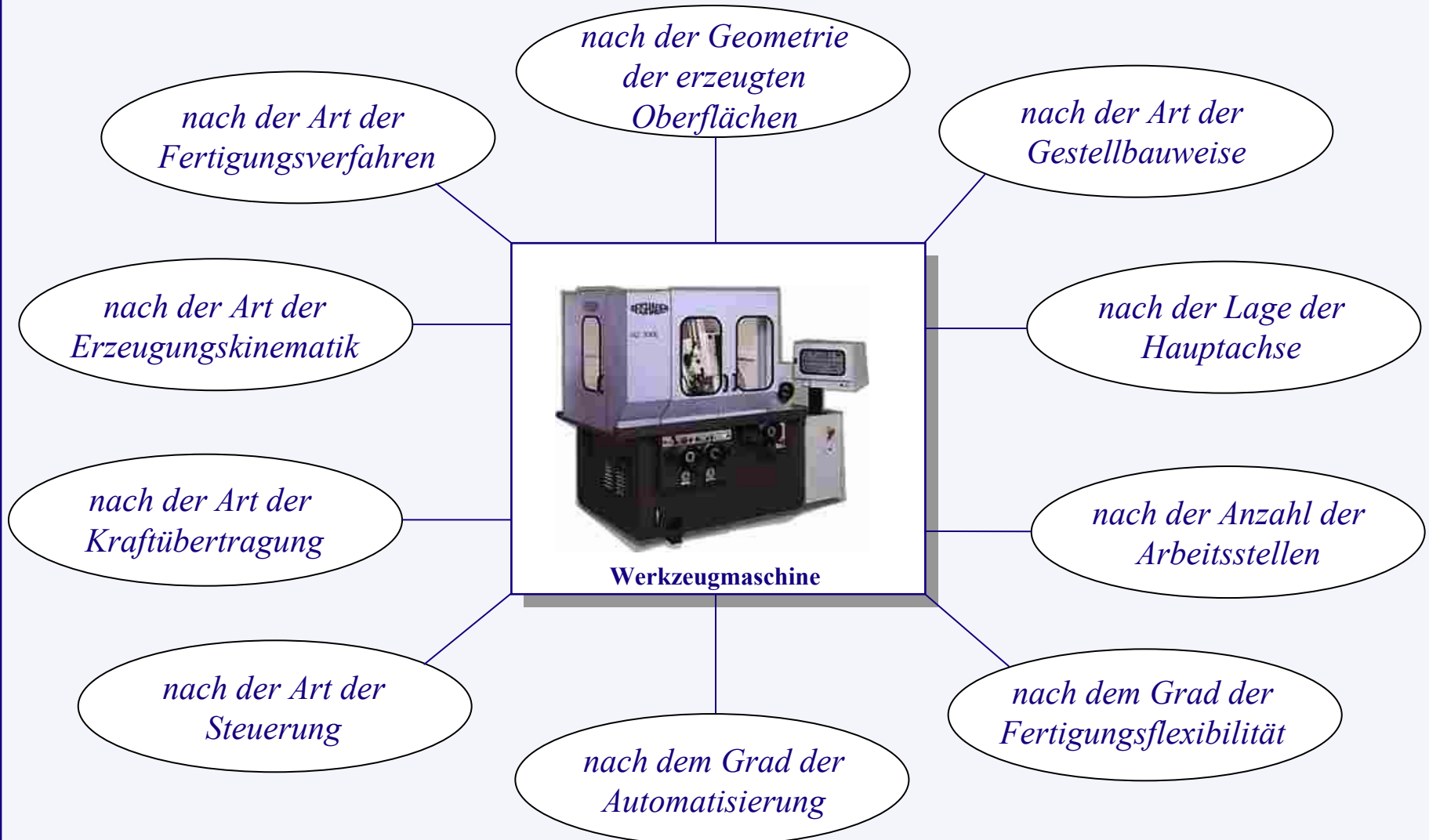
*Universalfräsemaschine um 1870*



*Fräse-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

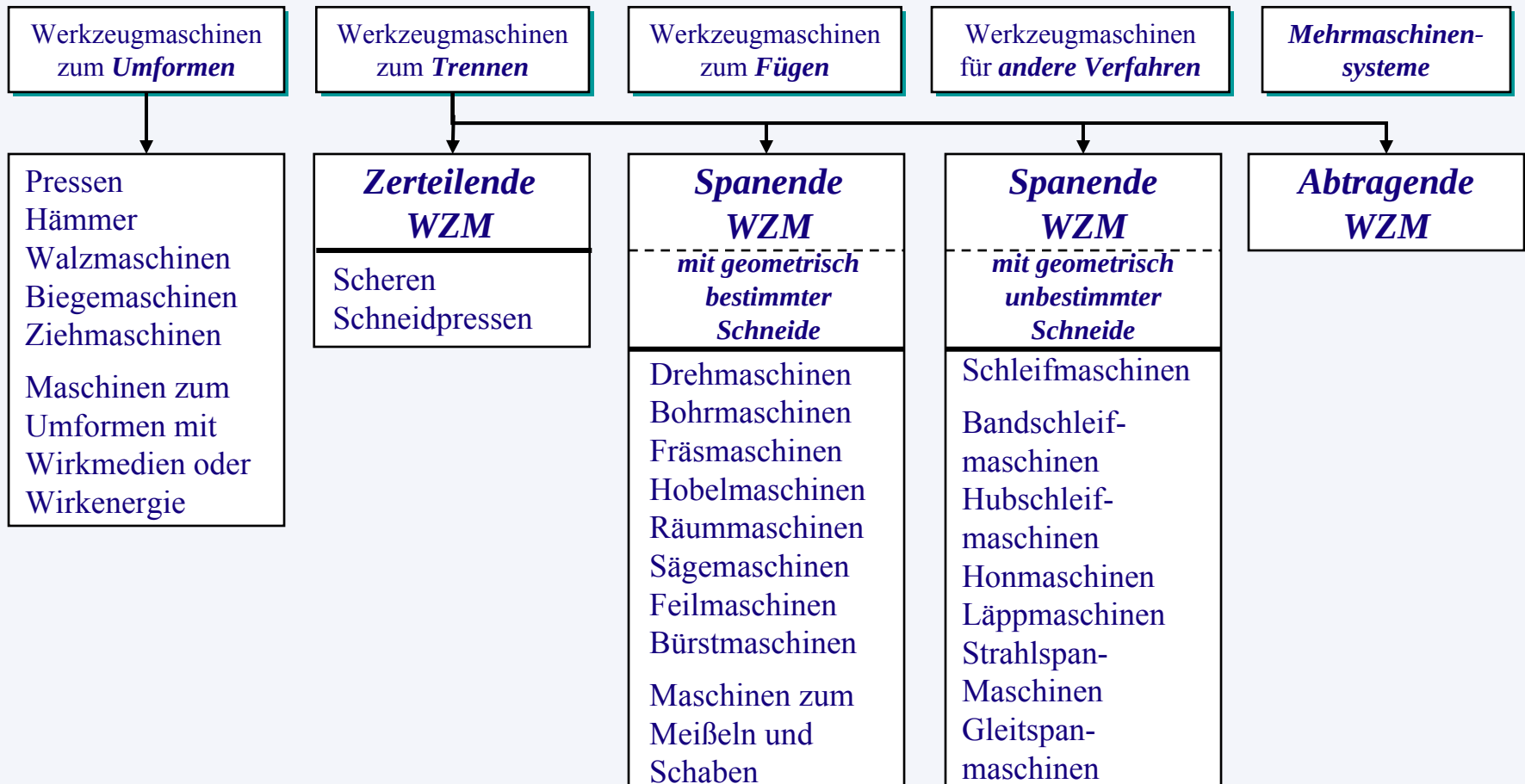
- Kurvensteuerung
- numerische Steuerung

### ***Kraftübertragung***

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

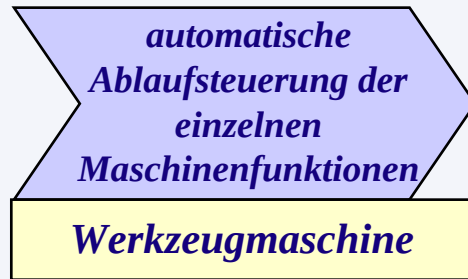
- mechanisch
- hydraulisch
- pneumatisch
- elektrisch

## Einteilung nach DIN 69651

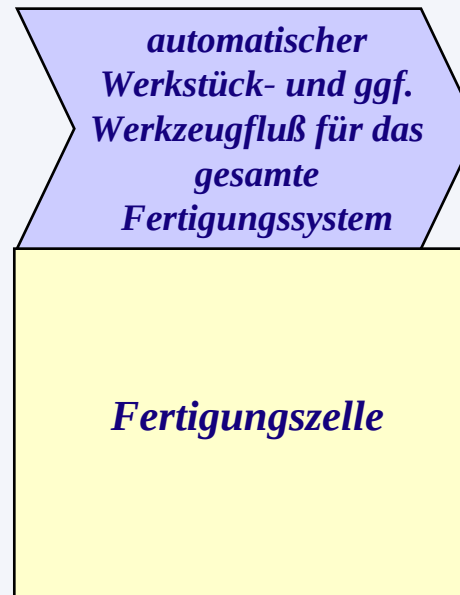
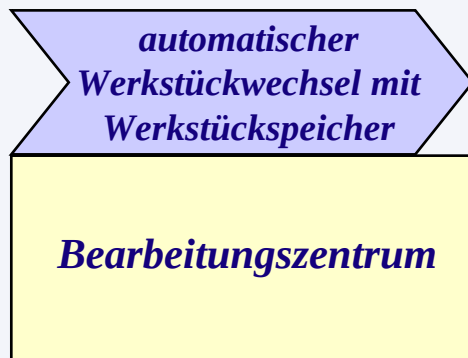


## Einteilung nach dem Automatisierungsgrad

### ***Einzelmaschinen***

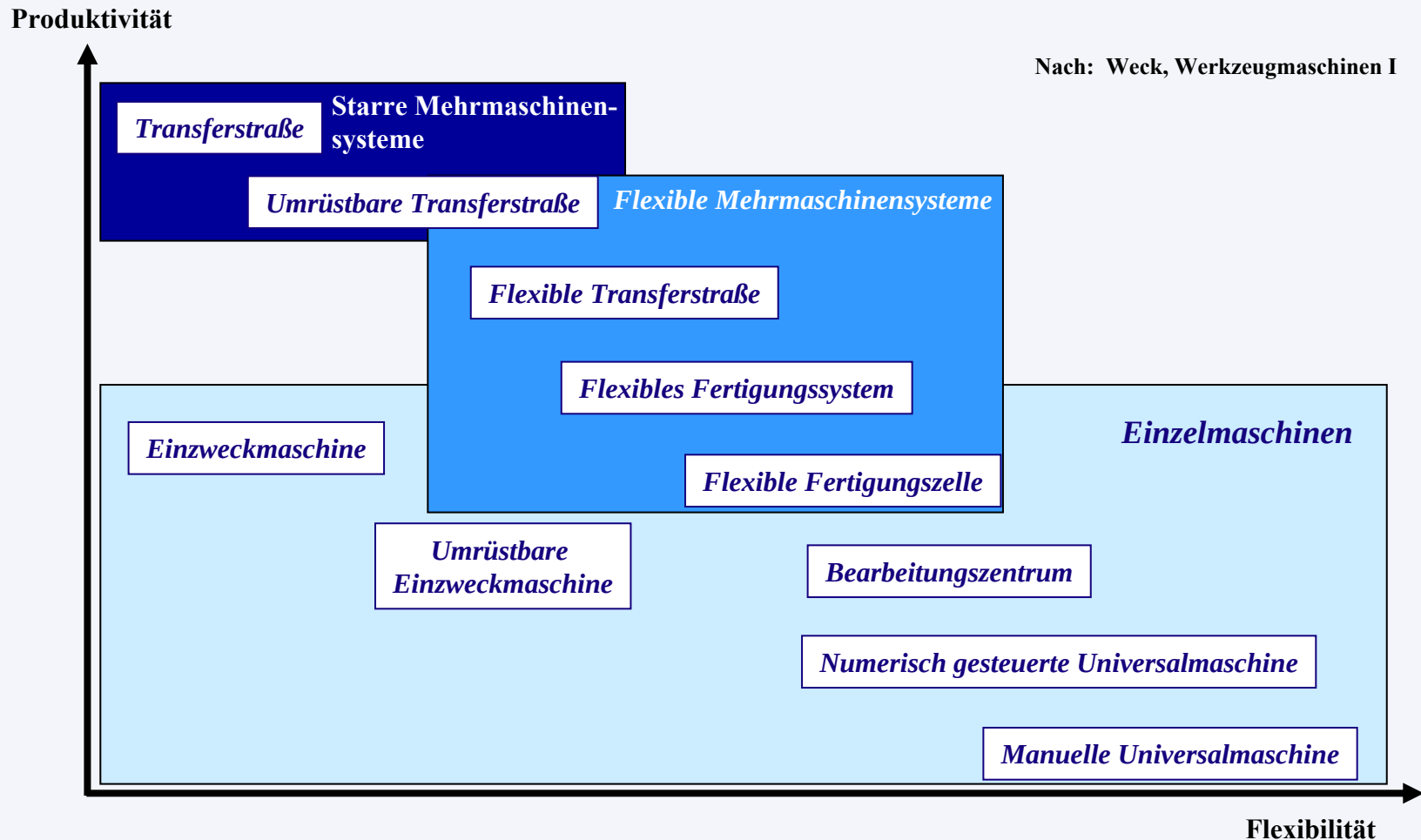


### ***Mehrmaschinen-systeme***



## Einteilung nach dem Grad der Flexibilität

Nach: Weck, Werkzeugmaschinen I

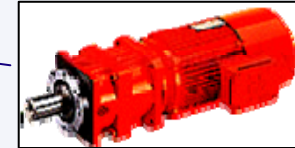


# Prinzipieller Aufbau einer Werkzeugmaschine

*Hauptantrieb*



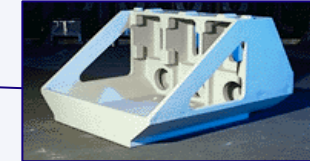
*Vorschubantrieb*



*Hauptspindel*



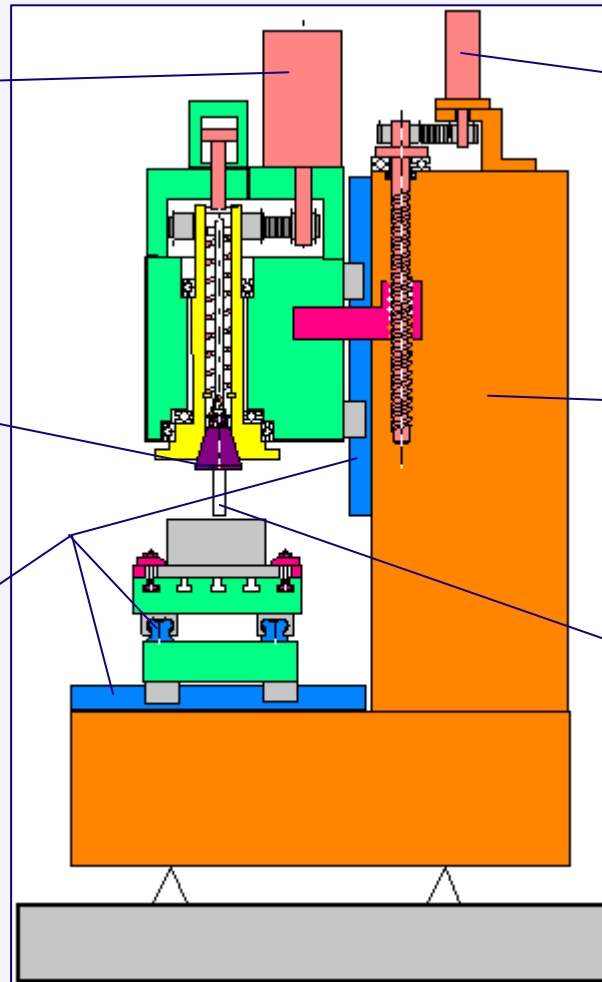
*Gestell*



*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

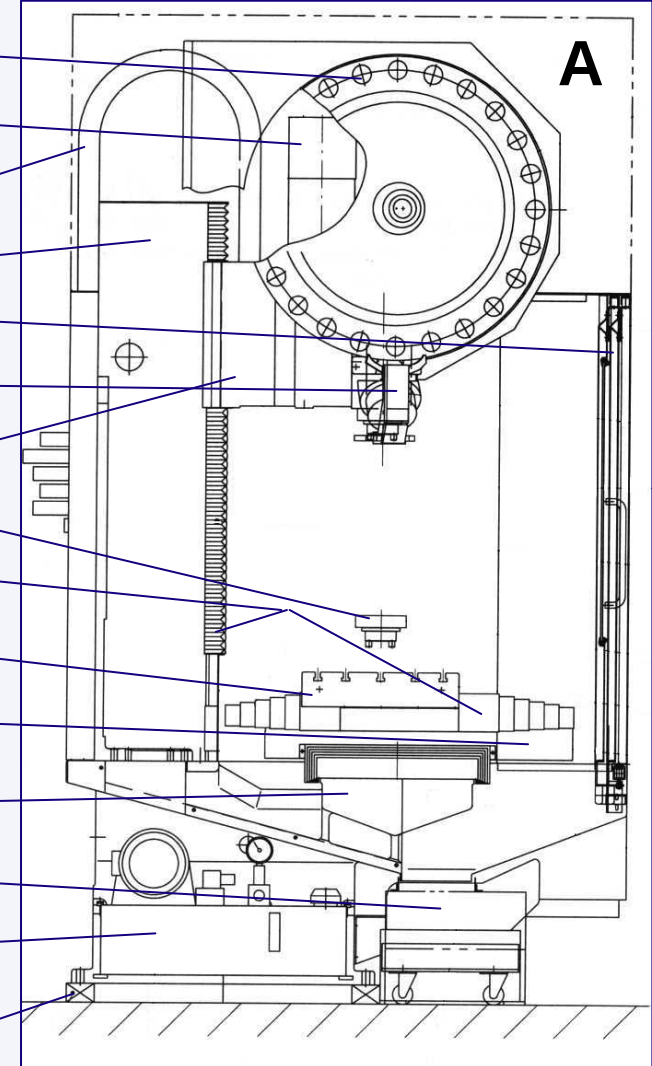
Kreuzteil

Konsole

Späneförderer

Hydraulik

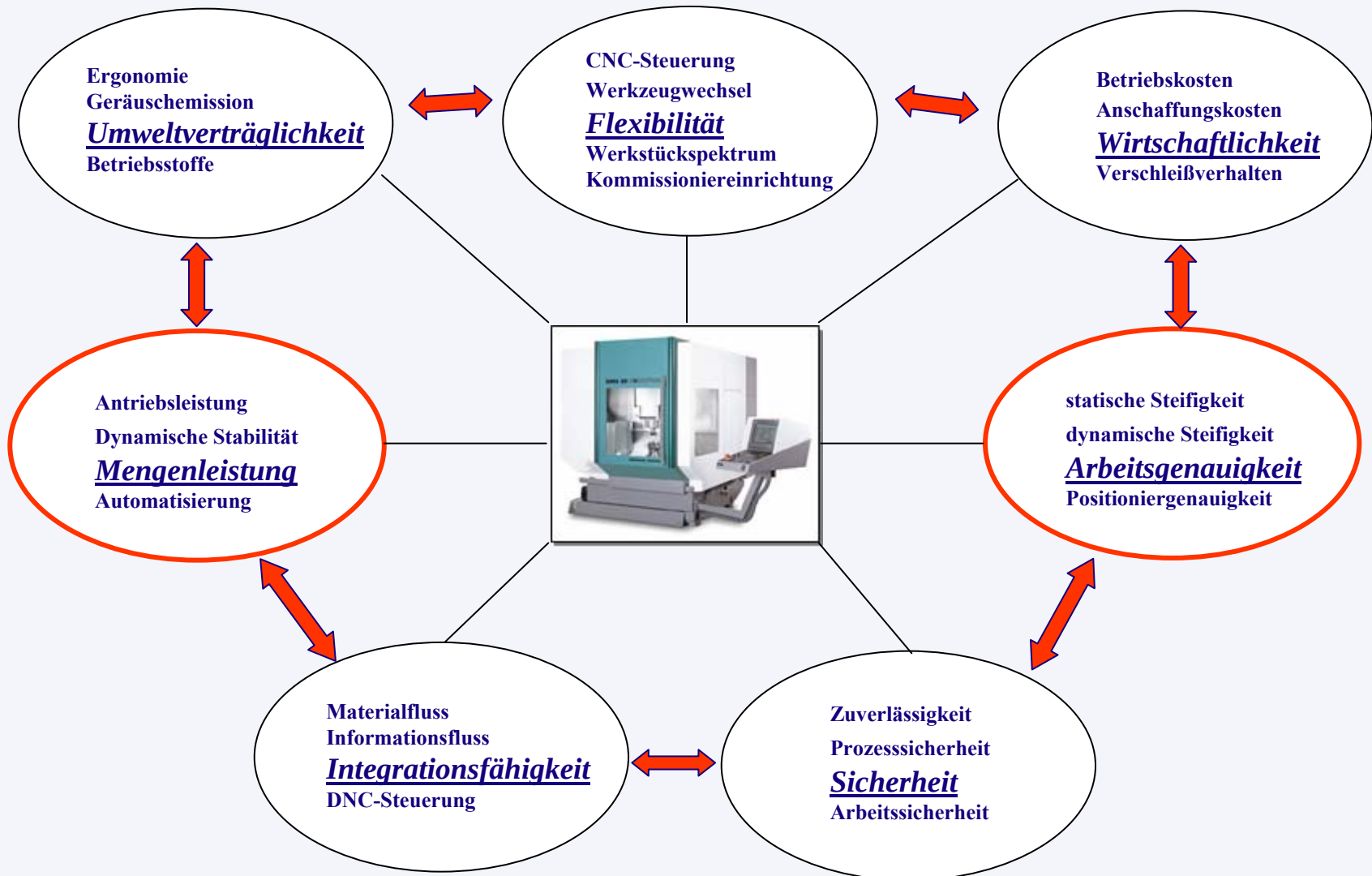
Nivellier-Element



A

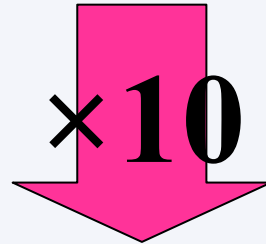
# *Anforderungen an Werkzeugmaschinen*

## Allgemeine Anforderungsschwerpunkte für Werkzeugmaschinen



# Arbeitsgenauigkeit und Fertigungsgenauigkeit

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



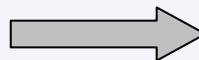
Die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine sollte um den Faktor 10 genauer sein, als die verlangte Fertigungsgenauigkeit des Werkstückes.

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

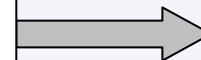
*Störeinflüsse auf die  
Arbeitsgenauigkeit  
einer WZM*



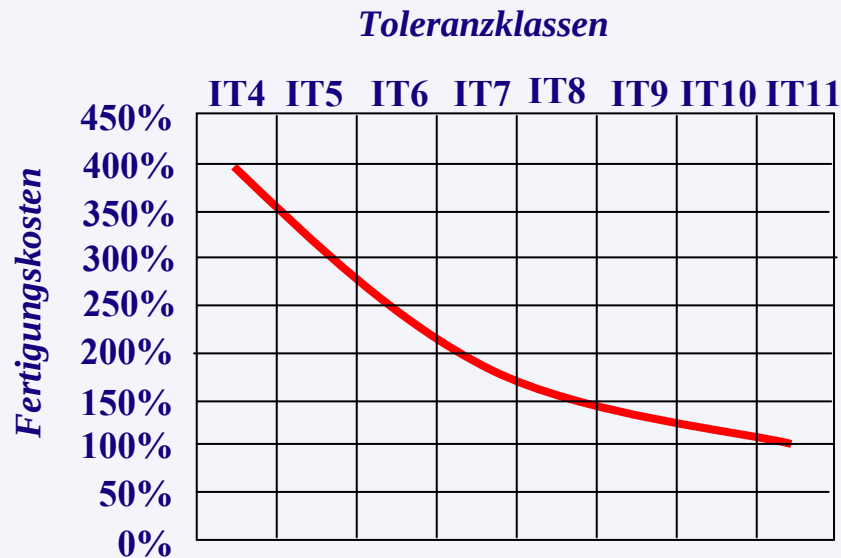
Material  
Energie  
Information



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!*

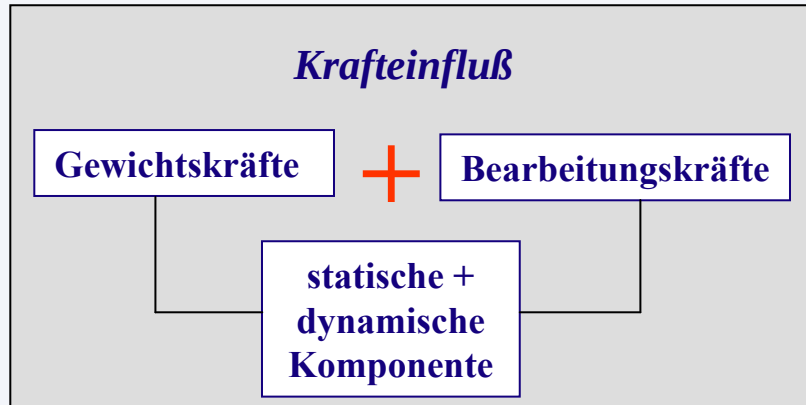
| Toleranzklasse                            |                        | IT 4  | IT 5  | IT 6  | IT 7  | IT 8  | IT 9 | IT 10 | IT 11 |
|-------------------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Toleranz in mm bei Sollmaß 250 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:

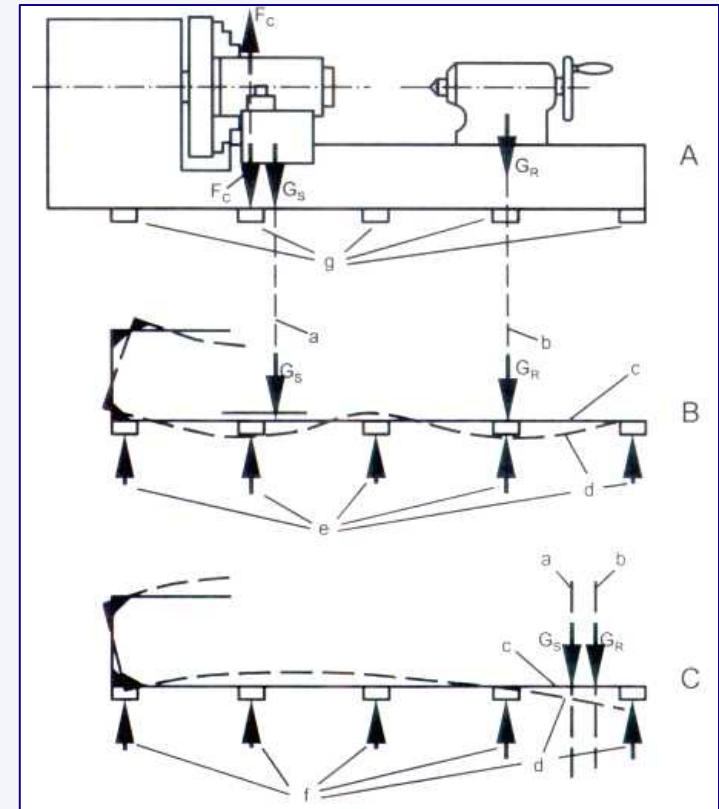
### Folge:

- 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: Saljé)

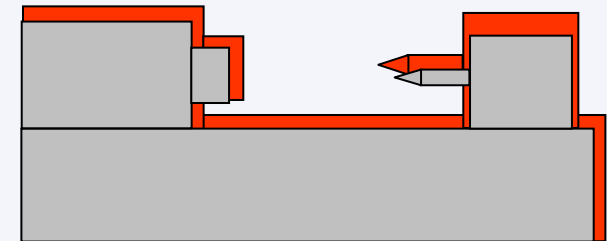
## Arbeitsgenauigkeit: Verformung der WZM durch Wärmeeinfluss

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

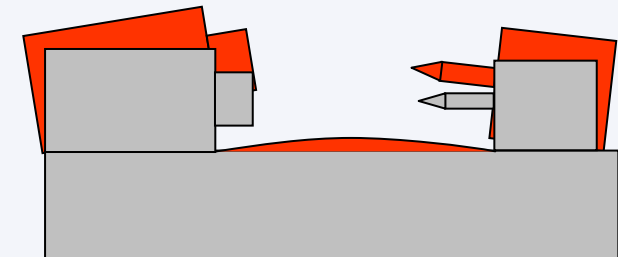
Durch konstruktive Maßnahmen muss die Verformung gefährdeter Bauteile so gering wie möglich gehalten werden.

### Hauptwärmequellen

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



*Gleichmäßige Erwärmung aller Bauteile*



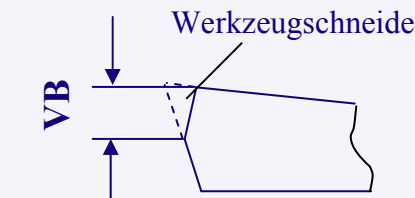
*Ungleichmäßige Erwärmung mit maximalen Temperaturen an der Spindellagerung und am Maschinenbett*

Quelle: nach Bruins

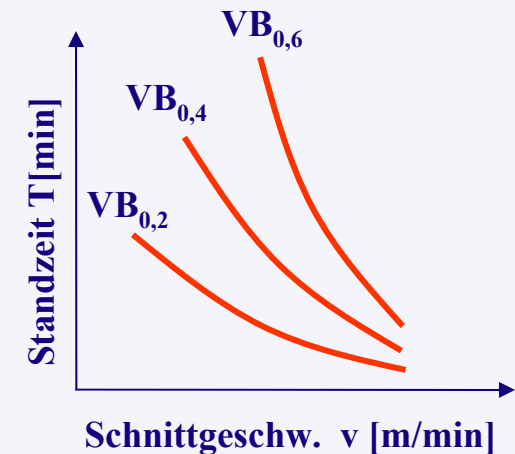
# Arbeitsgenauigkeit: Verschleiß

**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

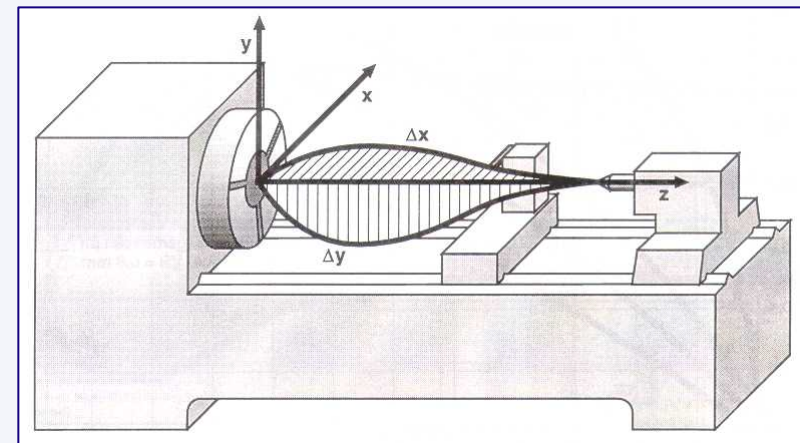


VB = Verschleißmarkenbreite



**Langzeitverschleiß:** Lagerungen und Führungen verschleßen. 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

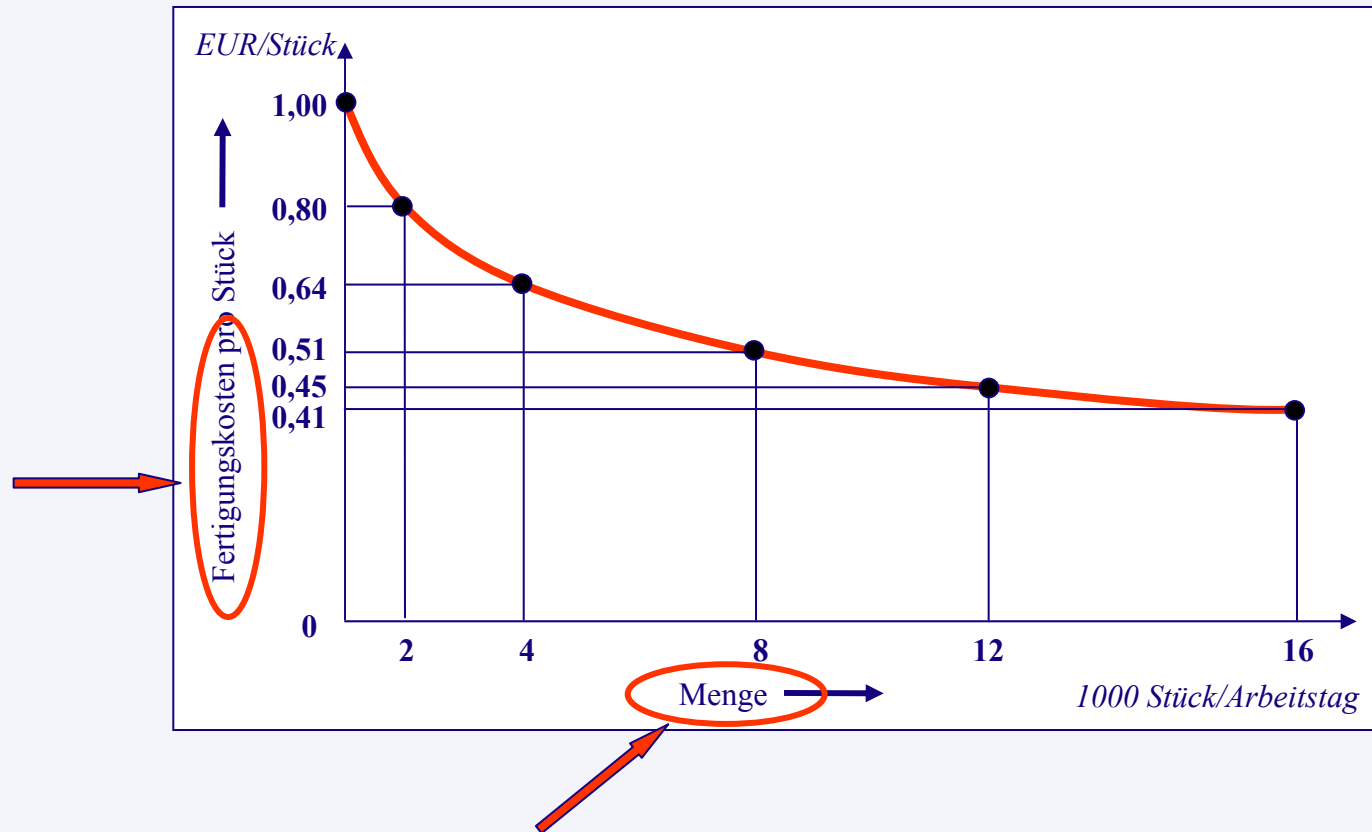


### Maßnahmen zur Erhaltung der Arbeitsgenauigkeit

- 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

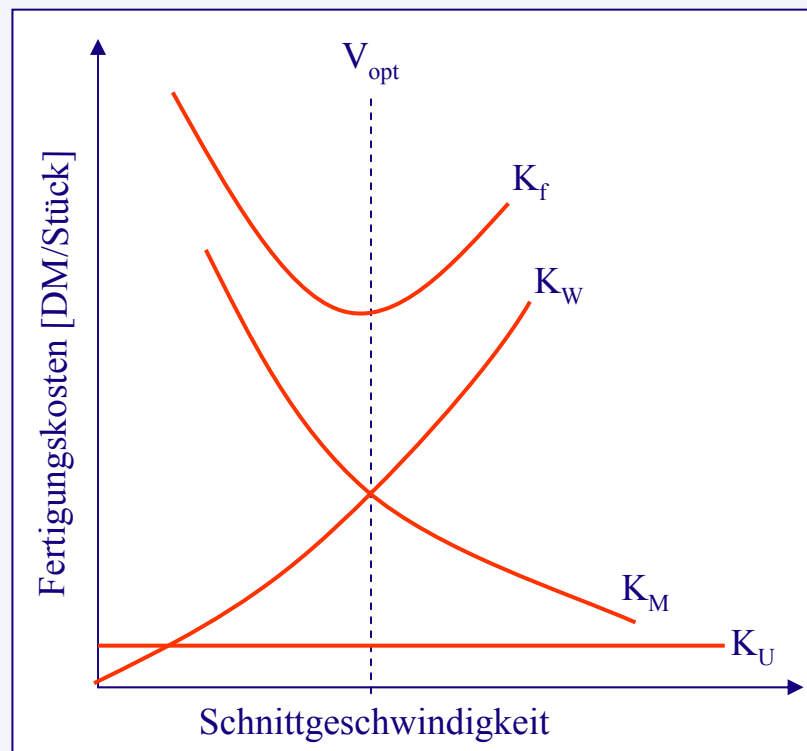


Quelle: Prof. Reinhart, iw b

## Mengenleistung: Fertigungskosten

*Die Fertigungskosten werden hauptsächlich durch folgende Faktoren beeinflusst:*

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

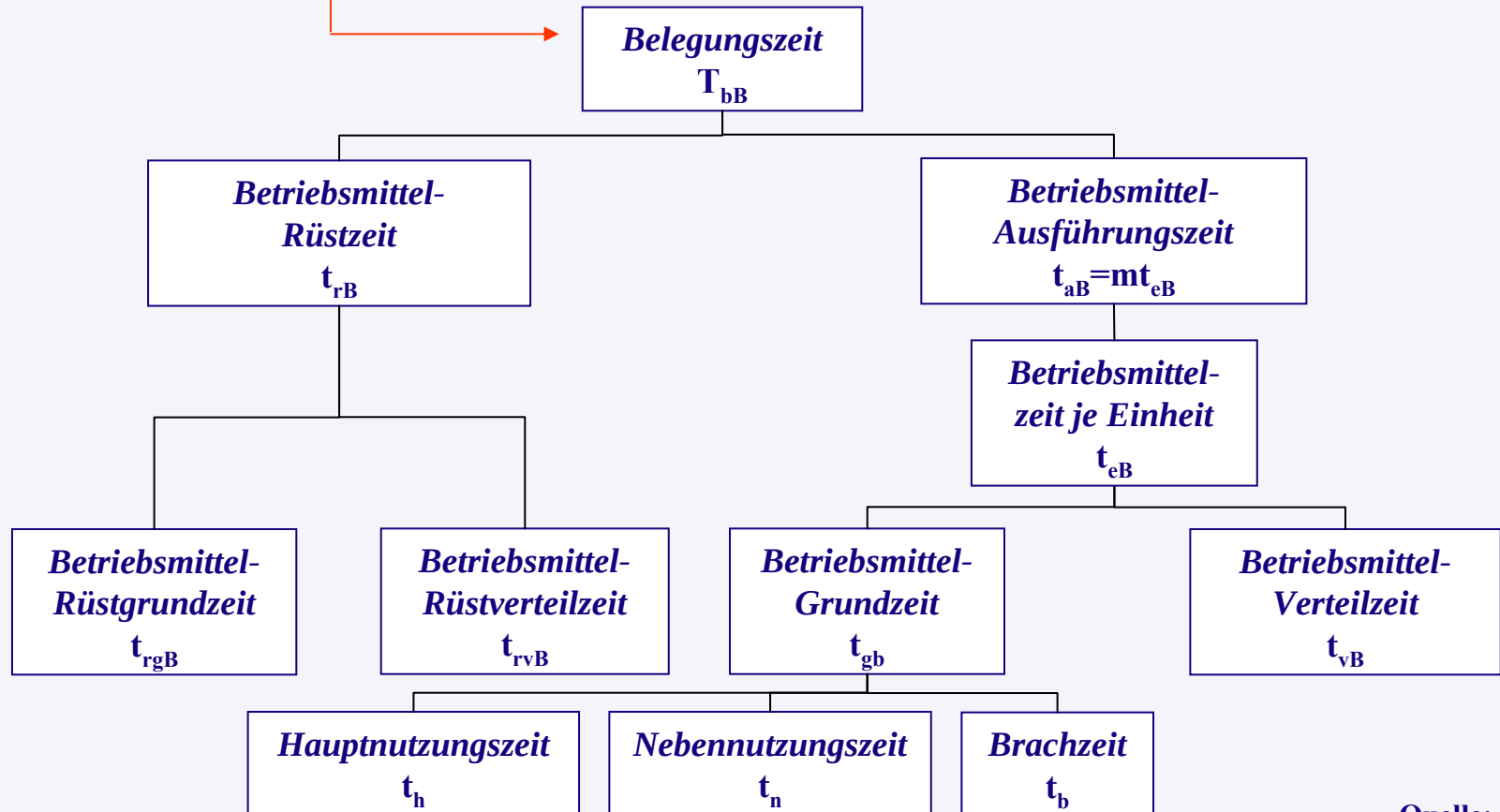


$K_f$  : Fertigungsgesamtkosten  
 $K_w$  : Werkzeugkosten  
 $K_M$  : Lohn- und Maschinenkosten  
 $K_U$  : von der Schnittgeschwindigkeit unabhängige Kosten

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  $t_{aB} = m t_{eB}$**  : 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

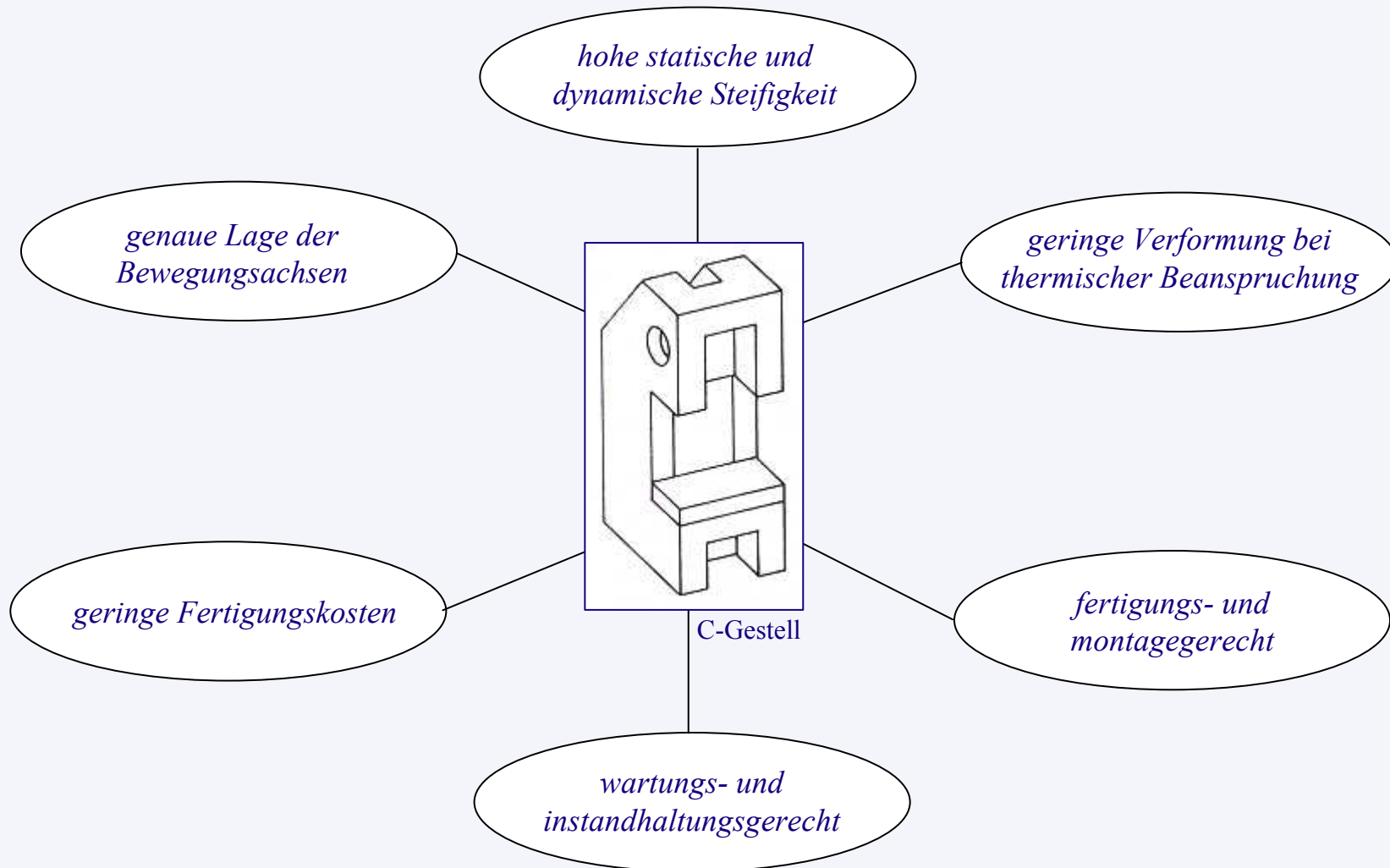
### Rüstzeit

- 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

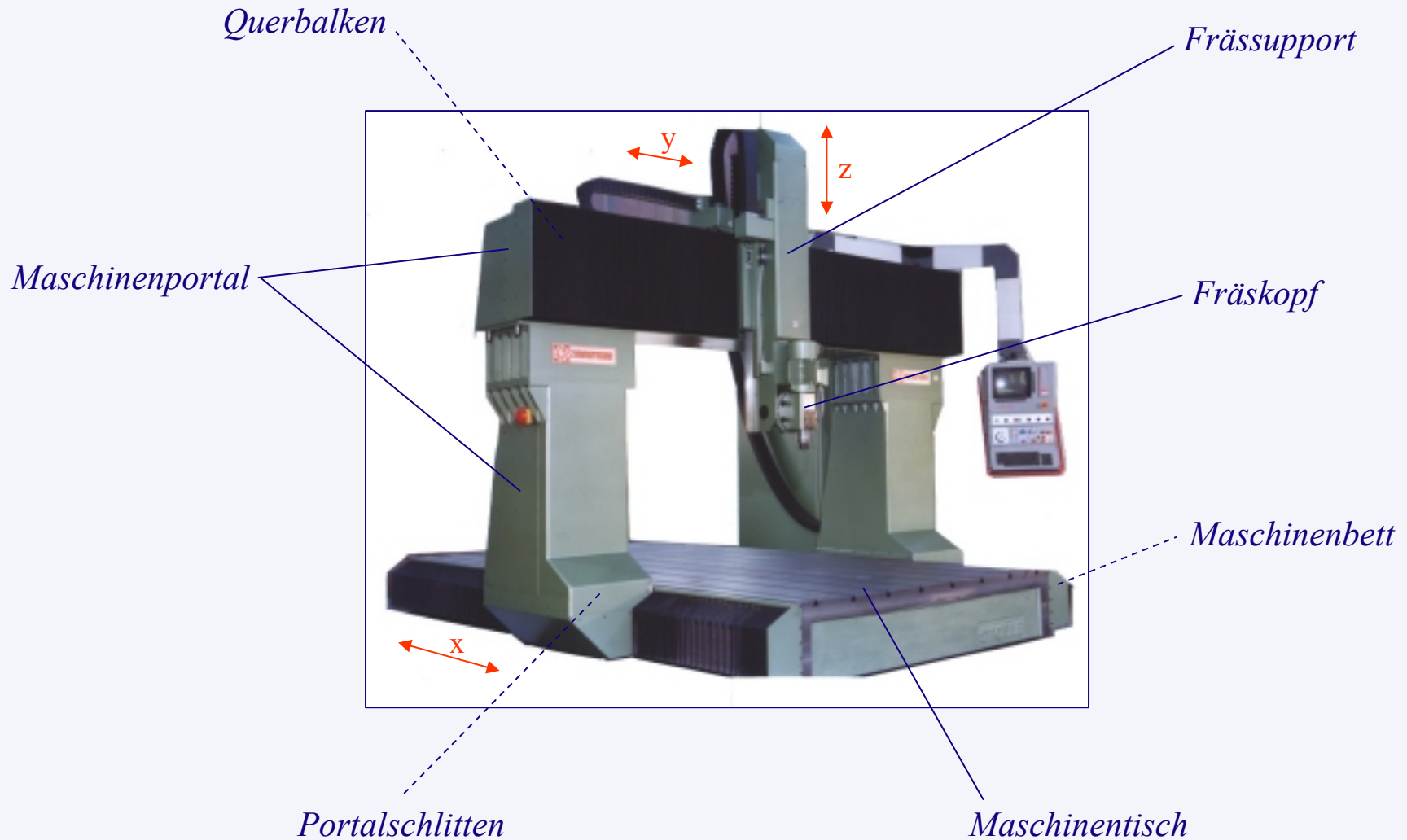
# *Gestelle und Gestellbauteile*



## Anforderungen

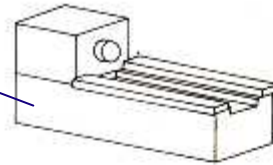


## Gestellbauteile einer Portalfräsmaschine (Gantry-Bauweise)



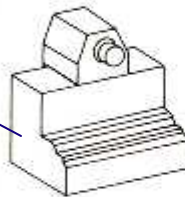
## Gestellbauformen für Drehmaschinen (spanende Werkzeugmaschinen)

*Flachbettausführung*  
(konventionell)

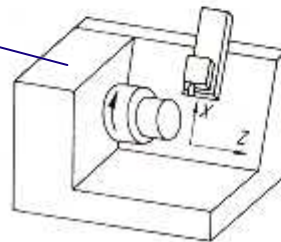


*Frontbettausführung*

Vorteil:  
ein automatisierter Werkstückwechsel ist relativ einfach zu realisieren



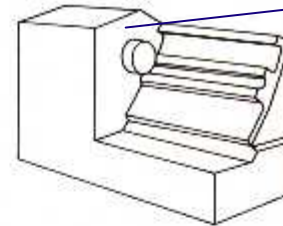
*Waagrechtausführung*  
(Spindel liegt parallel zum Fundament)



*Schrägbettausführung*

Vorteil:

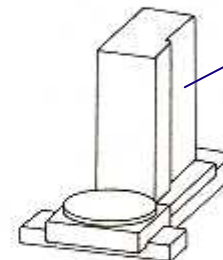
kein Späne- und Kühlmittelstau  
(geringere thermische Belastung des Maschinenbetts)



*Senkrechtausführung*

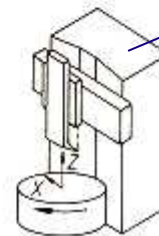
Vorteil:

schweren Bauteilen üben keine Biegebeanspruchung auf die Spindel aus



*Senkrechtausführung*

(Spindel liegt senkrecht zum Fundament)



Quelle: Dubbel

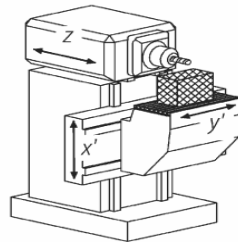
# Bauformen horizontaler Bohr- und Fräsmaschinen

## Bauform

Anzahl der Achsen im Werkzeug

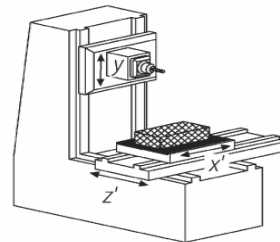
eins

Konsole



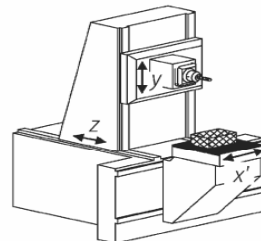
Konsolständerbauweise

Bett

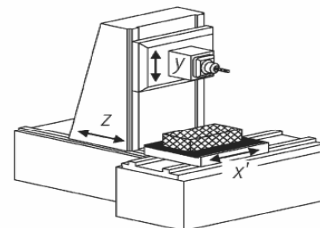


Kreuztischbauweise

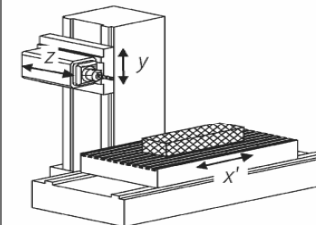
zwei



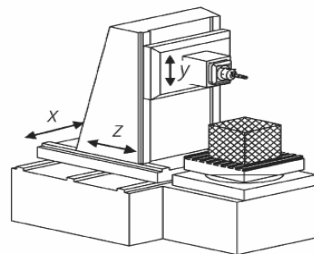
Konsolbettbauweise



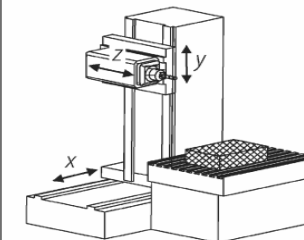
Kreuzbettbauweise



drei



Fahrständerbauweise



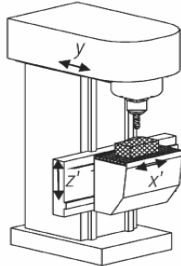
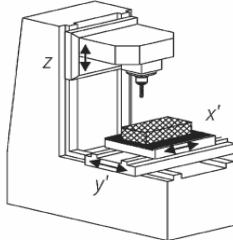
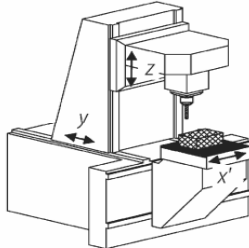
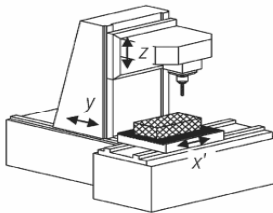
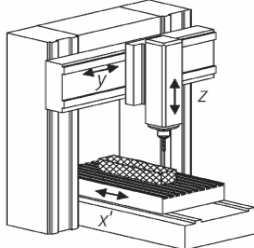
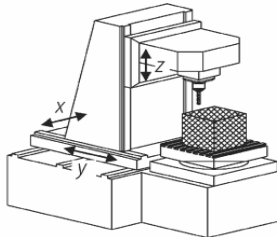
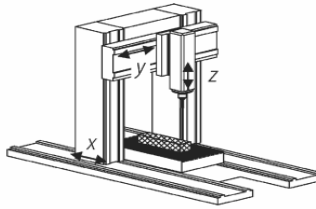
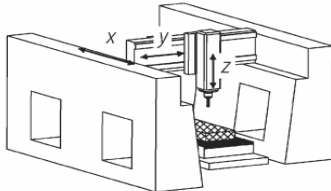
Bohrwerkbauweise

Quelle: Dubbel 2007

# Bauformen vertikaler Bohr- und Fräsmaschinen

## Bauform

Anzahl der Achsen im Werkzeug

|      | Konsole                                                                                                        | Bett                                                                                                           | Portal                                                                                                      |                                                                                                                          |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| eins |  <p>Konsolständerbauweise</p> |  <p>Kreuztischbauweise</p>    |                                                                                                             |                                                                                                                          |
| zwei |  <p>Konsolbettbauweise</p>    |  <p>Kreuzbettbauweise</p>     |  <p>Tischbauweise</p>    |                                                                                                                          |
| drei |                                                                                                                |  <p>Fahrständerbauweise</p> |  <p>Gantrybauweise</p> |  <p>obenliegende Gantrybauweise</p> |

Quelle: Dubbel 2007

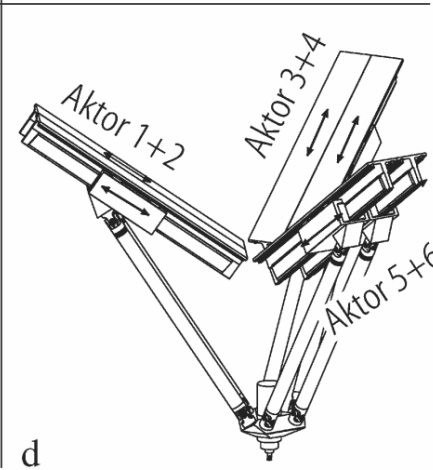
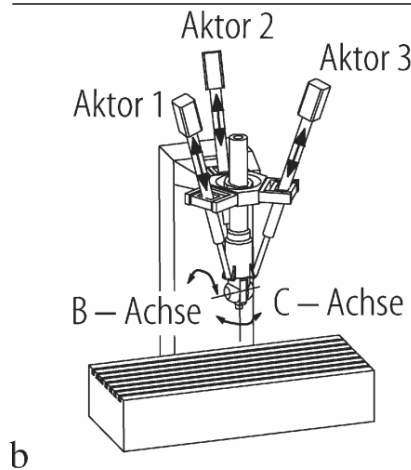
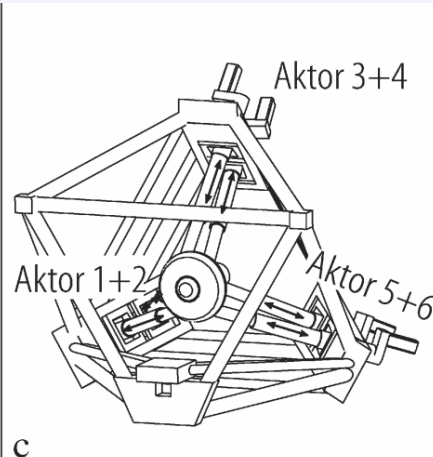
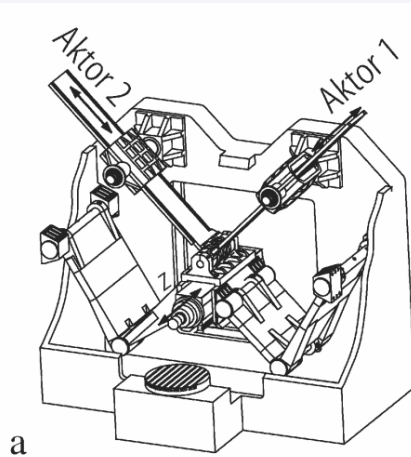
# Bauformen paralleler Kinematiken

## Bauform

### Hybride Kinematiken

### Vollparallele Kinematiken

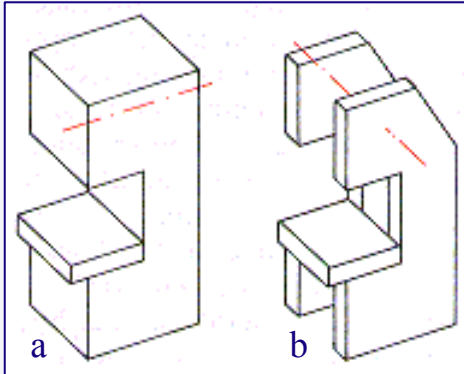
Neben den konventionellen seriellen Maschinenkinematiken existieren ebenfalls parallele bzw. hybride Bauformen. Dem Nachteil der komplexen Antriebssteuerung steht bei diesen Maschinenbauformen insbesondere ein Steifigkeitsgewinn durch die parallele Anordnung der Antriebe im Gegensatz zur seriellen Anordnung konventioneller Maschinen gegenüber. Die resultierenden Bewegungen des Werkzeugträgers können dabei je nach Maschinengestaltung drei- bis sechssachsig 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:

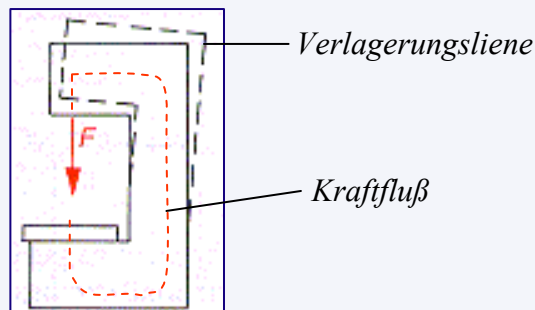
kleine bis mittlere Pressen

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

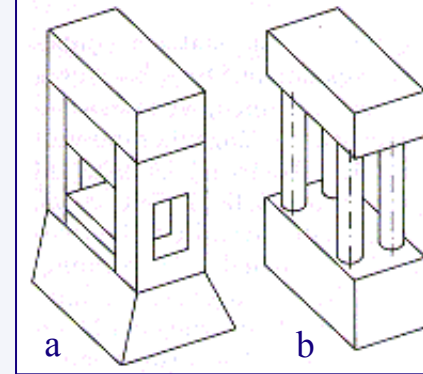
### **Vor- und Nachteil:**

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

### Verformung eines C-Gestells



## O-Gestelle



### Einsatzbereich:

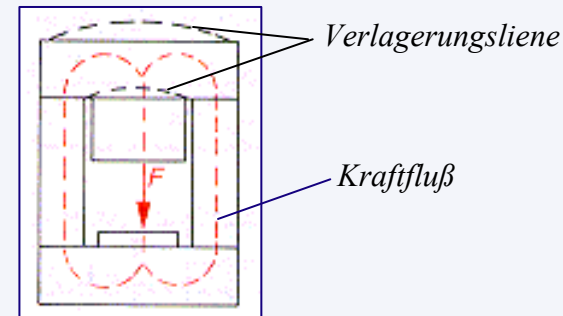
mittlere bis große Pressen

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

### **Vor- und Nachteil:**

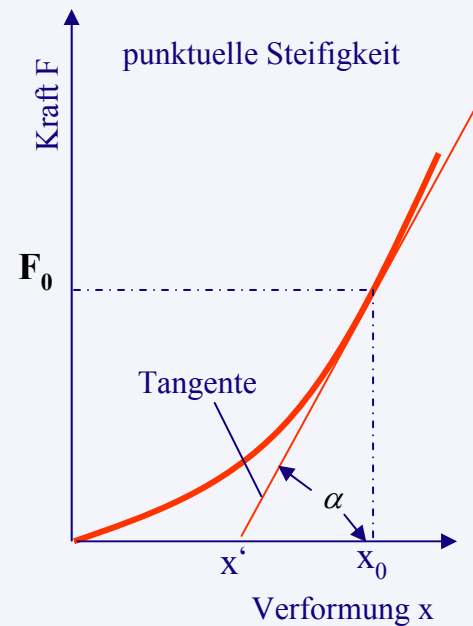
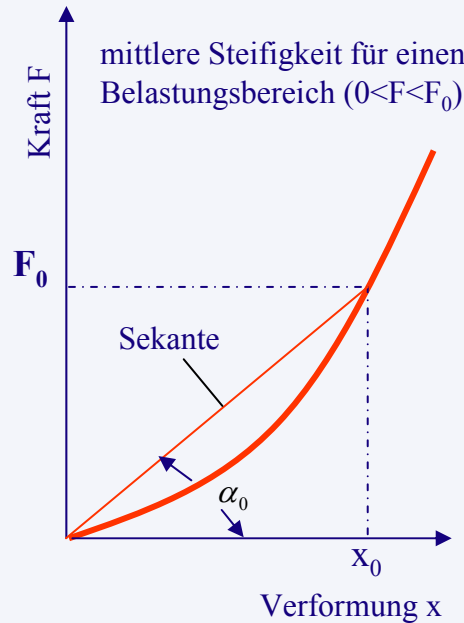
- + besonders gute Führung des Werkzeugs durch das steife O-Gestell
- schlechte Zugänglichkeit zum Arbeitsraum

### Verformung eines O-Gestells



Quelle: Hesse, Umformmaschinen

# Statische Kenngrößen: Steifigkeit und Nachgiebigkeit



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

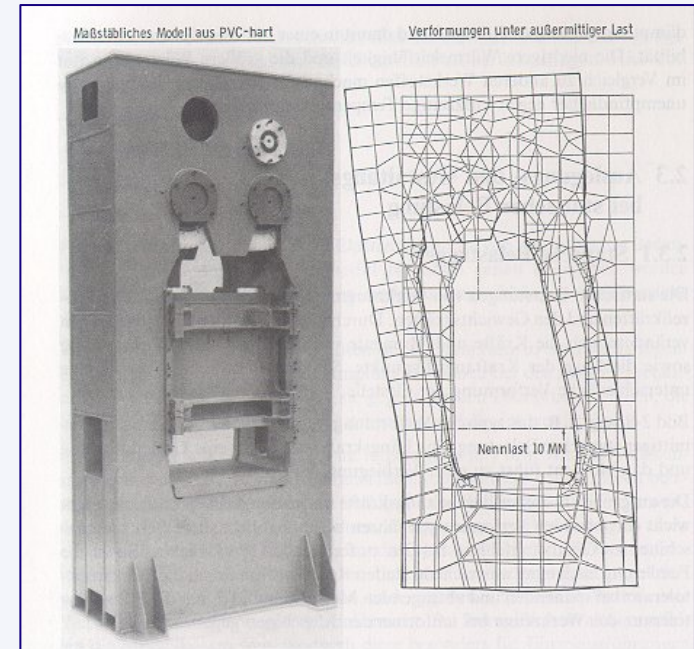
$$k = \tan \alpha_0$$

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

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

**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

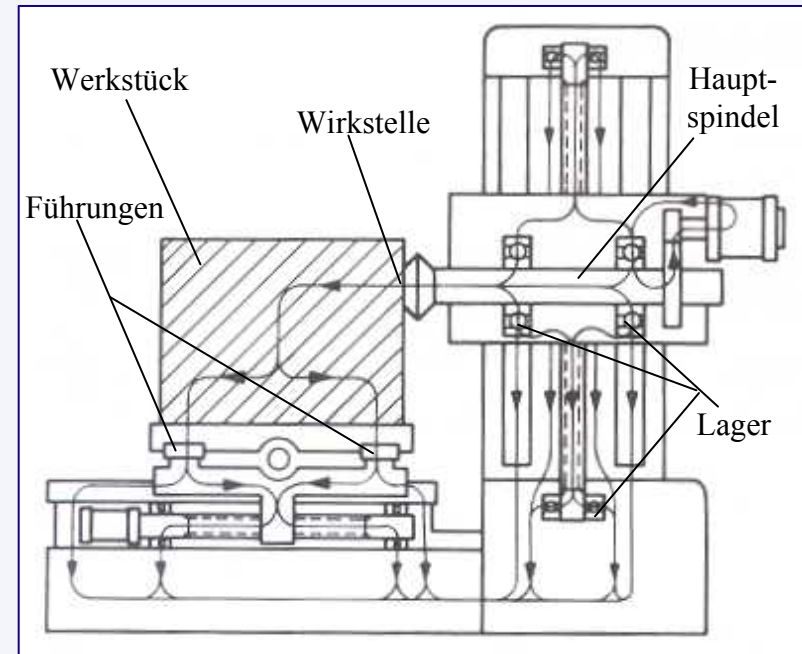
Die Gesamtverformung einer Werkzeugmaschine setzt sich aus den Deformationen aller im Kraftfluß liegenden Maschinenelemente (Lager, Führungen, Gestelle, Spindeln usw.) zusammen.

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.

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

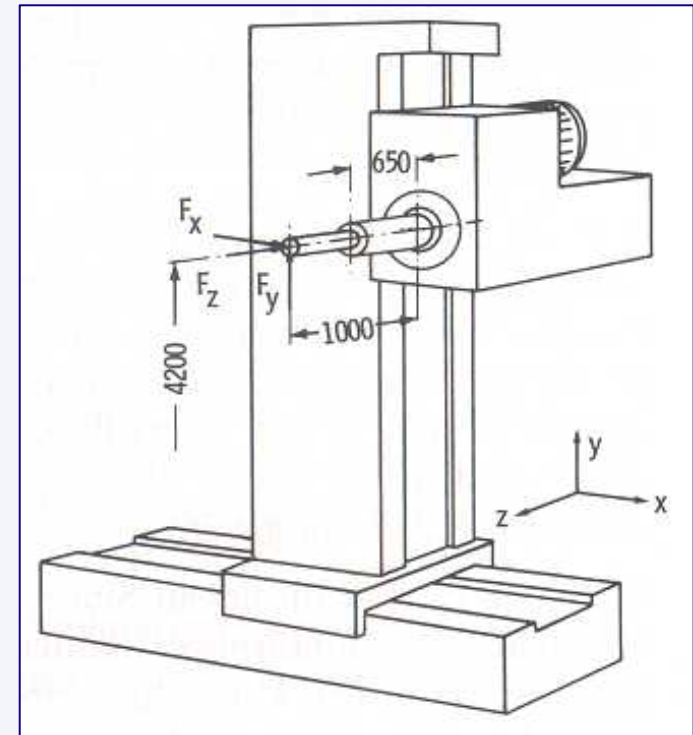
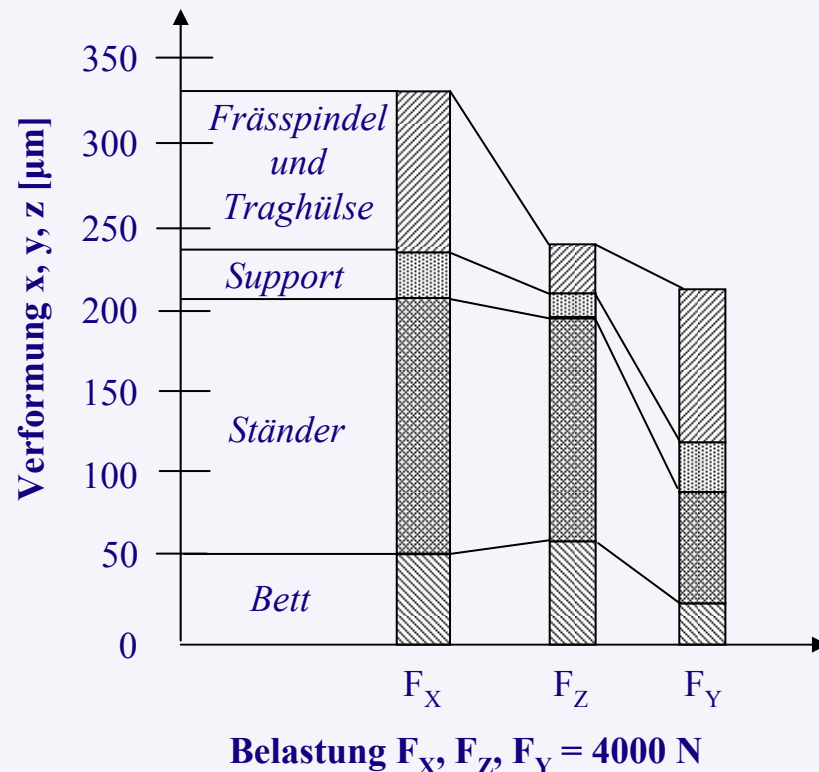
**Die Werkzeugmaschine ist also stets „weicher“ als ihr nachgiebigstes im Kraftfluß liegendes Bauteil.**



Kraftfluß in einer WZM (Quelle: Weck)

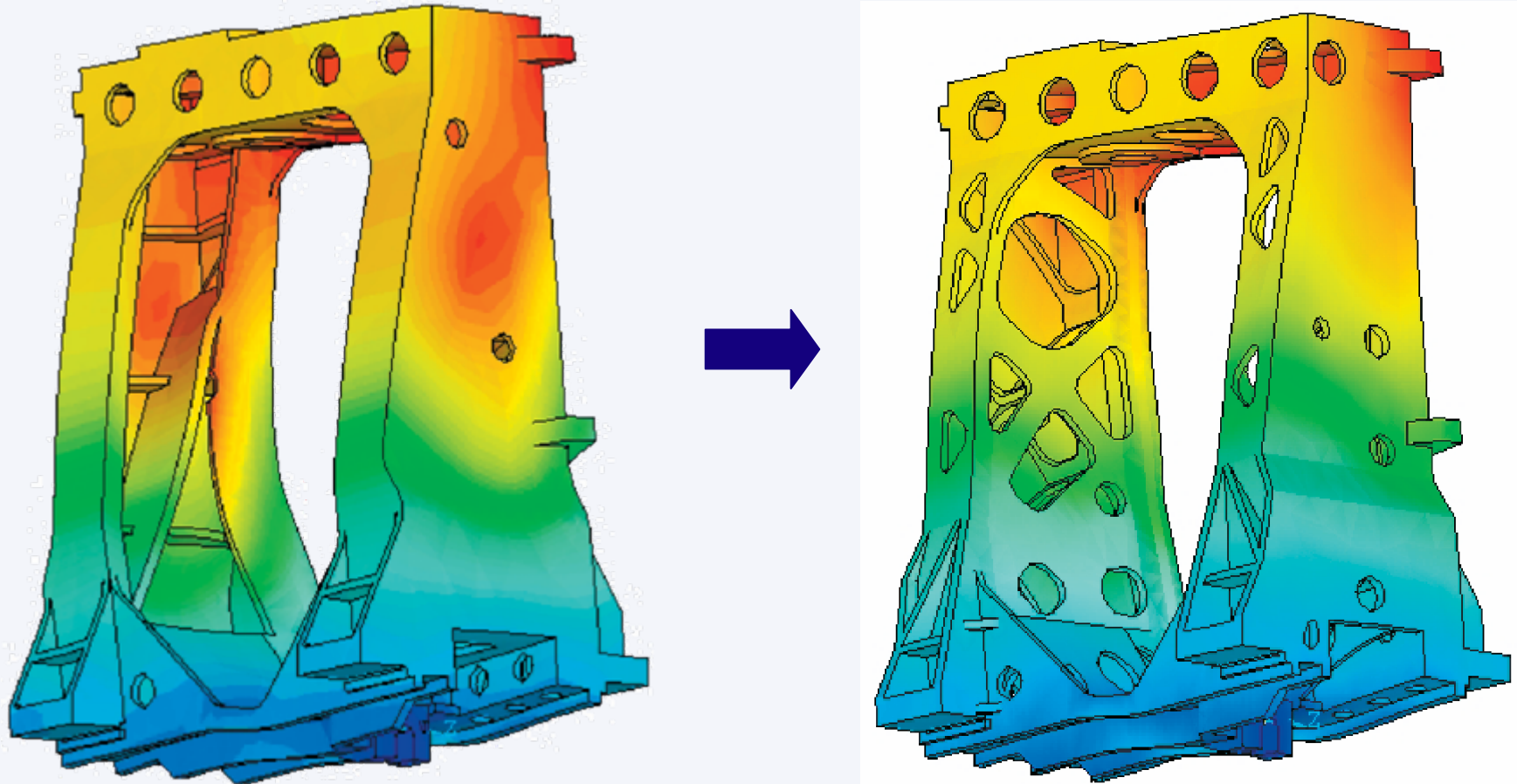
# Verformungsanalyse an einem Bohr- und Fräswerk

**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 gleichem Materialaufwand.

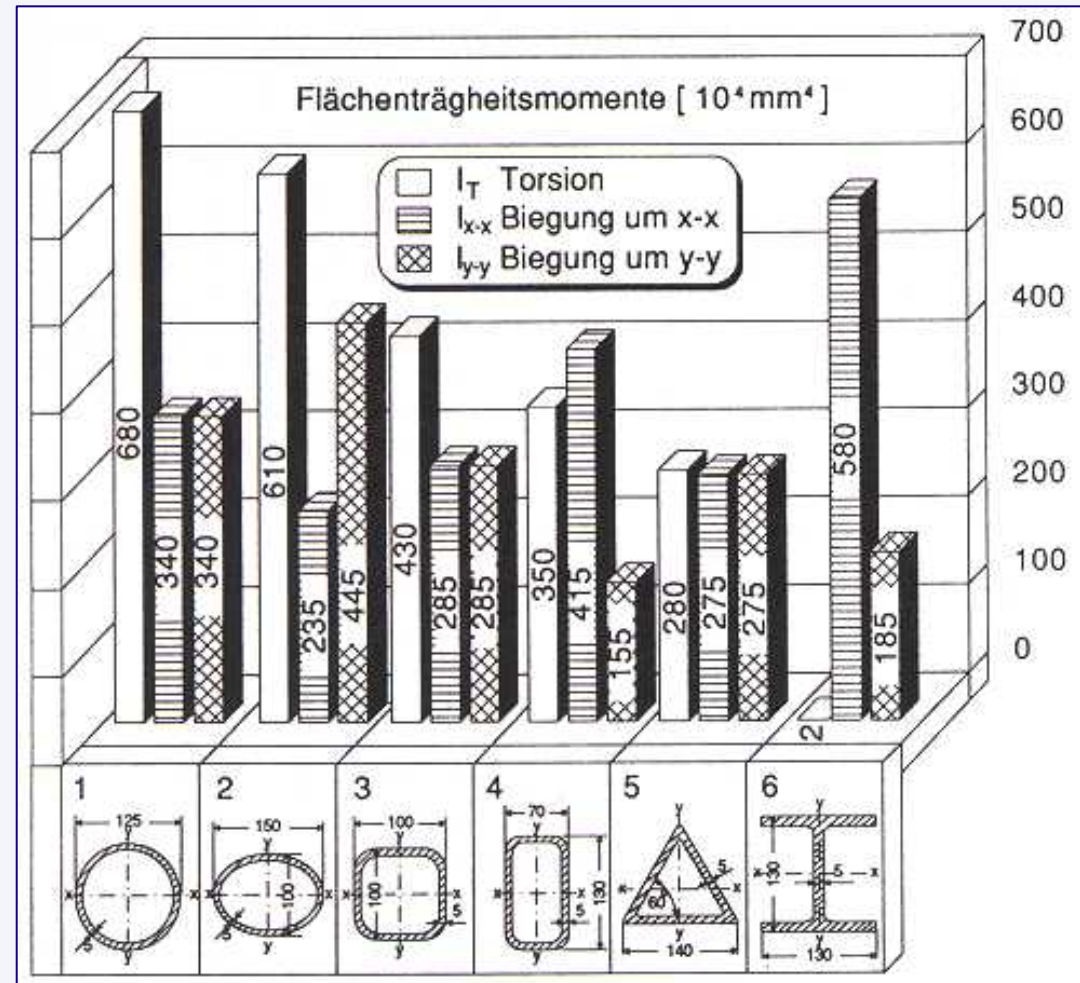
**FAZIT**

**Biegebeanspruchung:**

Verwendung von rechteckigen Querschnitten

**Torsionsbeanspruchung:**

Kreisquerschnitte, geschlossene Querschnitte



Quelle: Weck

# Verrippung von Hohlkörpern

|  | rel.Biegesteifigkeit<br>$F/2 \rightarrow$<br>$F/2 \rightarrow$<br>50 % 100 | rel.Torsionssteifigkeit<br>$F \leftarrow$<br>$F \rightarrow$<br>$X_1 \quad k = \frac{F}{X_1}$<br>50 % 100 | relatives<br>Materialvolumen<br>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%                                      |

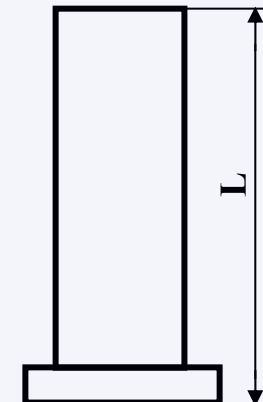
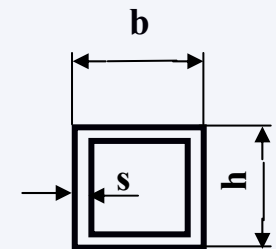
## Abmessungen:

$L = 455 \text{ mm}$

$b = 154 \text{ mm}$

$h = 154 \text{ mm}$

$s = 4 \text{ mm}$



**FAZIT**

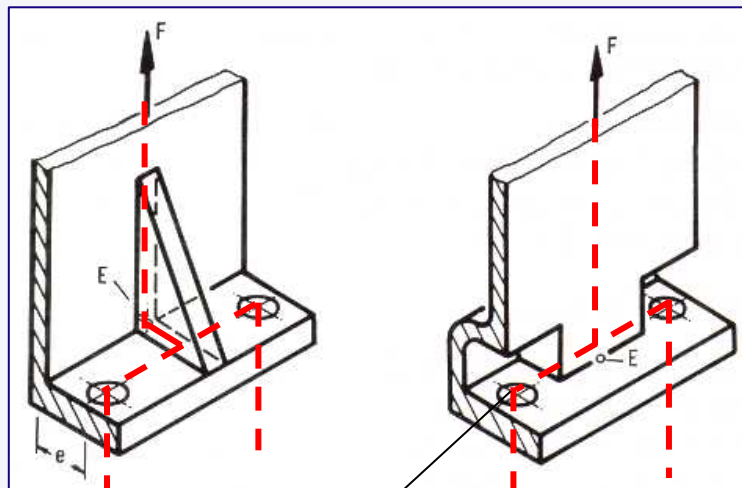
- geschlossene Bauweise (z.B.Kopfplatte)
- möglichst keine Wanddurchbrüche
- doppelt diagonale Längsverrippung

Quelle: Weck

# Fügeverbindungen: Kraftflußgerechte Flanschgestaltung

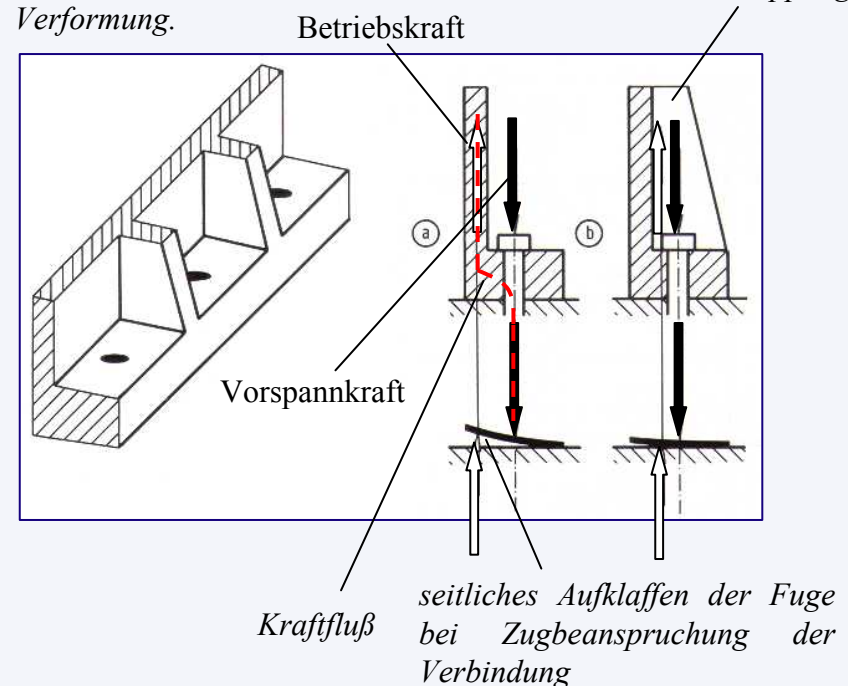
Gestellbauteile werden miteinander oder mit dem Fundament durch kraft- und formschlüssige Fügeverbindungen gekoppelt. Die dabei entstehenden Fugen beeinflussen die Gesamtsteifigkeit der Gestelle nachhaltig, da diese meistens im Kraftfluss liegen.

Die Fugestellen zwischen den Bauteilen werden häufig als Mehrschraubenverbindungen ausgeführt.



Anordnung der Schrauben in der Wandungsebene (Vermeidung der Biegebeanspruchung)

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



## Gestaltungshinweise:

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

## Verringerung der statischen Verformung durch ...

 ... *Verringerung der Belastung!*

### Eigengewichte

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

### 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 bewegenden Bauteile minimieren*  
(Schlitten, Tische)

### Prozesskräfte

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

## Verringerung der statischen Verformung durch ...

 ... **Erhöhung der Steifigkeit!**

### **kraftflussgerechte Gestaltung**

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

### **günstige Querschnittsgestaltung**

#### **Biegebeanspruchung**

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

#### **Torsionsbeanspruchung**

- geschlossene Hohlprofile
- günstige Verrippung
- Durchbrüche vermeiden

**Werkstoff mit einem hohen E-Modul verwenden**

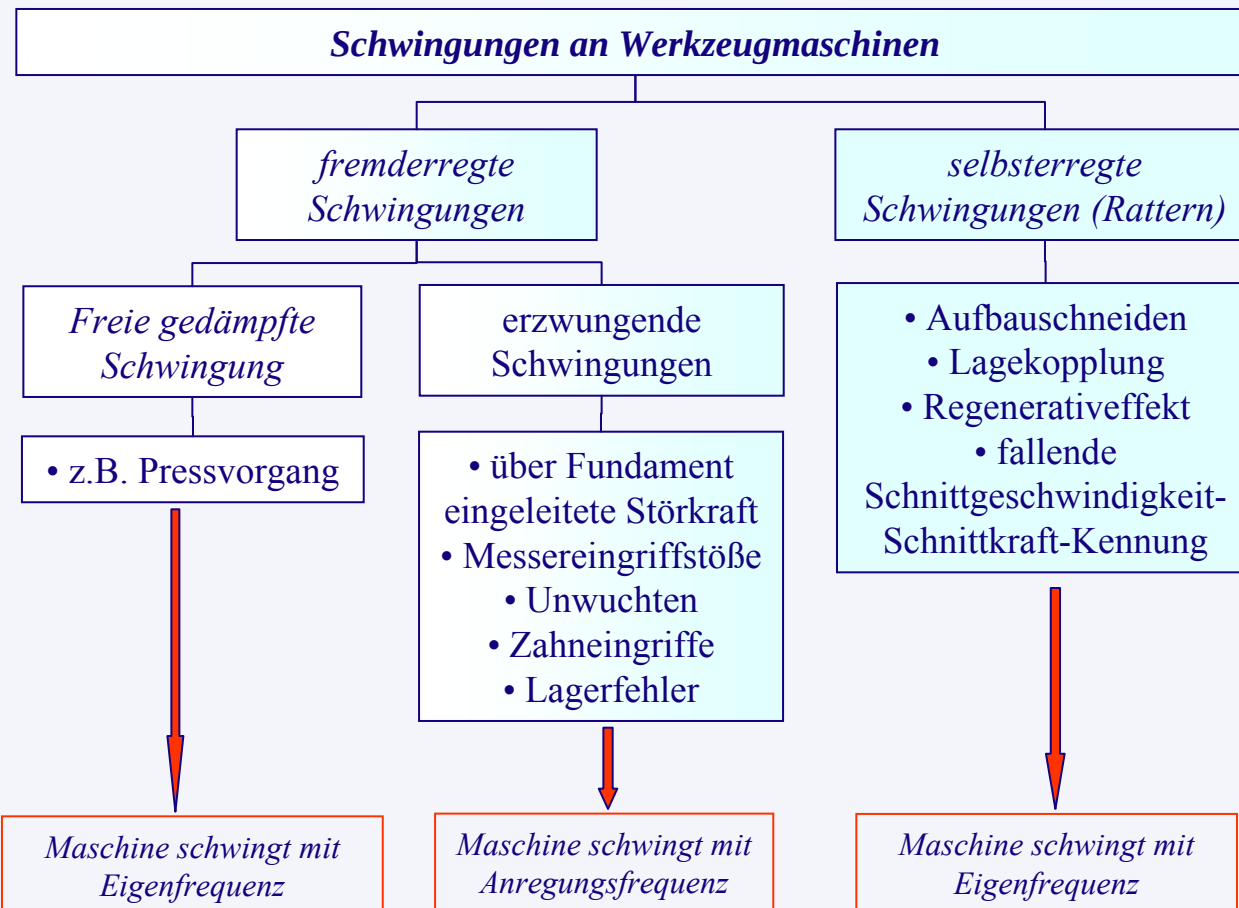
# Gestellwerkstoffe

| 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 <sup>2</sup> , 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 <sup>2</sup>                                                            |
| <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 <sup>2</sup> |
| <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 Graugußkörper auf den Beton geschraubt | niedriger E-Modul (30.000 N/mm <sup>2</sup> ), unsicheres Langzeitverhalten, Zugempfindlichkeit, lange Aushärtedauer, teure Spannverfahren, aufwendige Oberflächenbeschichtung           |

Quelle: Charchut/Tschätsch

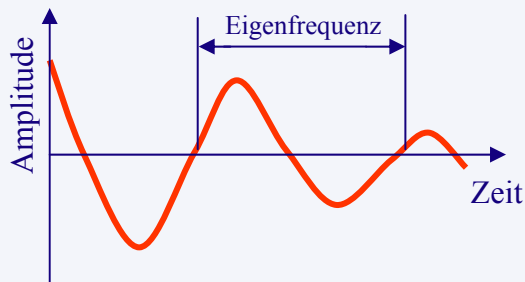
# Dynamische Belastungen

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

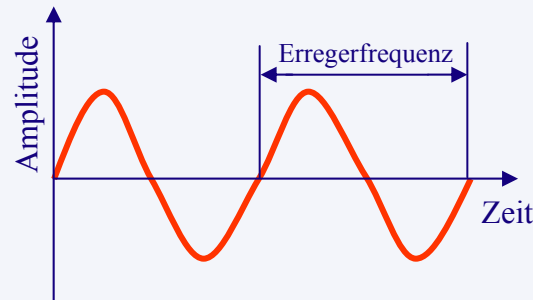


# Schwingungsformen

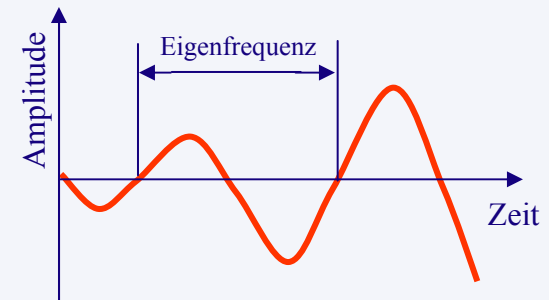
Freie gedämpfte Schwingung



Erzwungene (fremderregte) Schwingung



Selbsterregte Schwingung



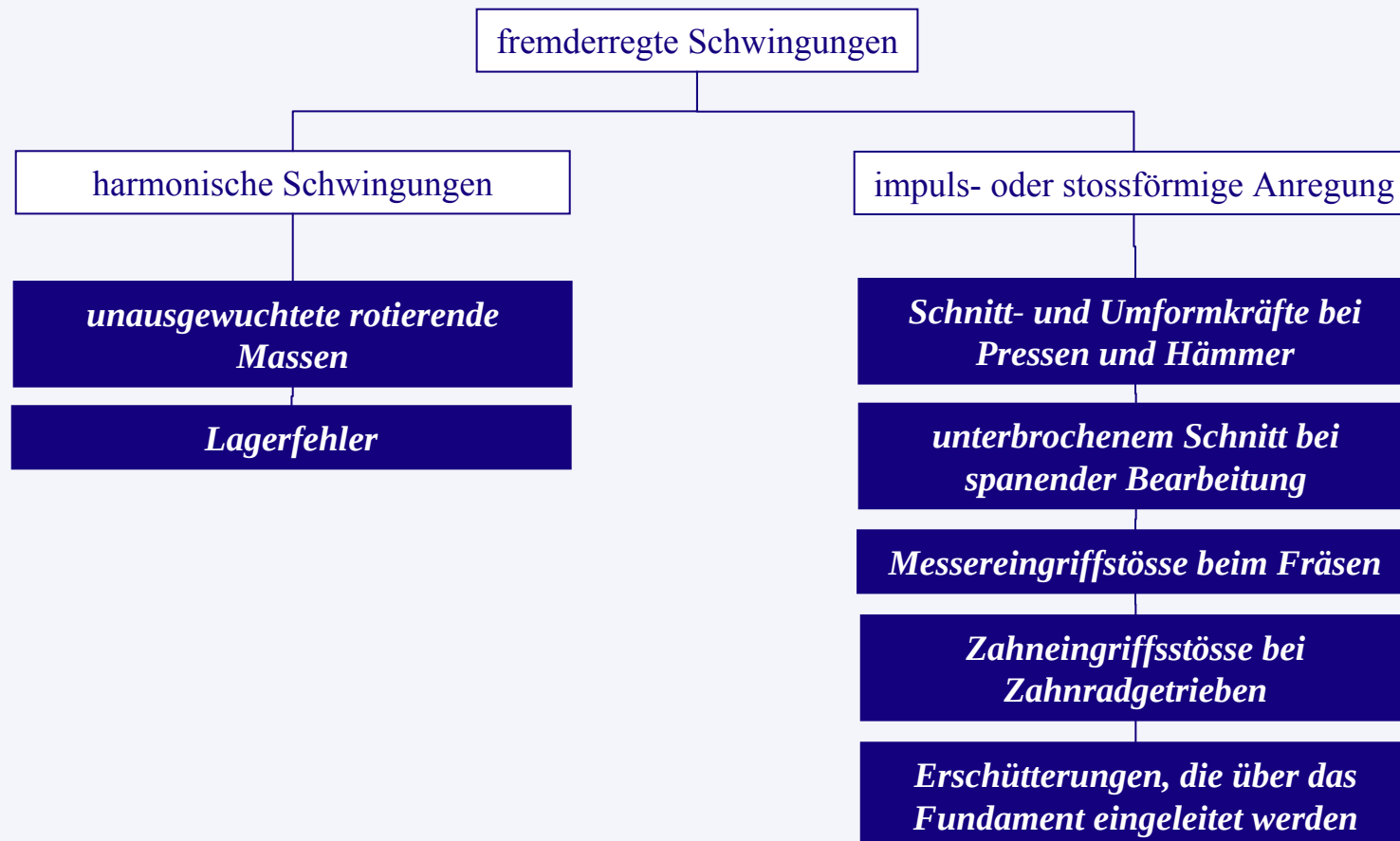
**Die Eigenfrequenz** ist die Frequenz, mit der ein schwingungsfähiges System bei einmaliger Anregung ausschwingt.

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

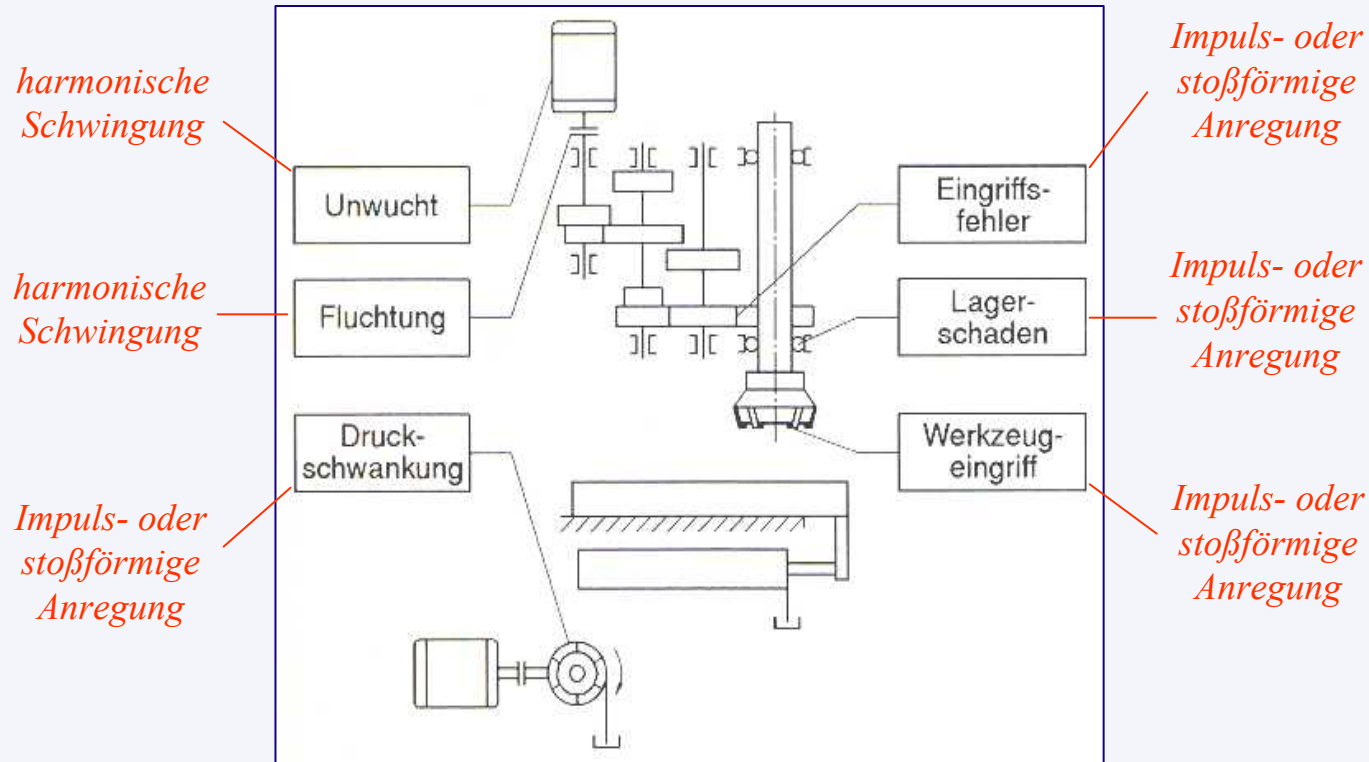
➔ *Liegt die Frequenz der Anregung im Bereich der Eigenfrequenz des Schwingungssystems, kann dies zu besonders großen Schwingungsausschlägen führen (siehe selbsterregte Schwingung). Das System wird instabil!*

# 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:

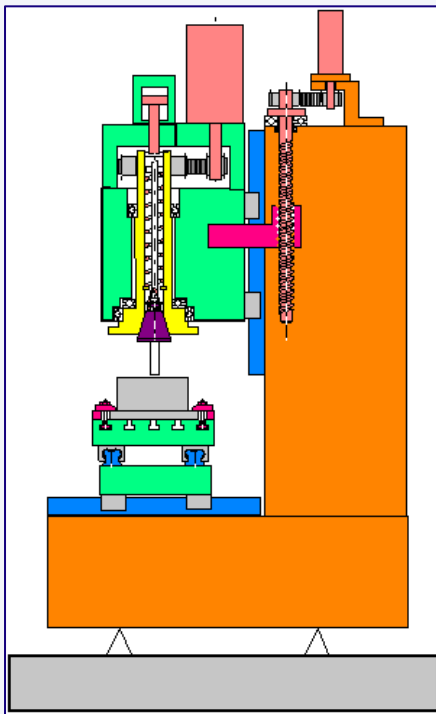
Sie verhält sich hinsichtlich des dynamischen Verhaltens wie ein Mehrmassenschwinger

## Mehrmassenschwinger:

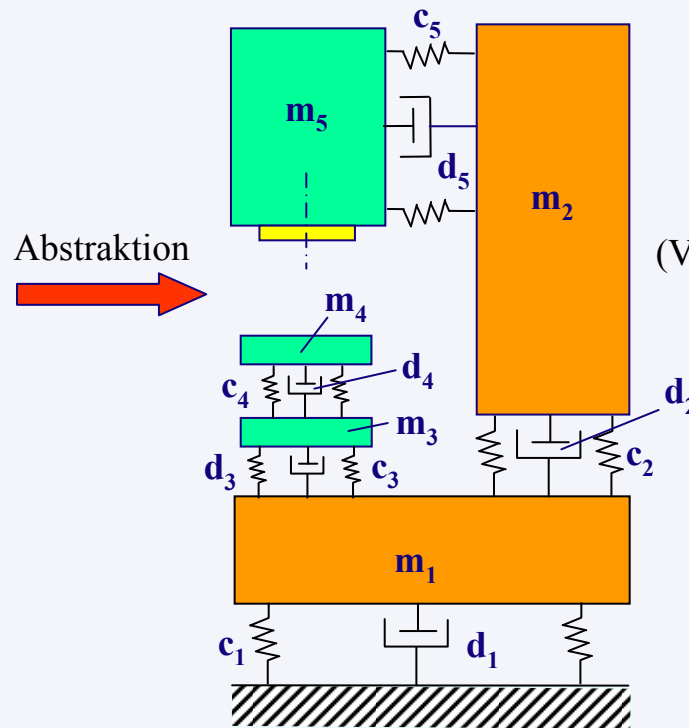
Die Schwingung eines Bauteils wird durch das benachbarte Bauelement beeinflusst. Dies führt zu einem sehr komplizierten Schwingungsgebilde

## Einmassenschwinger:

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

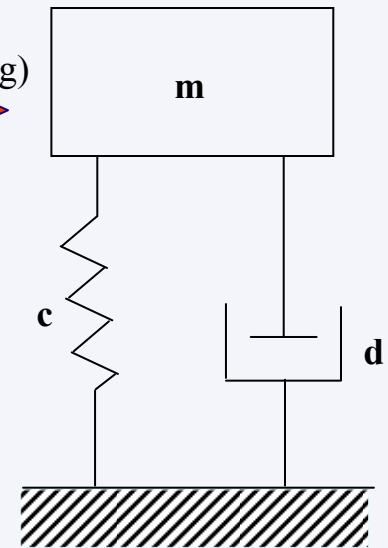


Werkzeugmaschine  
(Quelle: TU Dresden)



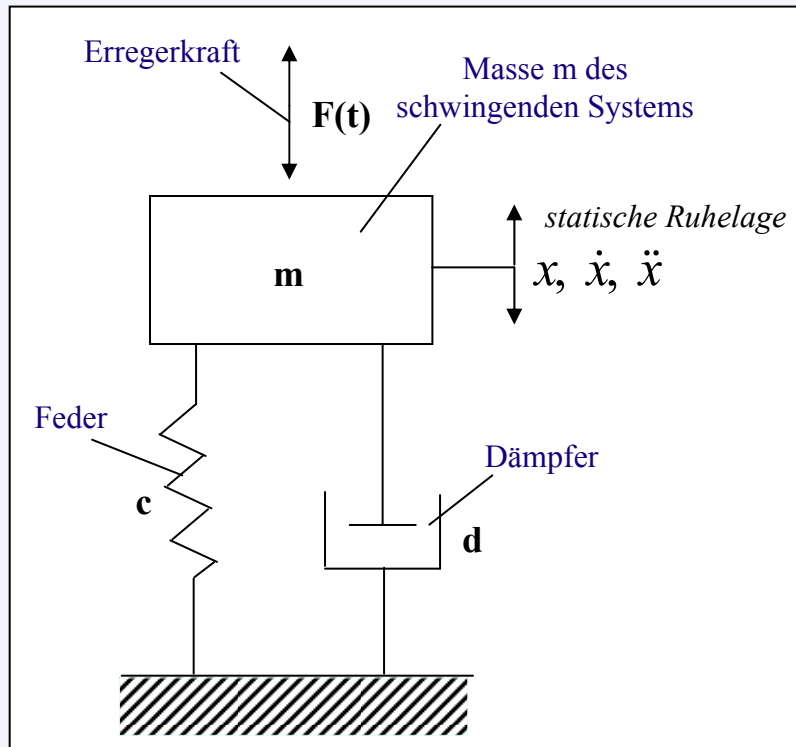
WZM als ein mehrfach  
gekoppeltes Schwingungssystem  
(nach Perovic, WZM)

Abstraktion  
(Vereinfachung)



Einmassenschwinger

# Abstraktion: Modell eines Einmassenschwingers



Einmassenschwinger

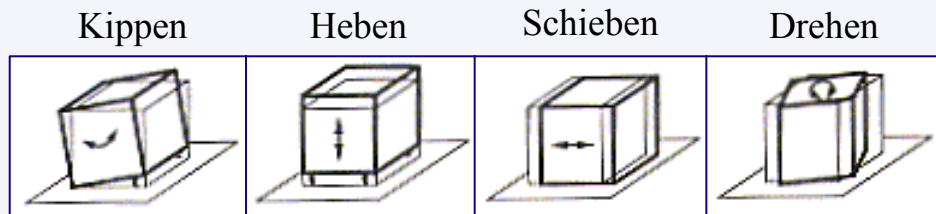
Aus dem Kräftegleichgewicht, für eine gedämpfte Schwingung mit Erregerkraft  $F(t)$ , in  $x$ -Richtung folgt eine (inhomogene) Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{Masse} & & \text{Dämpfung} & & \text{statische Steifigkeit} & & \\
 | & & | & & | & & \\
 m & \ddot{x} & + & d & \dot{x} & + & cx = F(t) \\
 \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \\
 \text{Massenkraft } F_m & & & \text{Dämpfungskraft } F_d & & & \text{Federkraft } F_c
 \end{array}$$

## Dämpfung in Gestellbauteilen

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

### Starrkörperschwingung

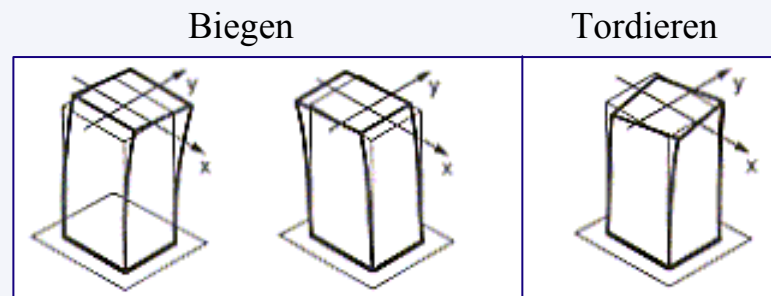


*Dämpfung wird beeinflusst durch:*

- 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 <sup>2</sup> , 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 <sup>2</sup>                                                            |
| 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 <sup>2</sup> |
| 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 <sup>2</sup> ), unsicheres Langzeitverhalten, Zugempfindlichkeit, lange Aushärtedauer, teure Spannverfahren, aufwendige Oberflächenbeschichtung           |

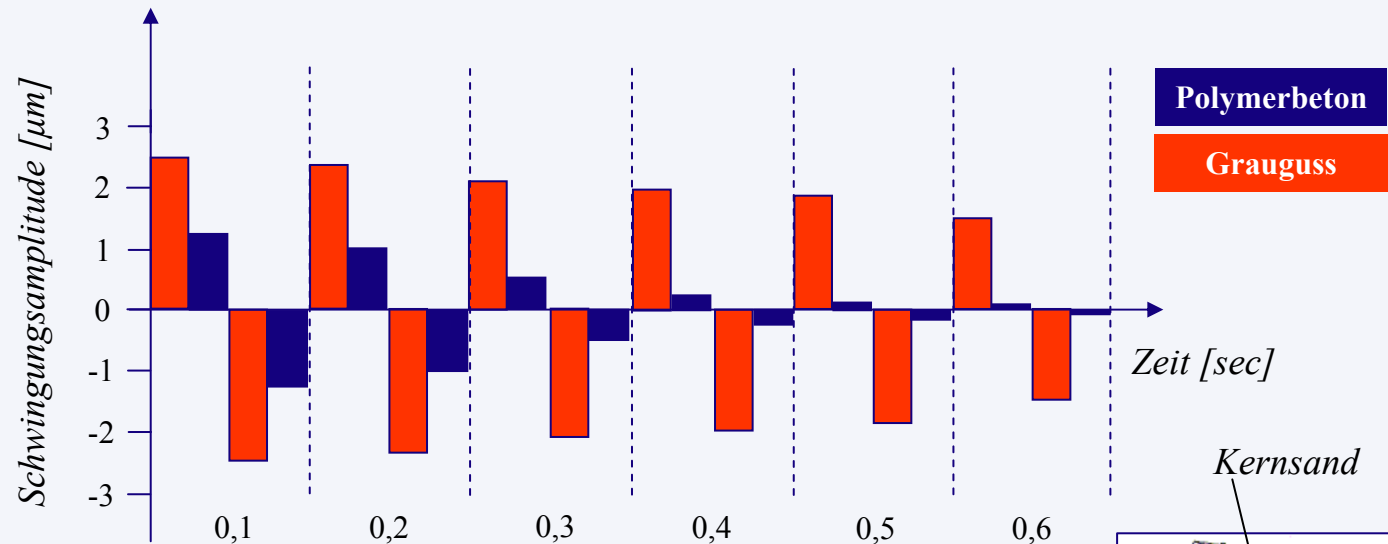
*Obwohl Stahl eine wesentlich schlechtere Dämpfungseigenschaft als Grauguss besitzt, wird dieses Defizit in der Regel durch die hohe Dämpfung in den Koppelstellen (Schweißfugen) kompensiert.*

Quelle: Charchut/Tschätsch

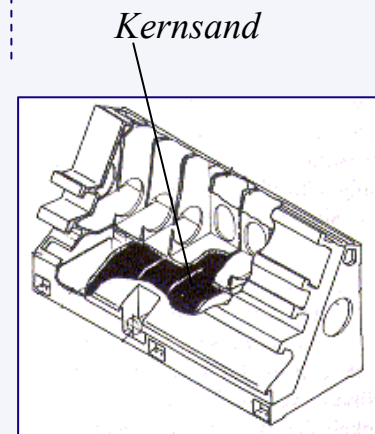
# Dämpfung in Gestellbauteilen

## Schwingungsdämpfung von Grauguss im Vergleich zu Polymerbeton

(Quelle: Koether, Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure)



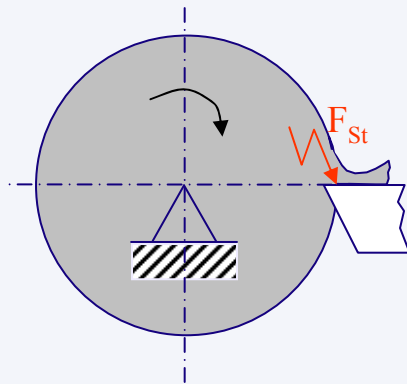
Um die Dämpfungseigenschaften von *Gussgestellen* zu verbessern, belässt man den Kernsand im Gestell (trockene Reibung).



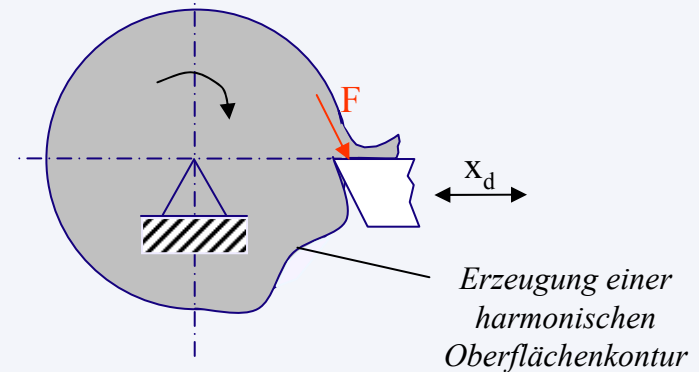
konventionelles Drehmaschinenbett aus Grauguss (Quelle: Weck)

# Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Regenerativereffekt

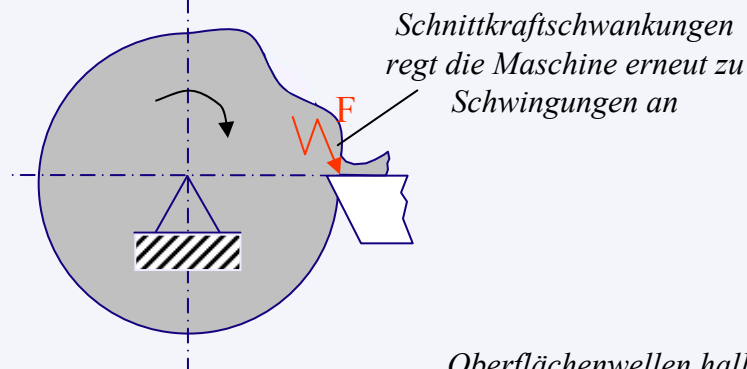
Impulsartige Schnittkraftänderung



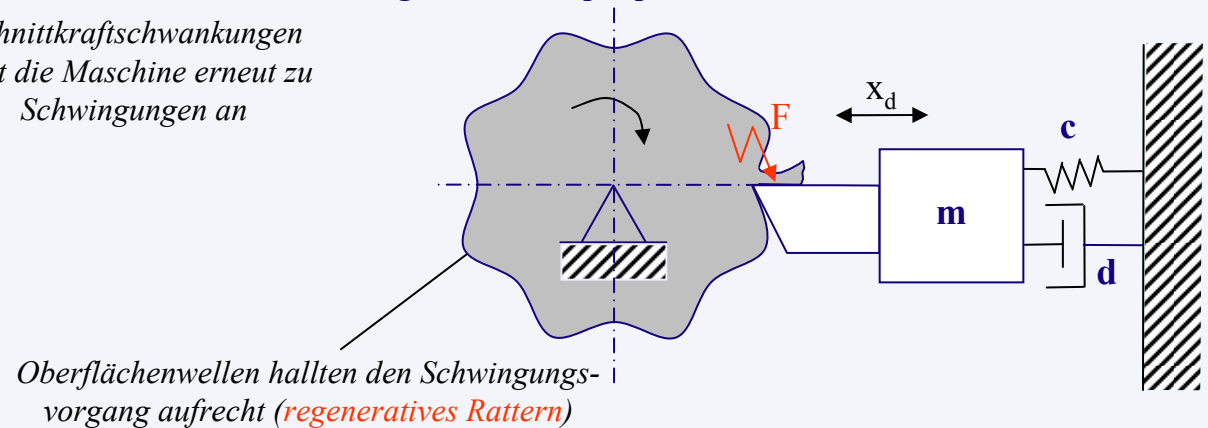
Relativbewegung zwischen  
Werkzeug und Werkstück



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.



Oberflächenwellen halten den Schwingungs-  
vorgang aufrecht (*regeneratives Rattern*)

# Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Lagekopplung

## Rattern durch Lagekopplung

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

### Belastungsfall:

Die Masse  $m$  schwingt in Richtung 1 und 2 mit gleicher Frequenz jedoch phasenverschoben und mit unterschiedlich großen Amplituden. Die Werkzeugschneide beschreibt dadurch eine Ellipsenbahn (siehe Skizze).

### Vom Punkt A zum Punkt B

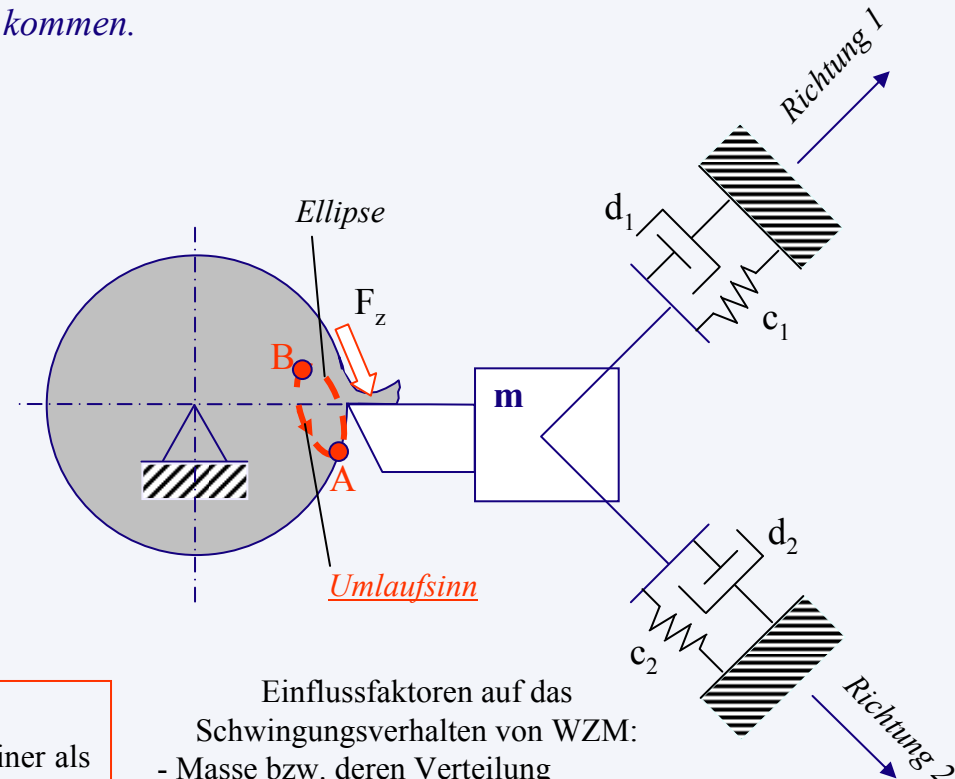
Während der Bewegung von A nach B muss gegen die Zerspankraft  $F_z$  Energie  $W_1$  an den Zerspanvorgang abgegeben werden.

### Vom Punkt B zum Punkt A

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

### Resultat

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



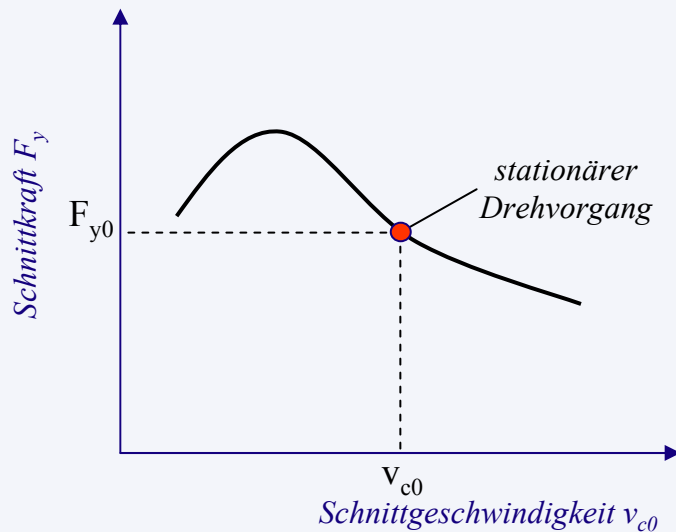
Einflussfaktoren auf das

Schwingungsverhalten von WZM:

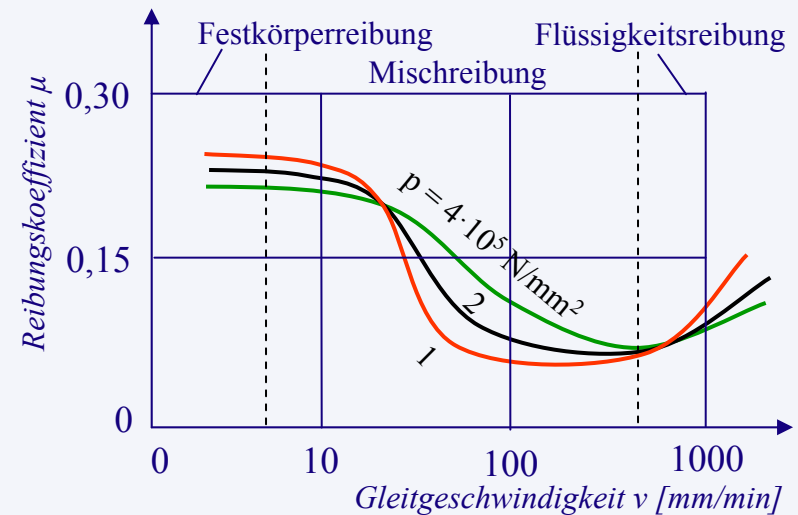
- Masse bzw. deren Verteilung
- Steifigkeit
- Dämpfung
- **Richtungsorientierung + Frequenzlage einzelner Eigenschwingungen**

# Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Fallende Schnittkraft

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



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



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

# Selbsterregte Schwingungen (Rattern): Fallende Schnittkraft

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

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

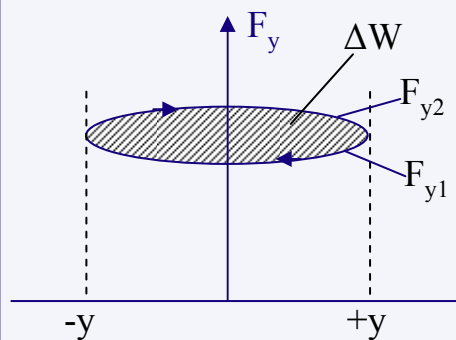
$$v = v_{c0} - \dot{y}$$

daraus folgt weiterhin:

$$F_y > F_{c0}$$

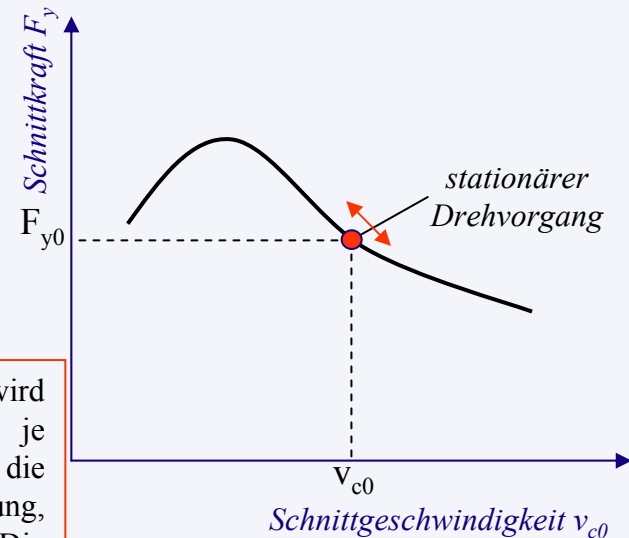
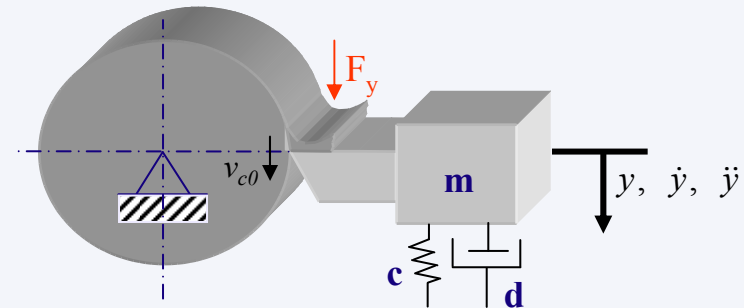
Für das Rückschwingen gilt das Umgekehrte!

## Energiebetrachtung



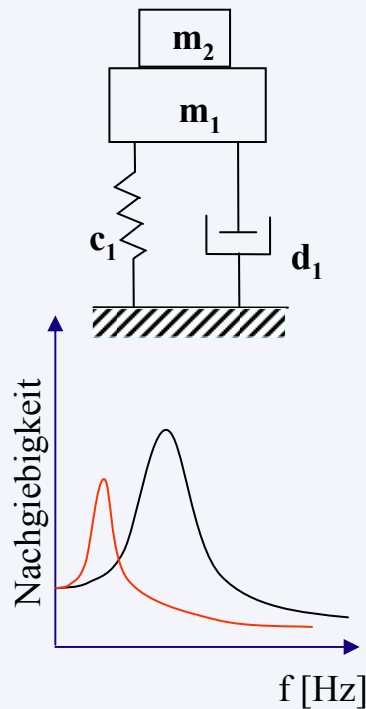
$$\Delta W = \int_{-y}^y F_{2y} dy + \int_y^{-y} F_{1y} dy$$

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



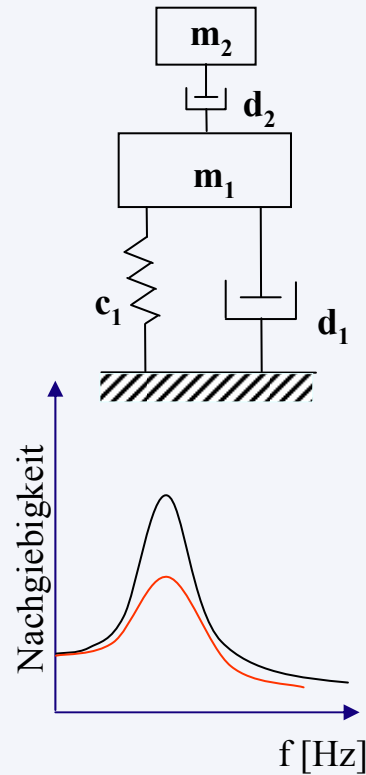
# Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung: Dämpfungssysteme

## Impakt-Dämpfer



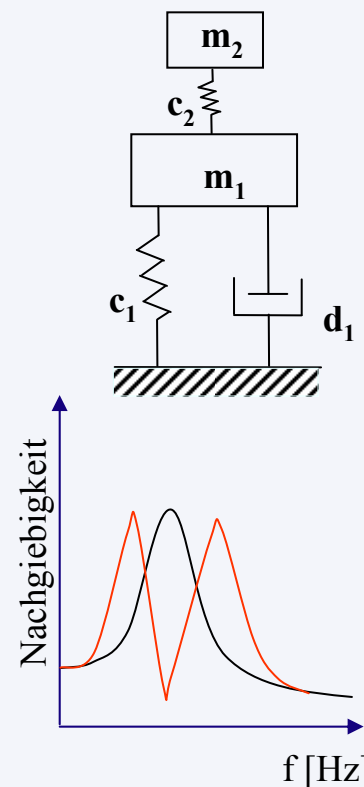
- keine zusätzliche Resonanzstelle (kein Energiespeicher „Feder“)

## Lanchester-Dämpfer



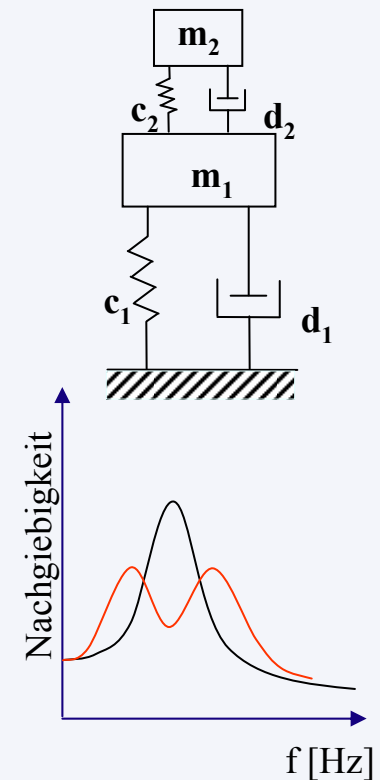
- keine zusätzliche Resonanzstelle (kein Energiespeicher „Feder“)
- das System benötigt eine relativ große Masse  $m_2$

## Tilger



- eine zusätzliche Resonanzstelle (wegen Energiespeicher „Feder“)

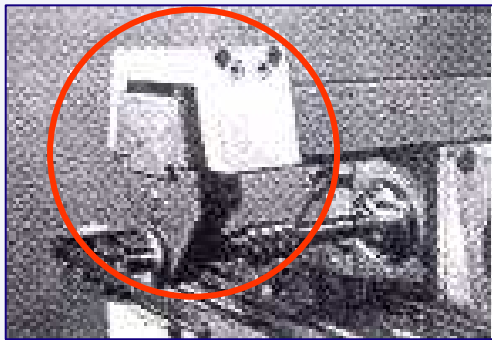
## Hilfsmasse-Dämpfer



- eine zusätzliche Resonanzstelle (wegen Energiespeicher „Feder“)

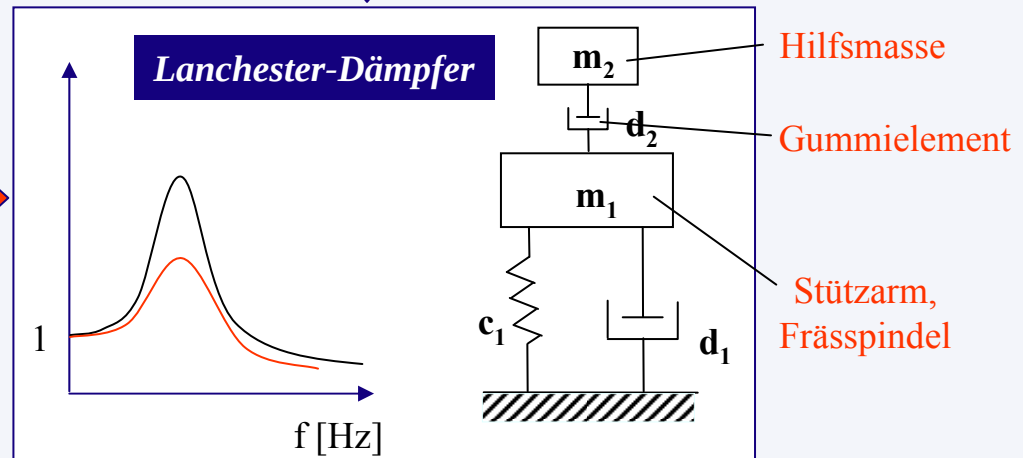
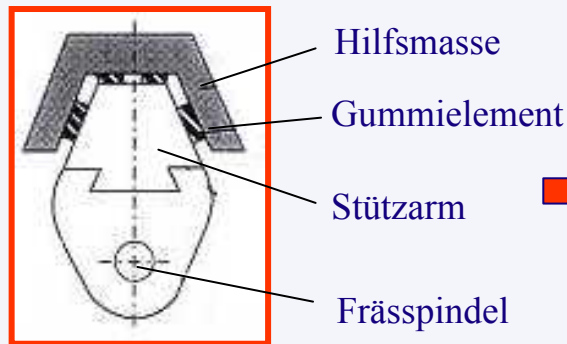
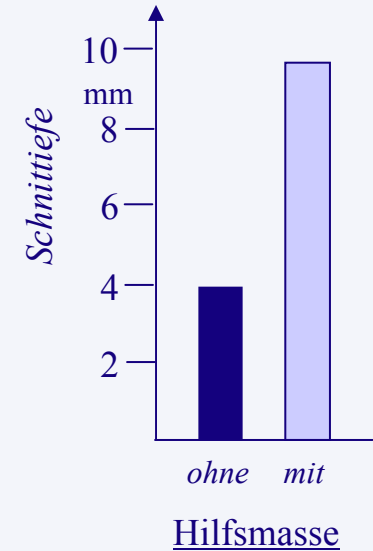
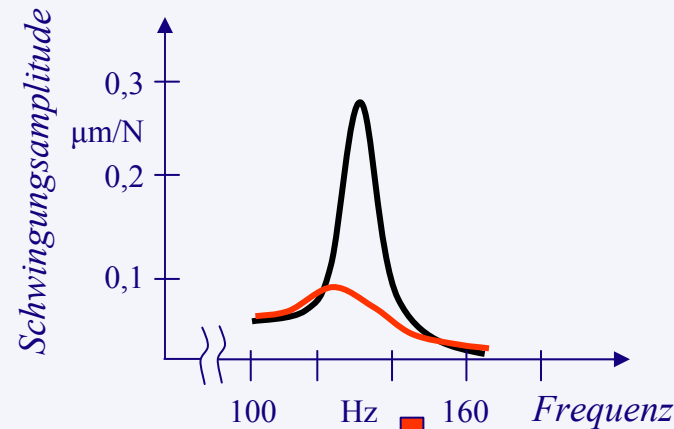
Quelle: Tönshoff, Werkzeugmaschinen

# Dämpfungssysteme: Fräsmaschine (Beispiel)



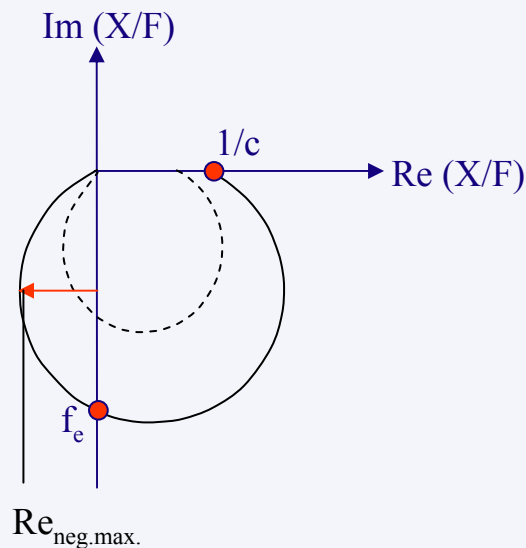
Quelle: Prof. Uhlmann, iwf

Waagrecht-Konsol-Fräsmaschine

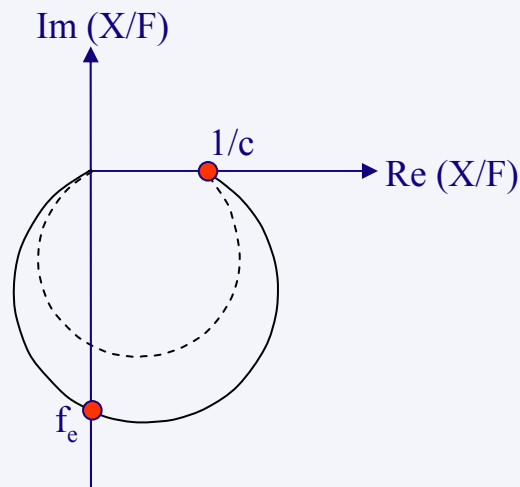


# Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

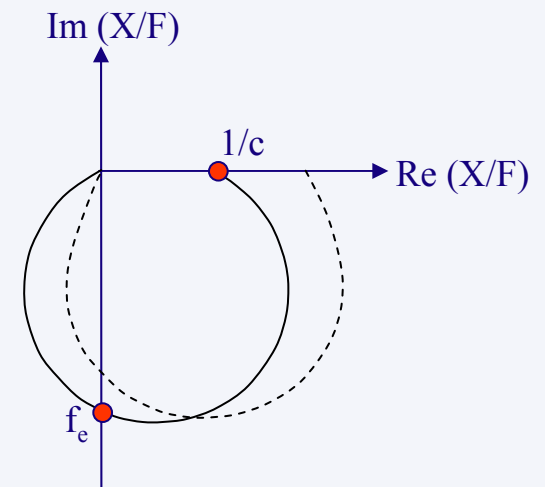
Zielrichtung bei allen Maßnahmen ist die Verringerung des negativen Realteils der Ortskurve, der ein direktes Maß für die Ratterneigung der Maschine ist.



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)

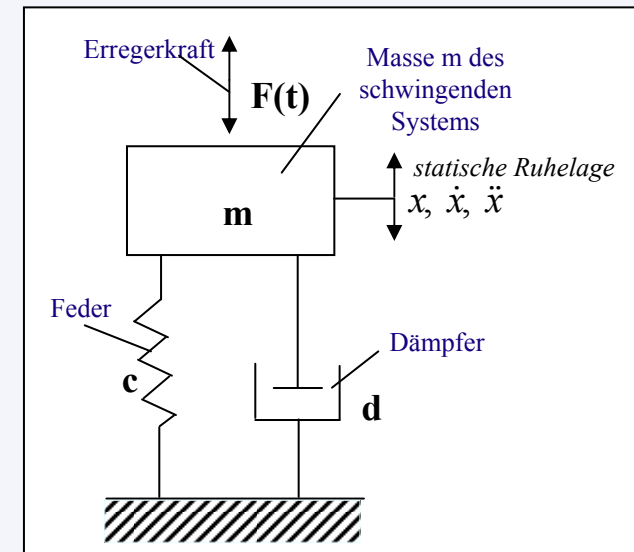
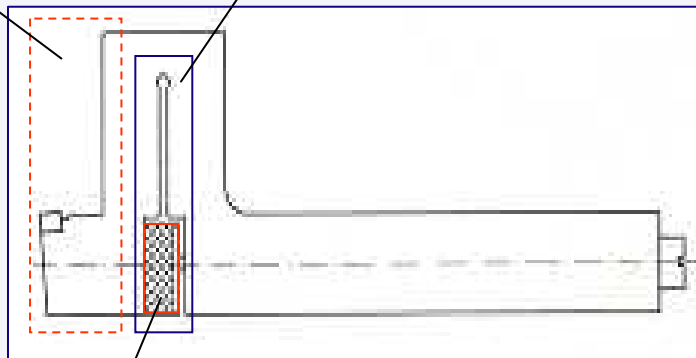
Schwanenhalsprinzip: Ein im Kraftfluss liegendes statisch weiches Element mit hoher Eigenfrequenz und Dämpfung verschiebt den gesamten Nachgiebigkeitsfrequenzgang in Richtung positiver Realanteile.

geschwächter Meißel

schwingende Masse  
(linker Teile des  
Schwanenhalses)

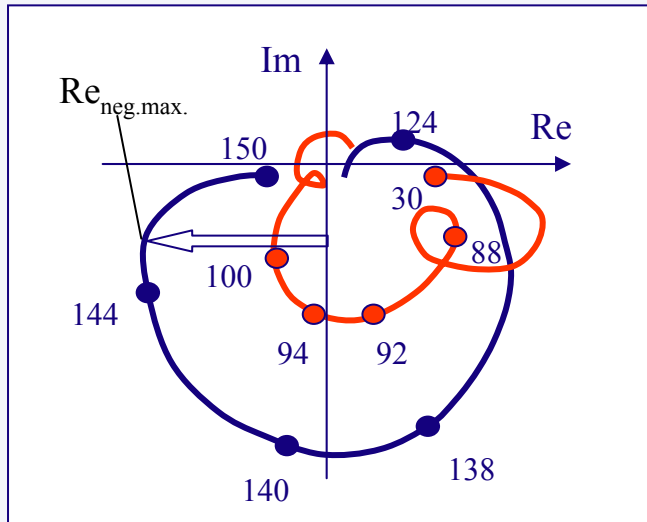
Feder (Einschnitt)

Dämpfer  
(dämpfungswirksames  
Material)



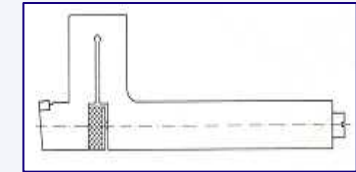
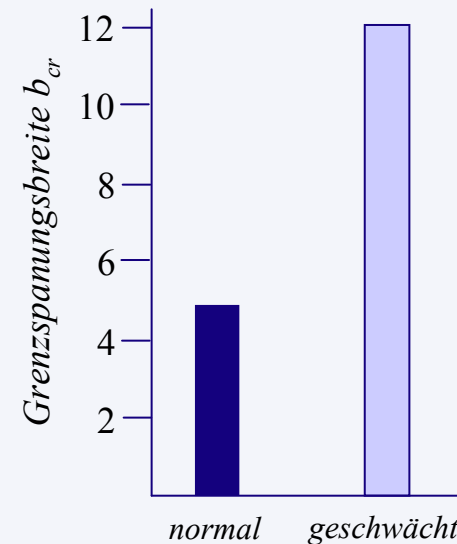
Einmassenschwinger

## 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 **Grenzspanungsbreite  $b_{cr}$**  wieder!

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

# Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

## ➔ *Werkzeug mit ungleicher Teilung*

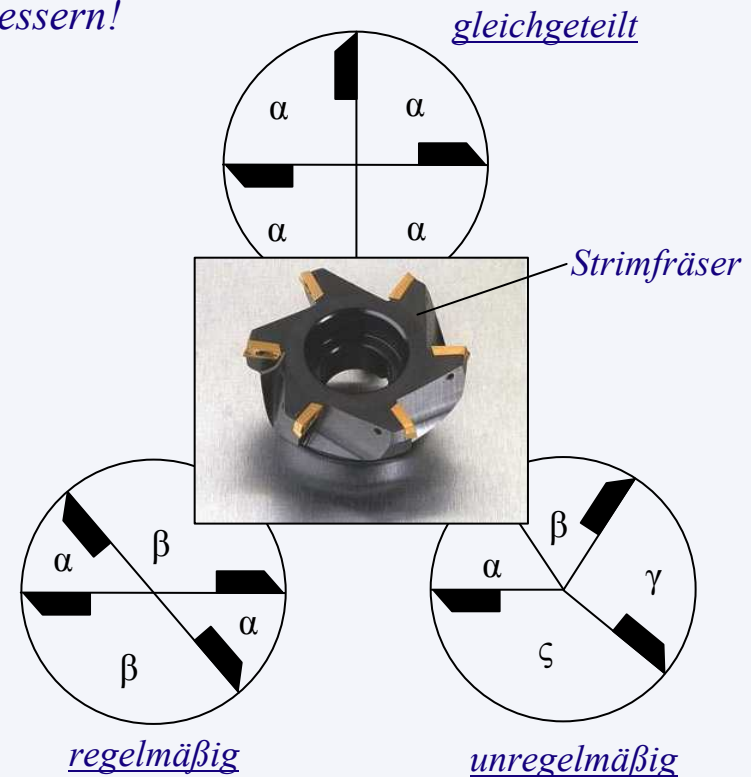
*Das Stabilitätsverhalten eines Zerspanungsprozesses kann sich durch den Einsatz ungleichgeteilter Werkzeuge verbessern!*

### *Das Wirkprinzip beruht*

*auf dem Einfluss des sich ständig ändernden Phasenwinkels  $\varepsilon$  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.*

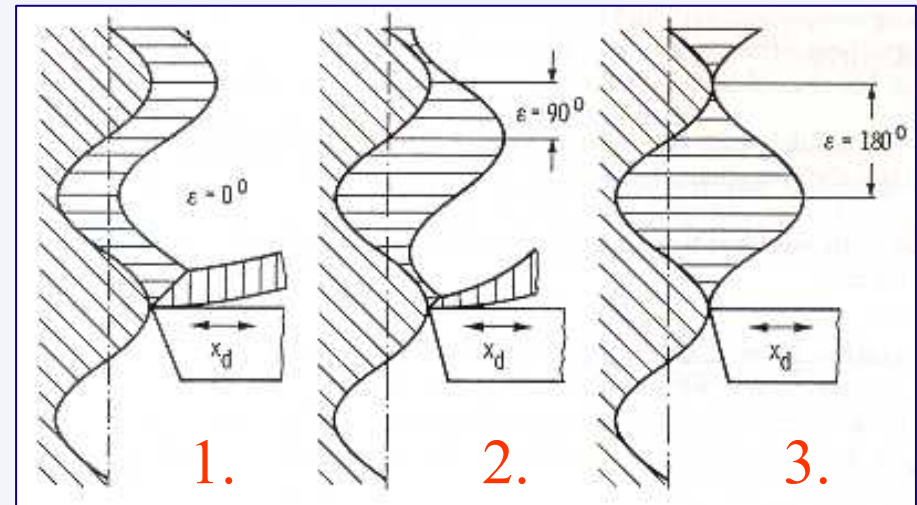


*Die sich normalerweise einstellende stationäre Ratterschwingung wird durch die Phasenmodulation des Werkzeugs ständig gestört!*



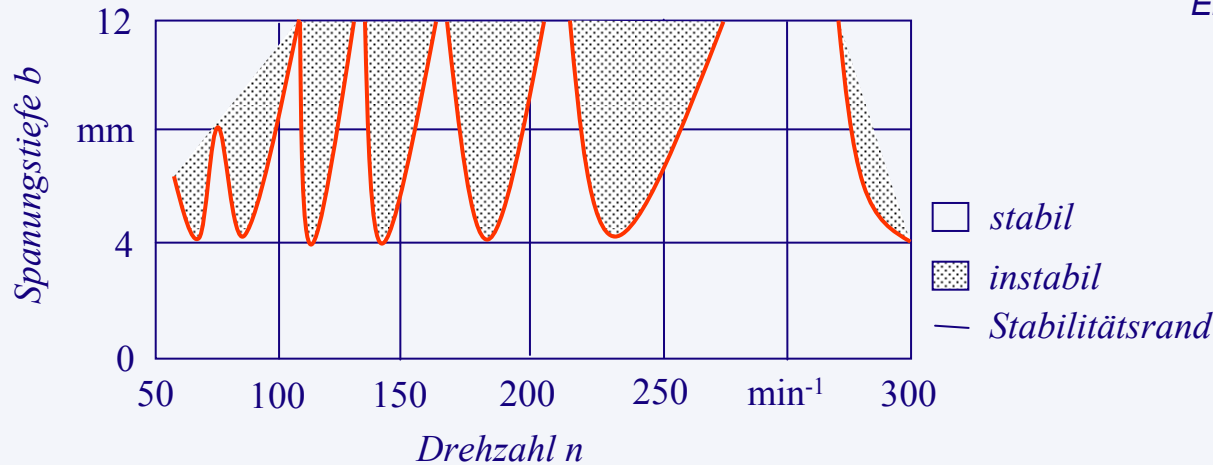
## Einfluß des Phasenwinkels $\varepsilon$ auf die Spandickenmodulation

1. *Einschneidfrequenz des Werkzeugs =  
Schwingungsfrequenz des Werkstücks*  
*Phasenwinkel  $\varepsilon$  zwischen den Schwingungen  $0^\circ$*   
*keine Spandickenmodulation*
2. *Einschneidfrequenz des Werkzeugs  $\neq$   
Schwingungsfrequenz des Werkstücks*  
*Phasenwinkel  $\varepsilon$  zwischen den Schwingungen  $90^\circ$*   
*Spandickenmodulation*
3. *Einschneidfrequenz des Werkzeugs  $\neq$   
Schwingungsfrequenz des Werkstücks*  
*Phasenwinkel  $\varepsilon$  zwischen den Schwingungen  $180^\circ$*   
*maximale Spandickenmodulation*

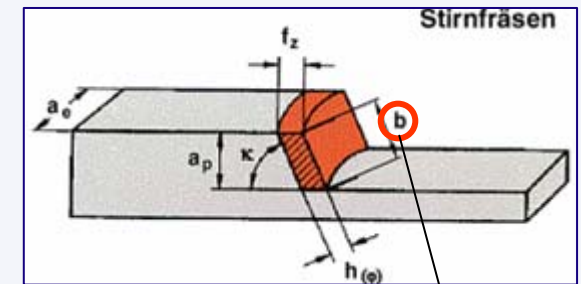


# Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

gleichgeteilt

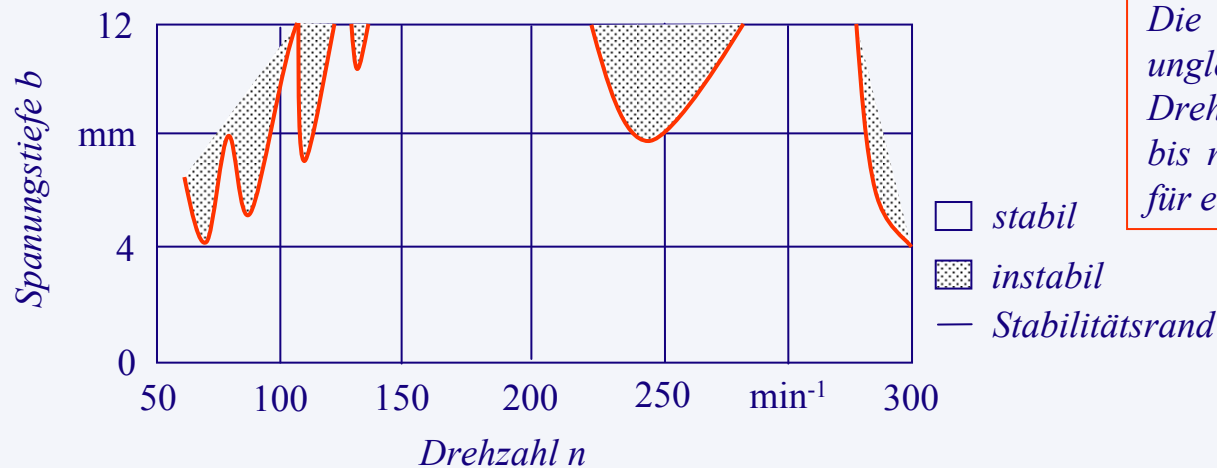


Eingriffs- und Spanungsgrößen beim Fräsen



Spannungstiefe

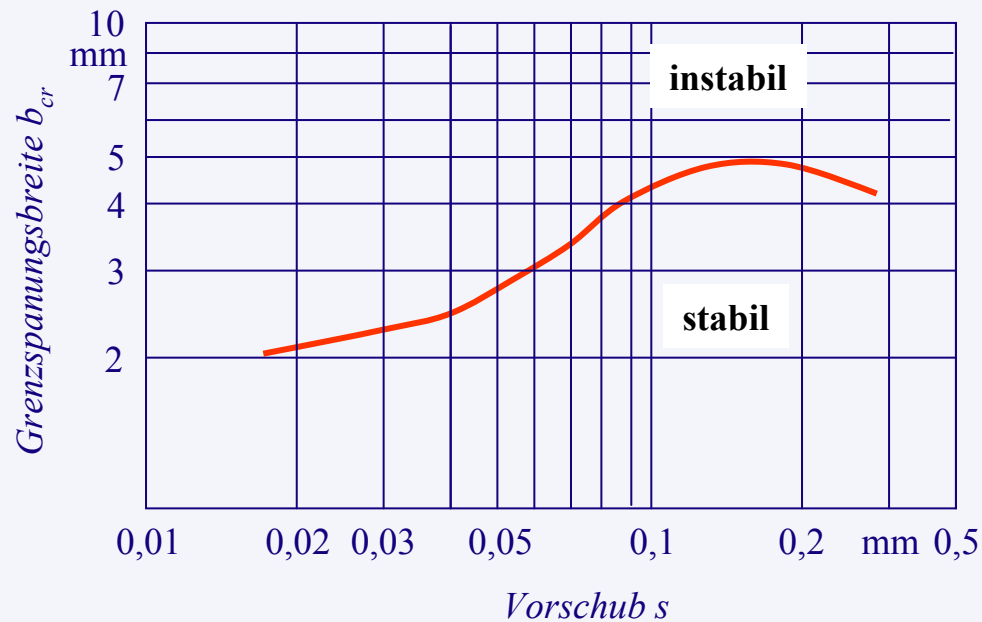
ungleichgeteilt



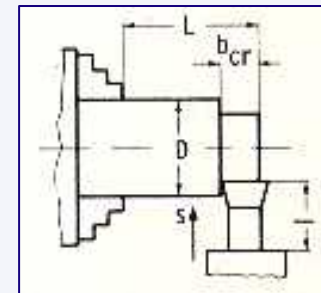
Die Stabilitätsgrenze für einen ungleichgeteilten Fräser liegt im Drehzahlbereich zwischen  $n = 100 \text{ min}^{-1}$  bis  $n = 225 \text{ min}^{-1}$  wesentlich höher als für eine gleichgeteilten Fräser.

# Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

→ *Variation des Vorschubs*

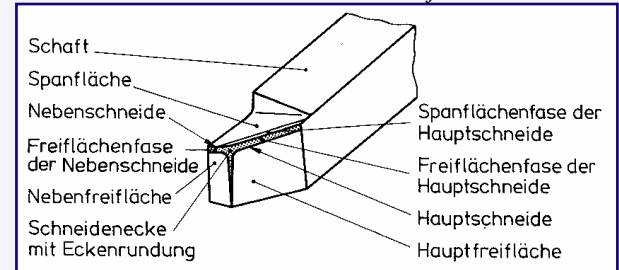


Werkstoff: Ck 45 N  
Schneidstoff: HM P 10  
Drehzahl:  $n = 900$  1/min  
Schnittgeschw.  $v_c = 127$  m/min



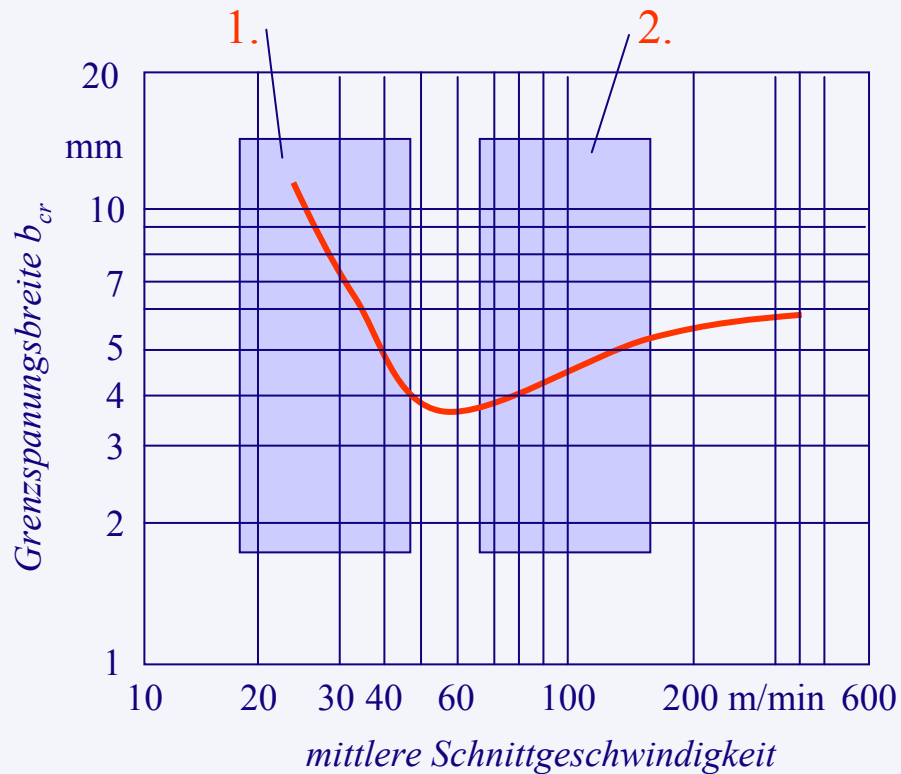
**Effekt:** Ein höherer Vorschub bewirkt einen größeren statischen Spandruck auf die Spanfläche. Dies führt zu einer größeren Reibung bzw. Dämpfung, welche sich positiv auf die Ratterneigung des Systems auswirkt.

*Flächen und Fasen am Drehmeißel*

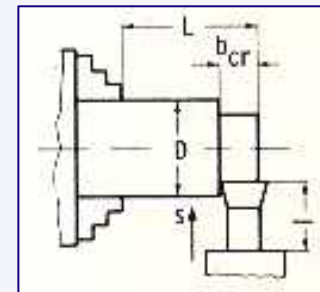


# Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung

➔ *Variation der Schnittgeschwindigkeit*



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

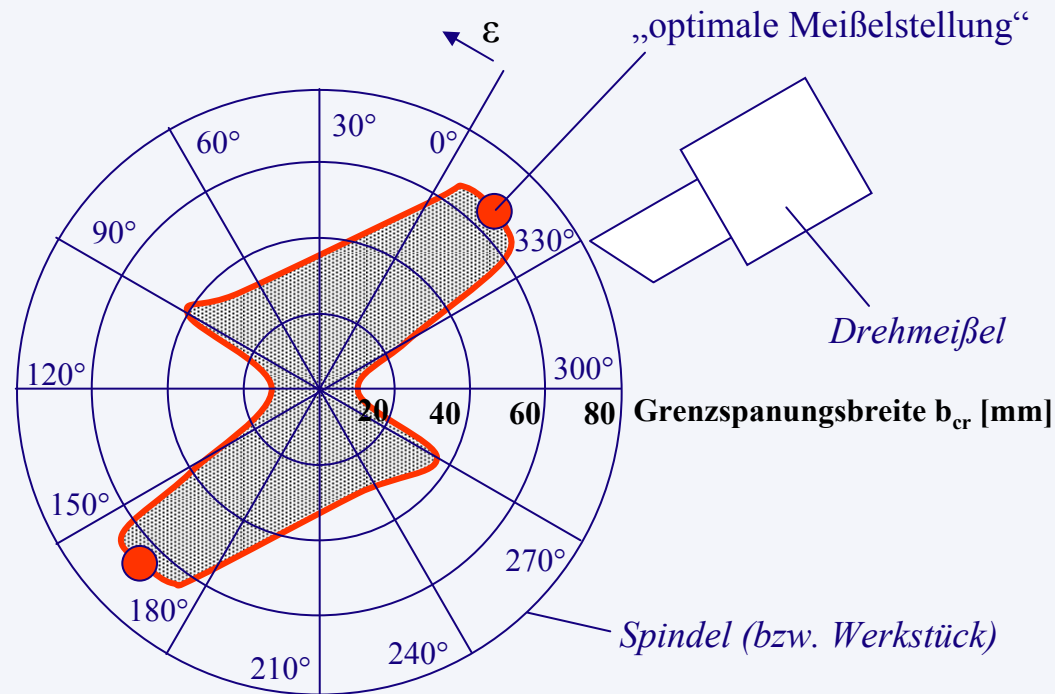


*Effekt 1.: hoher Eindringwiderstand des Werkzeugs verursacht hohe Stabilitätsgrenze*

*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  
Kugellrollspindel

## *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*

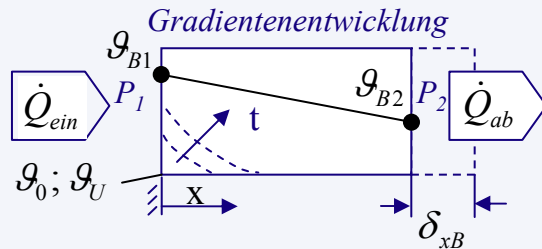
Größe der Maschine  
Bearbeitungsposition



***charakteristische Verlagerung an der Wirkstelle***

Quelle: Weck, WZM)

# Eindimensionales Wärmeleitmodell

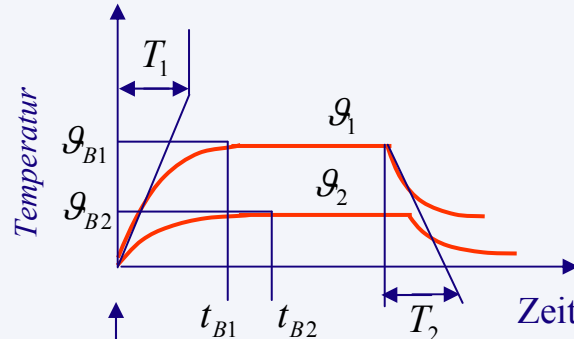


konstante Umgebungstemperatur

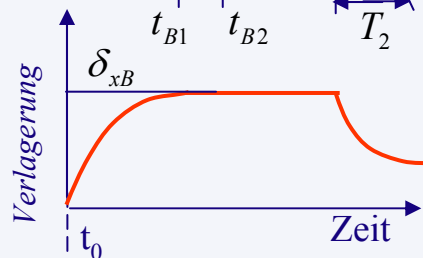
Verlauf der Wärmeströme



Temperaturverhalten der Punkte  $P_1$  und  $P_2$



Resultierende Längenausdehnung des Gesamtmodells



Maschinenverhalten:

Aufwärmphase

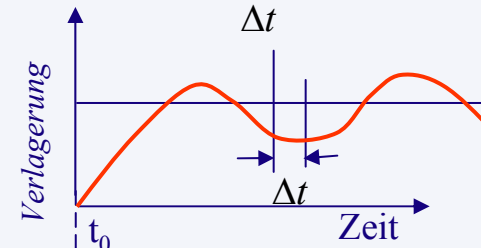
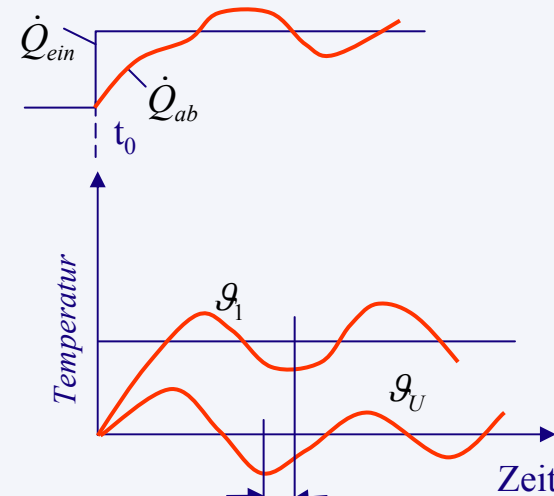
Beharrungszustand

Abkühlphase

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



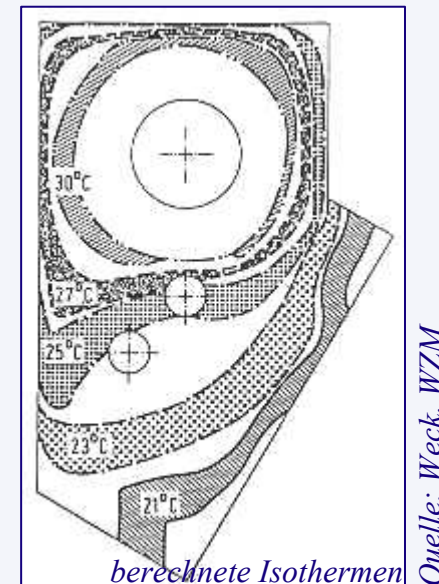
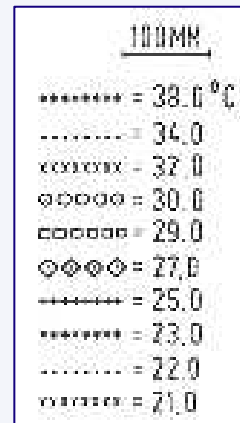
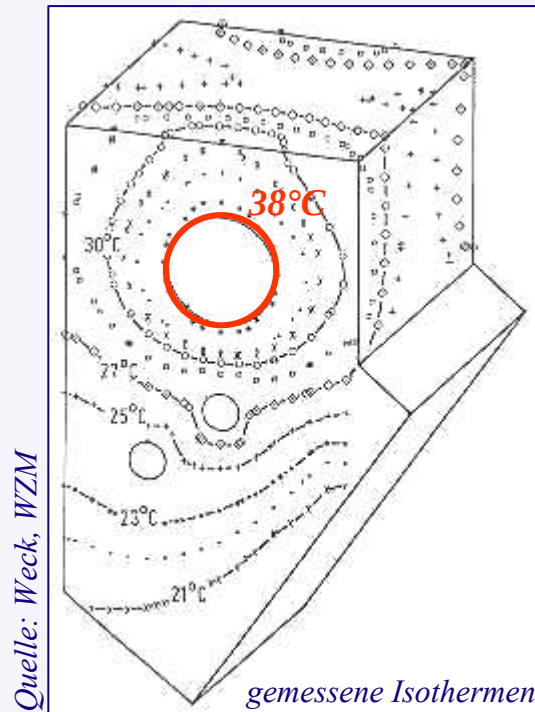
schwankende Umgebungstemperatur



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.

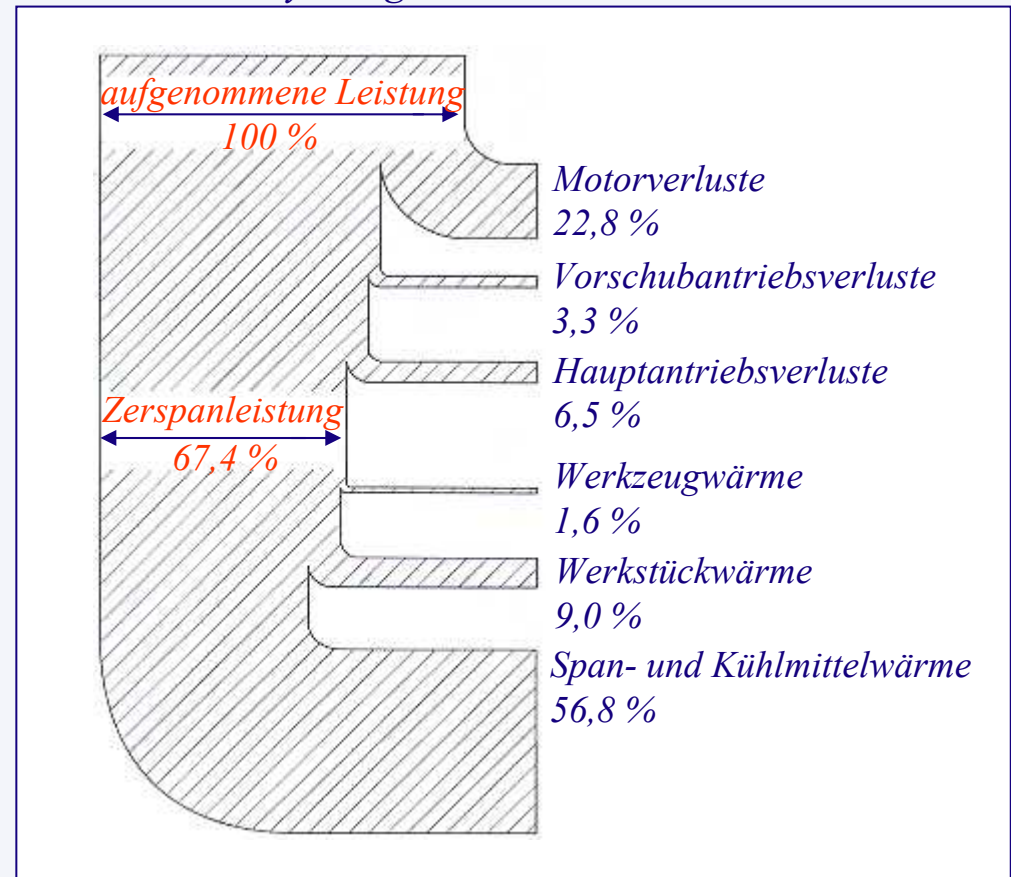
Von ca. 67 % der zur Verfügung stehenden Zerspanleistung werden ca. 57 % in Span- und Kühlmittelwärme umgesetzt.

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

### Maßnahmen:

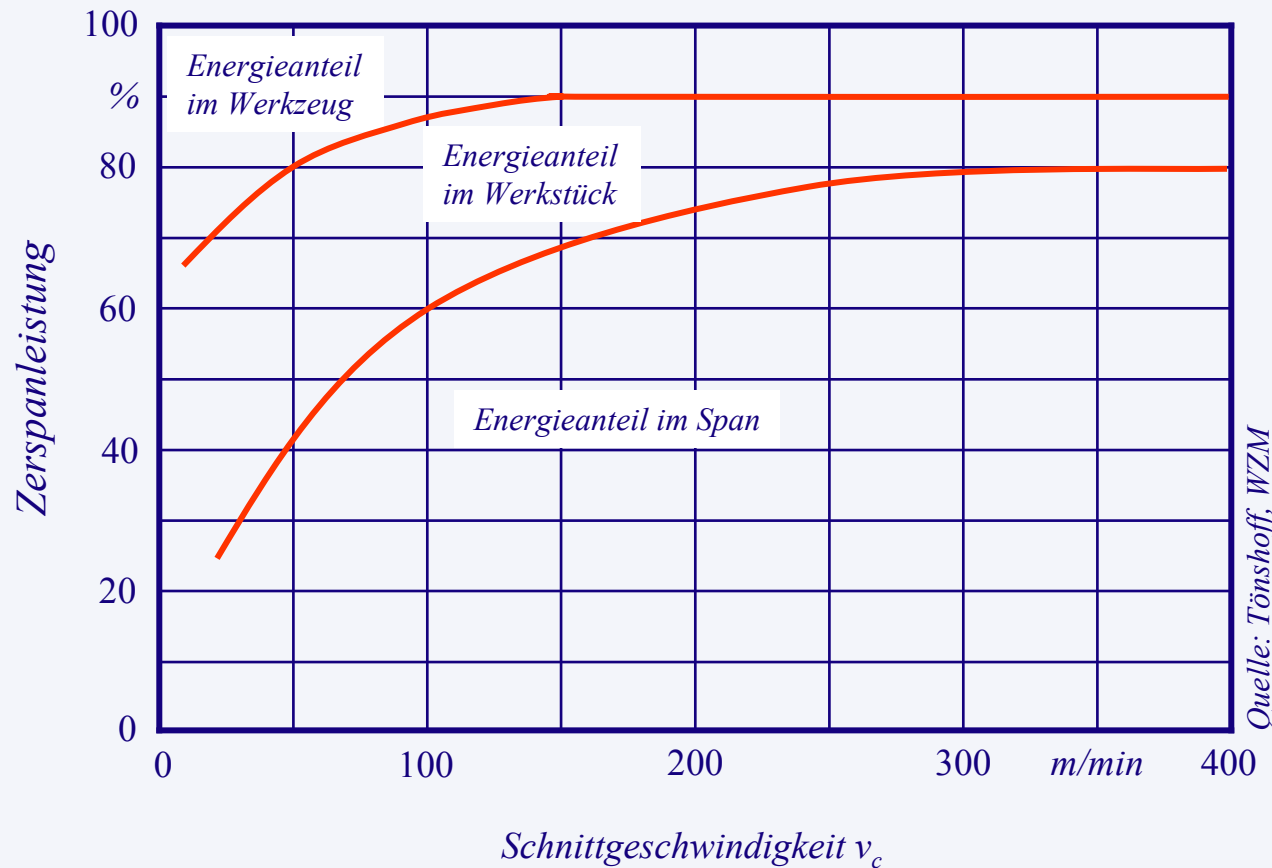
- Gestellteile gegen Späne abdecken
- Schrägbettmaschine
- Späneförderer

## 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

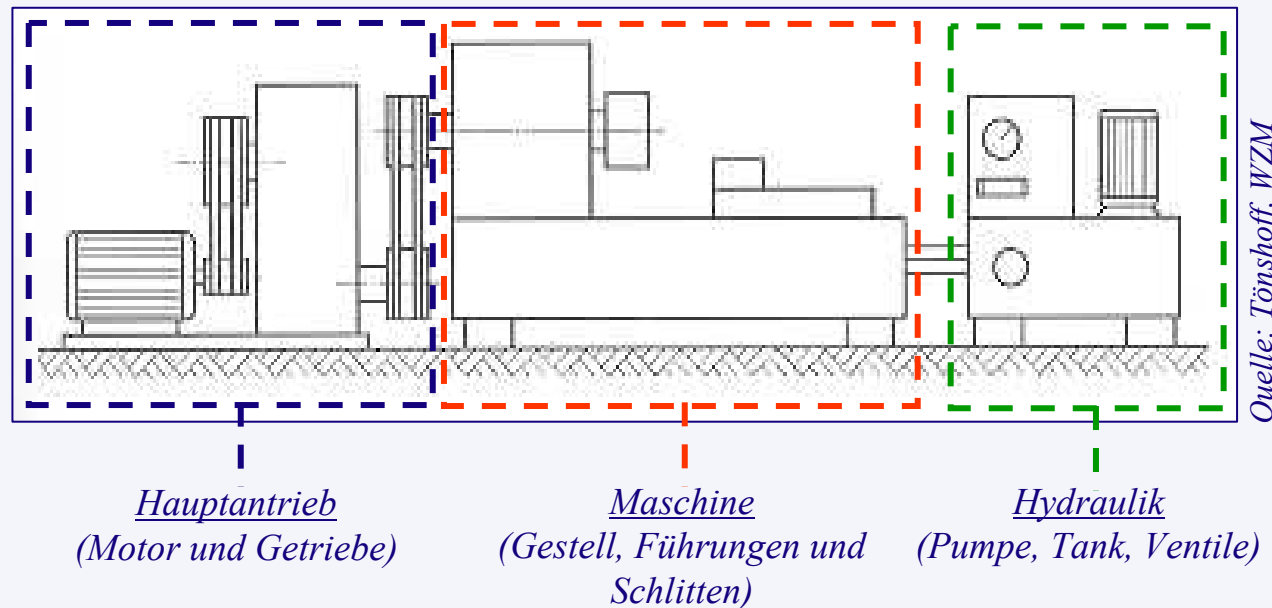
## Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

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

Quelle: Prof. Uhlmann, iwf

## Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

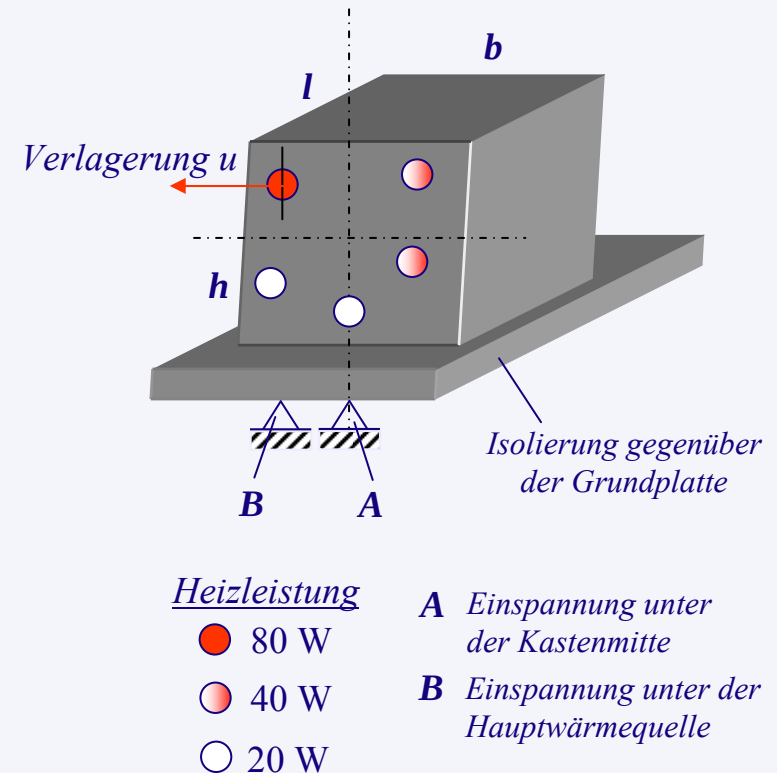
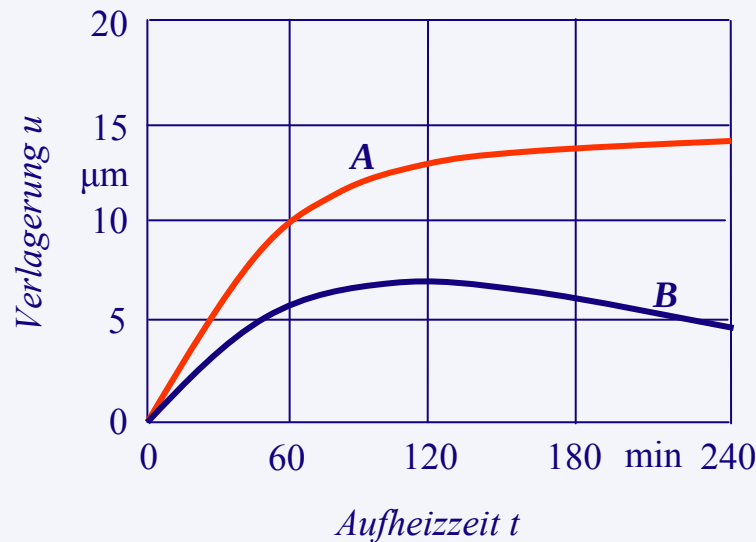
➔ *Auslagern von Wärmequellen*  
(Trennung der Wärmequellen vom Gestell)



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

# Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

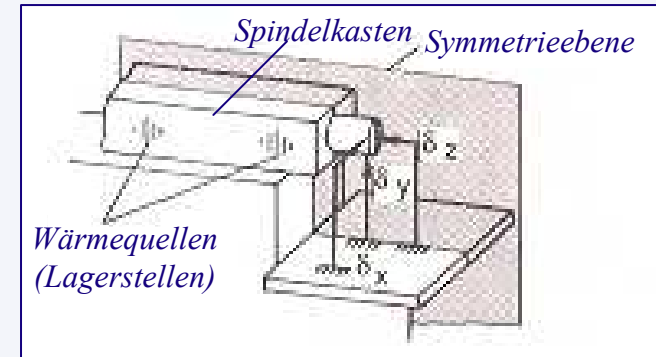
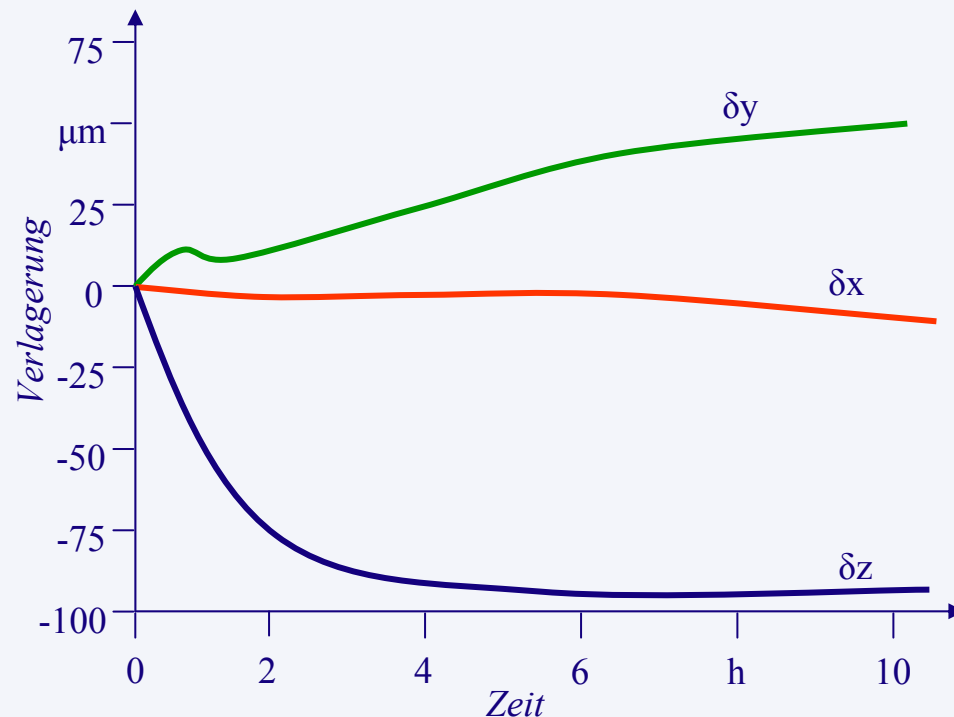
→ *thermosymmetrische Konstruktion*  
(Einfluss der Einspannung auf die Verlagerung)



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

# Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

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



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

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

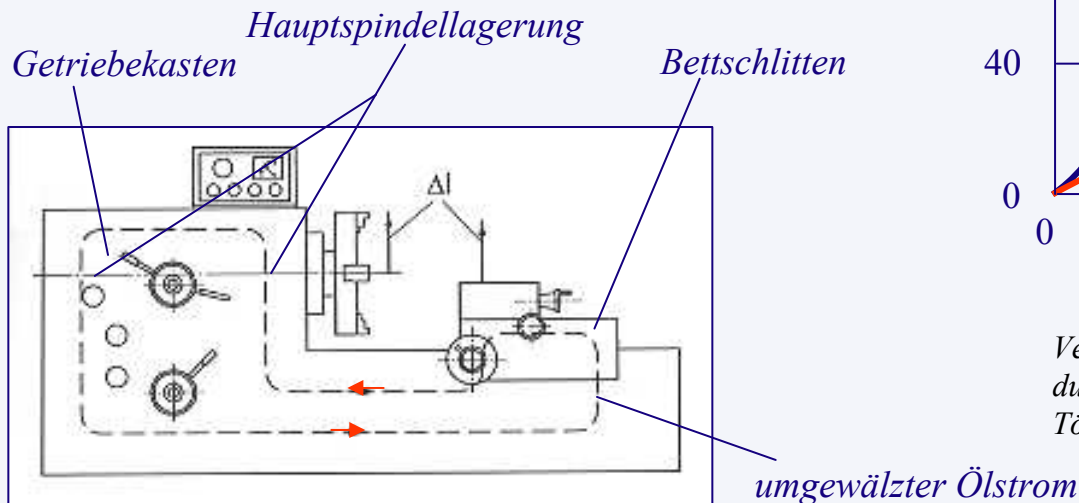
Durch gezielte Ausnutzung der Symmetrieebene konnte die x-Verformung des Spindelkastens auf nur 10 µm reduziert werden.

# Thermische Belastungen: Maßnahmen gegen thermische Verformung

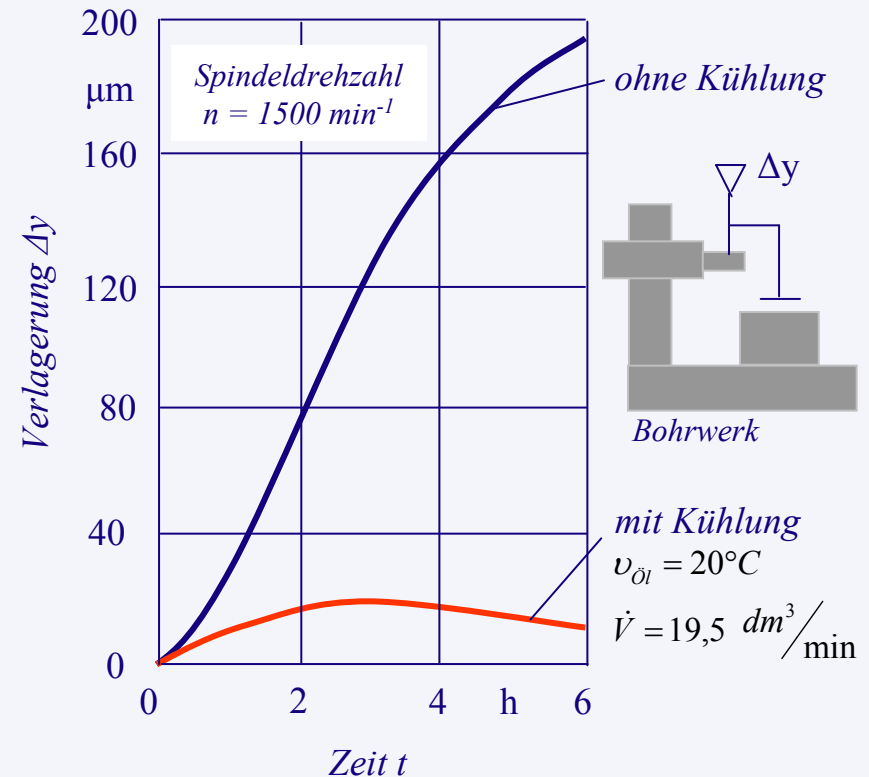
**Kühlung/Erwärmung**  
(Temperaturausgleich durch Ölumlauf)

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

Alle Bauteile wachsen ungefähr gleichmäßig!



Temperaturausgleich an einer Bett Drehmaschine durch Ölumlauf (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.

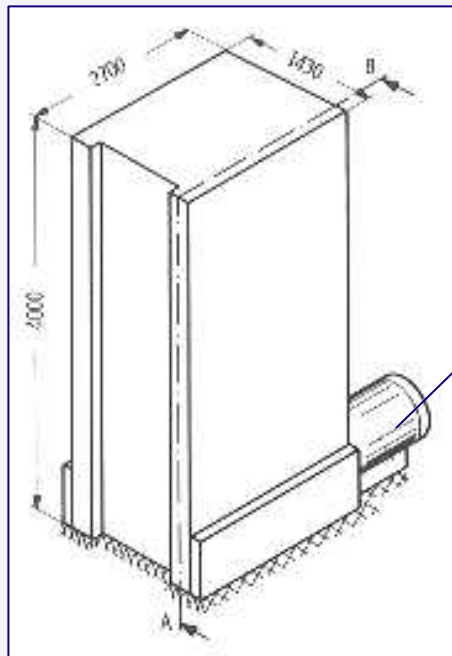
$$\text{innere thermische Verformungskraft} \quad F_T = \alpha \cdot A \cdot E \cdot \Delta \vartheta$$

Ausdehnungskoeffizient  
Materialquerschnitt  
Elastizitätsmodul  
Temperaturänderung

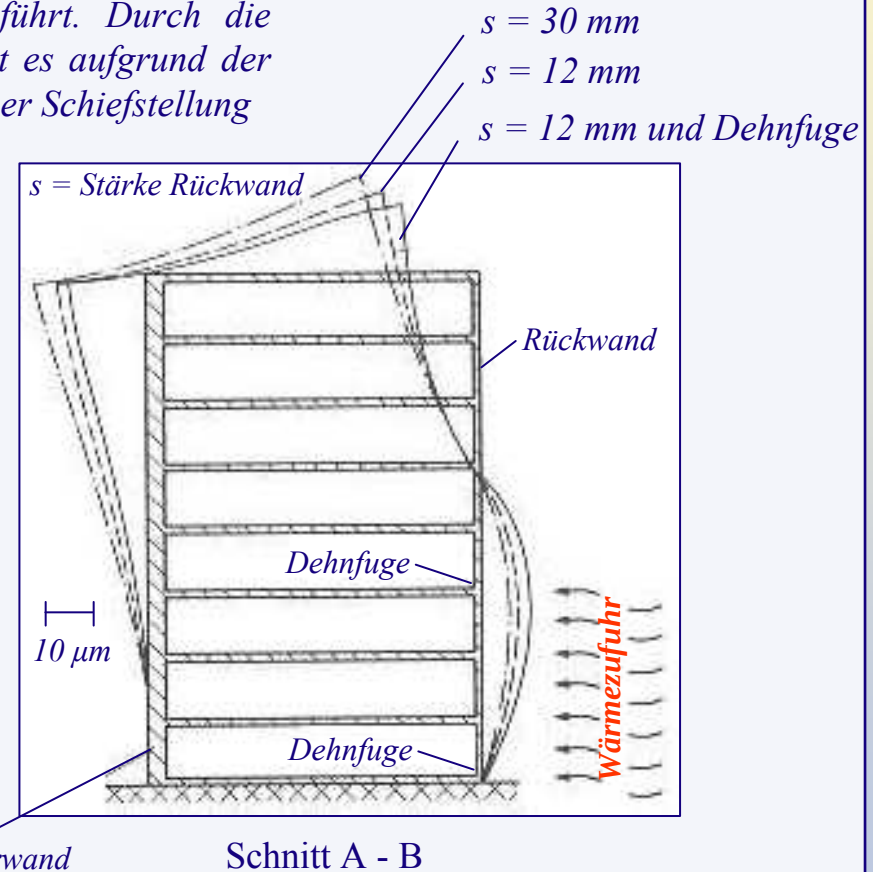
Bei einer Strukturschwächung ist darauf zu achten, dass die statischen und dynamischen Eigenschaften des Bauteils (Maschinengestell) keine unzulässigen Werte annehmen!

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

### *Beispiel: Polymerbeton*

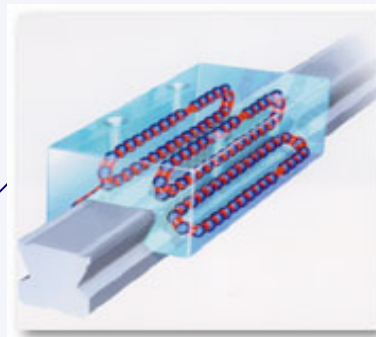
*Die geringe Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit der hohen spez. Wärmekapazität führt zu einer relativ hohen thermischen Trägheit. Dies bedeutet, dass Lastschwankungen zu kleinen Temperaturänderungen und damit auch zu kleinen Temperaturverformungen führen.*

# *Führungen*



## Aufgaben und Anforderungen

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



Linearführung mit Kugellagerkette (Quelle: THK)

### geringe Betriebskosten

Betriebssicherheit  
geringe Schmutzempfindlichkeit  
geringer Wartungsbedarf  
Überlastbarkeit

### niedrige Herstellkosten

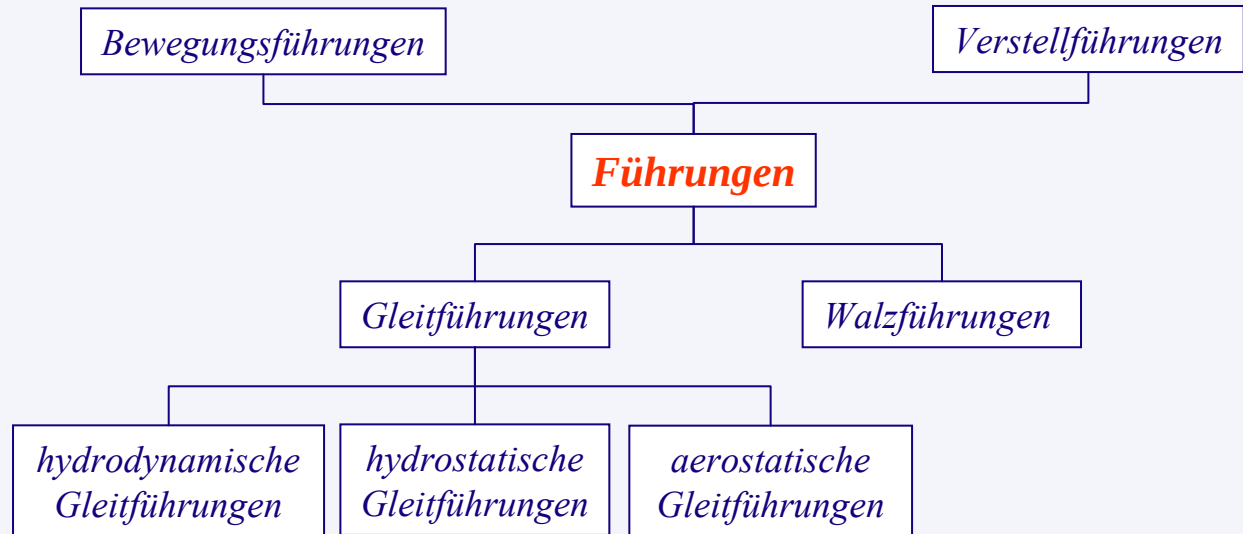
kostengünstige und einfache Fertigung  
gute Montierbarkeit  
preisgünstige Werkstoffe

### 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:

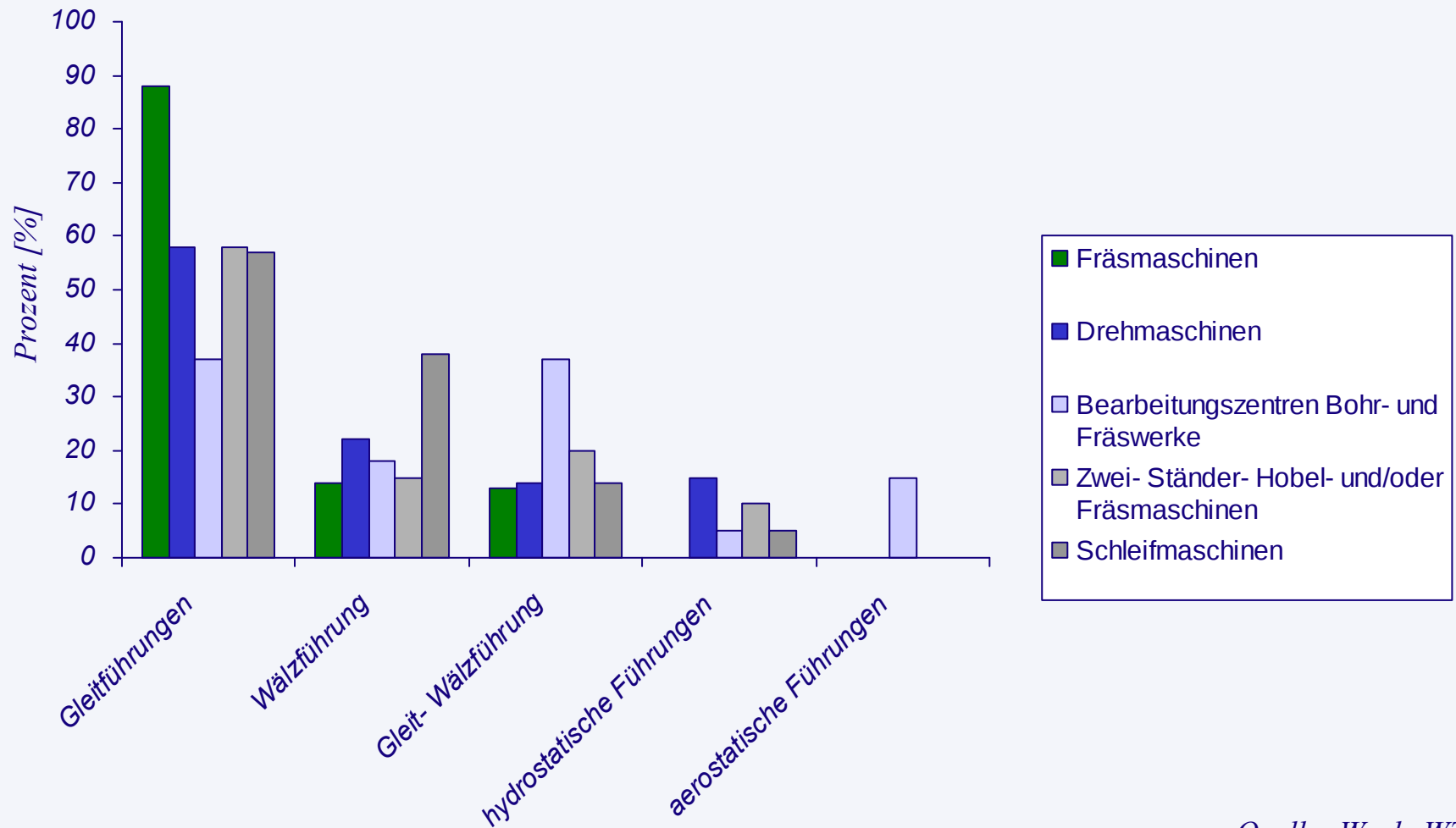
Dreieck: V-, Dach-, Schwalbenschwanzführung

Kreis: Säulenführung



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

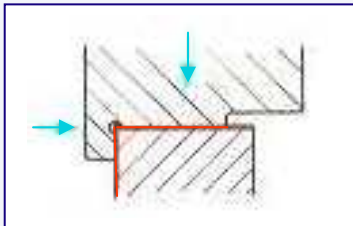
## Häufigkeit der Führungsprinzipien



Quelle: Weck, WZM

# Führungsformen

## Flachführung



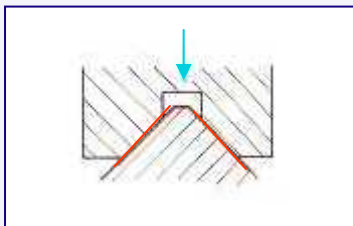
### Vorteil

- 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

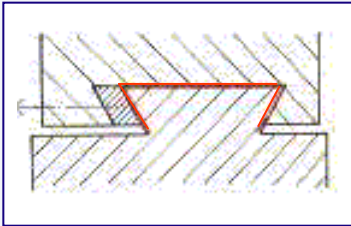
### Nachteil

- Ablaufen des Schmieröls
- erhöhte Flächenpressung

# Führungsformen

## Schwalbenschwanzführung

(geschlossene Bauform)



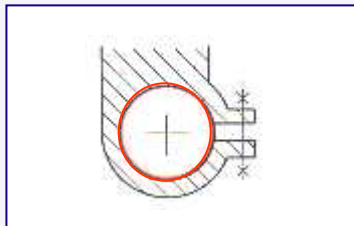
### Vorteil

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

### Nachteil

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

## Rundführung



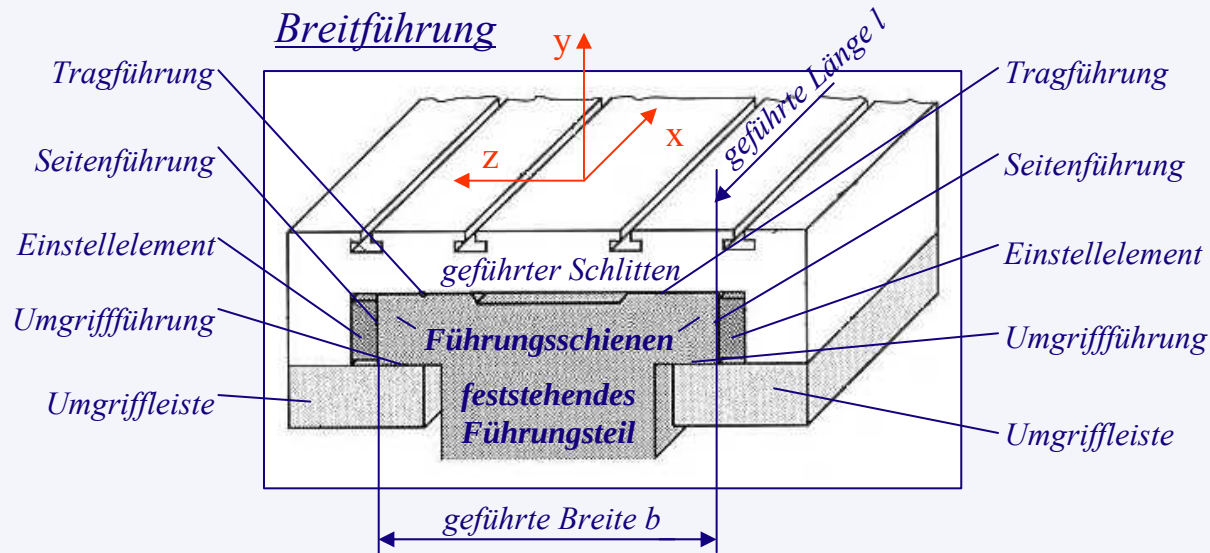
### Vorteil

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

### Nachteil

- *kein selbsttätiges Nachstellen*
- *begrenzte seitliche Belastung*

# Führungen: grundsätzlicher Aufbau einer Geradführung



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

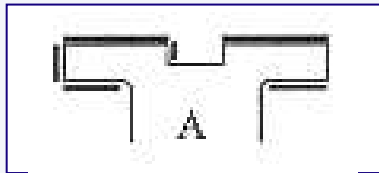
**Breitföhrung:** Verwendung der äußeren Föhrungsflächen für die Seitenföhrung

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

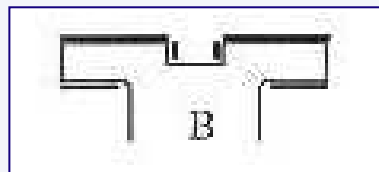
$$\frac{\text{geföhrte Länge}}{\text{geföhrte Breite}} = \frac{l}{b} > 1,3 \dots 1,5$$

sein.

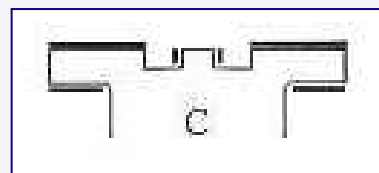
Maßnahmen zur Erreichung der kleinsten maximalen Föhrungslänge  $l$  oder eines großen Föhrungsverhältnisses  $l/b$ :



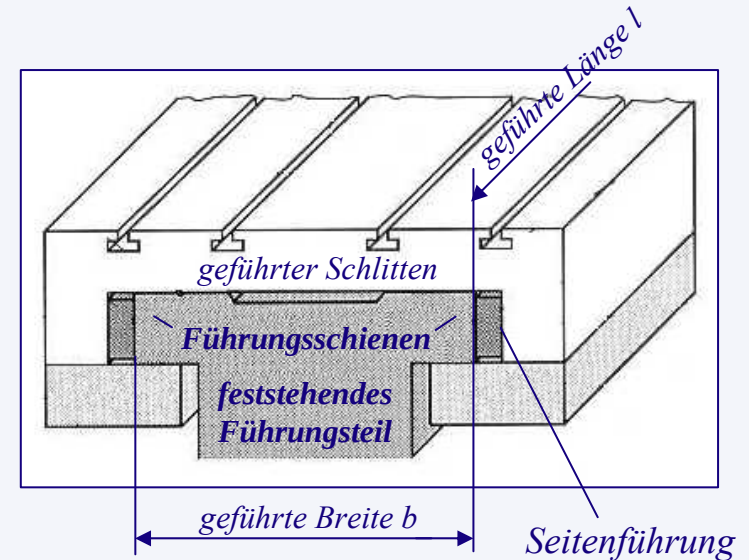
beide Seitenföhrungsflächen an eine Föhrungsschiene legen



die Seitenföhrungsflächen an die Innenseite der Föhrungsschienen legen



separate Flächen für die Seitenföhrung schaffen



**positive Auswirkungen auf:**

- Genauigkeit der Föhrung
- Verschiebekräfte

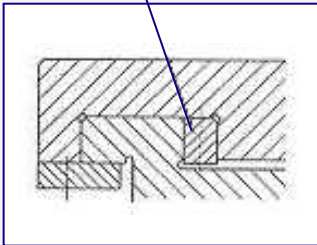
## Einstellen von Führungen

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

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

*einstellbar.*

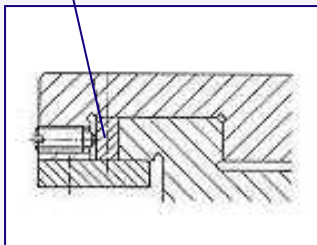
### Paßleiste



*Paßleisten werden nach dem Ausmessen des Spiels gefertigt und eingesetzt*

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

### Stelleiste



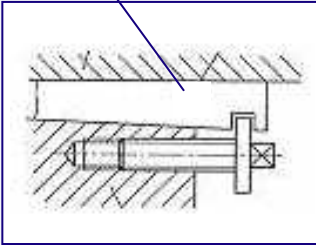
*Einstellung erfolgt über Stellelemente (z.B. Schrauben)*

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

*Einsatzbereich: Stellführungen*

## Einstellen von Führungen

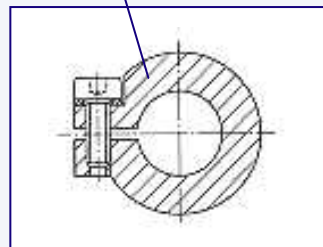
Keilleiste



*Keilleisten weisen eine Verjüngung in Führungsrichtung auf*

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

geschlitzte Buchse

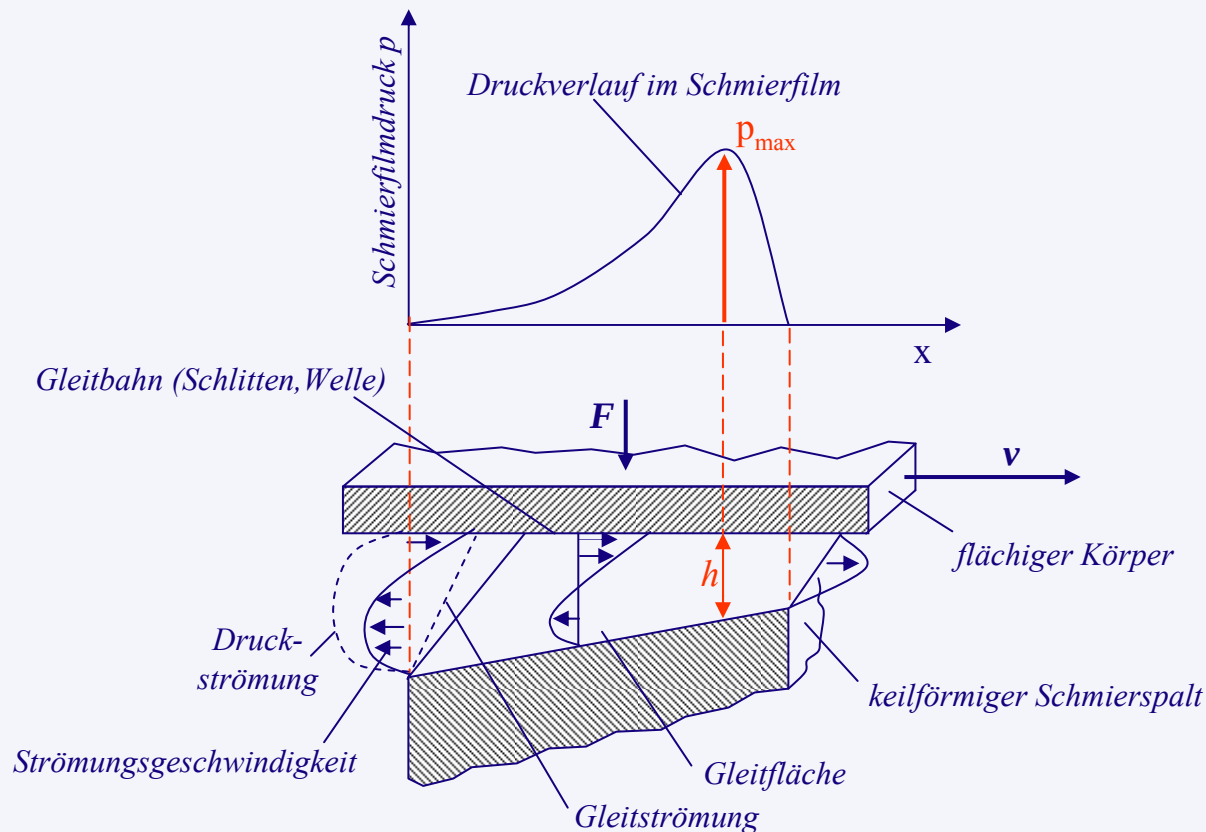


*Das Nachstellen von Rundführungen ist schwierig, da der Vorgang eine Krümmungsänderung des Radius mit sich bringt.*

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

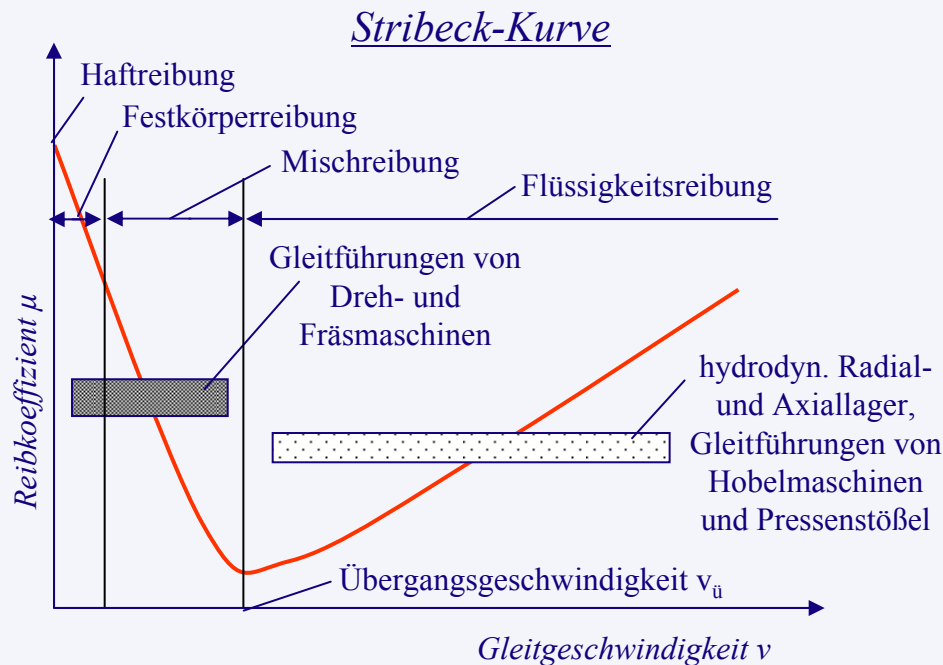
# Gleitführung mit hydrodynamischer Schmierung

**Funktionsprinzip:** Wird ein flächiger Körper über einen keilförmigen Schmierpalt 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.



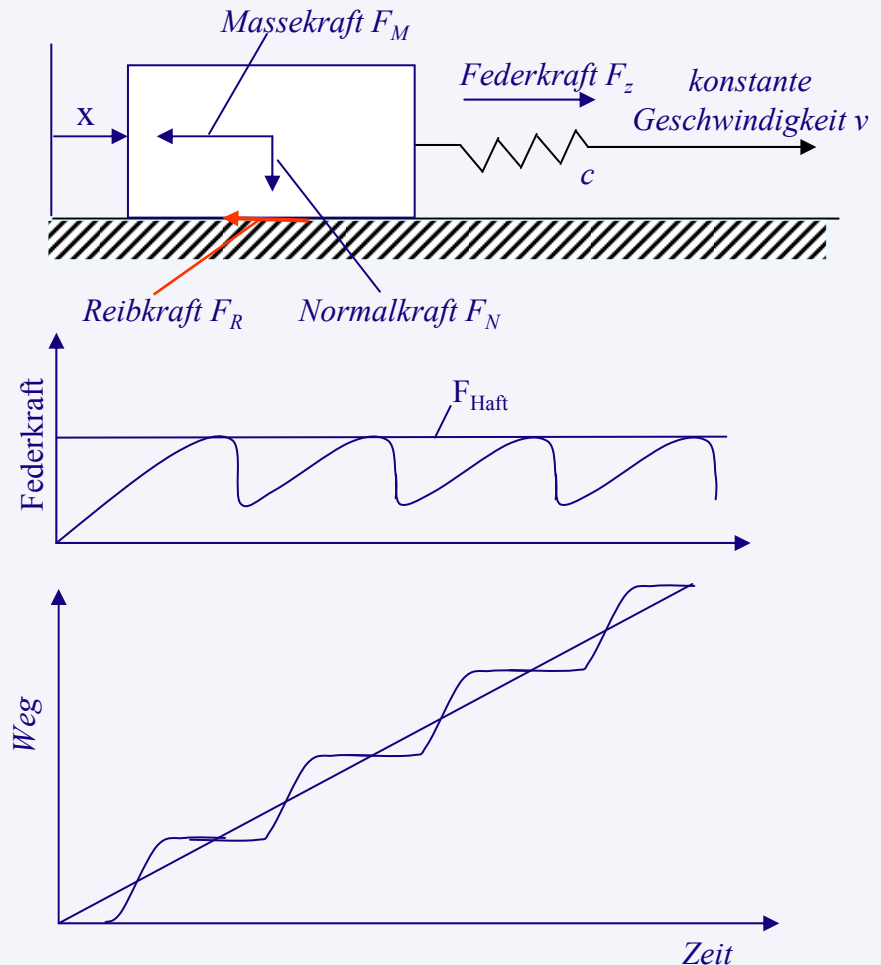
Der dazu notwendige Antrieb besitzt eine endliche Steifigkeit (Zugfeder) und wird bei der Überwindung der Haftreibung durch die dabei entstehende Kraft gespannt.



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

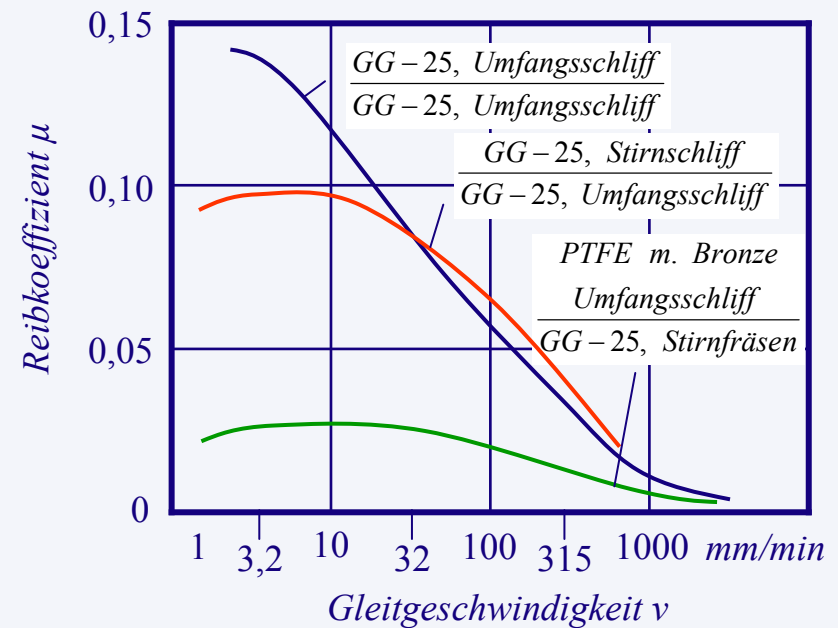
## **Steigung im vorderen Ast der Stribeck-Kurve vermindern oder vermeiden:**

- 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/cm<sup>2</sup>  
Gleitfläche: 50 x 50 mm<sup>2</sup>  
Gleitöl:  $\eta_{20} = 170$  mPas  
Intervallschmierung: 15s

# Schmiernuten

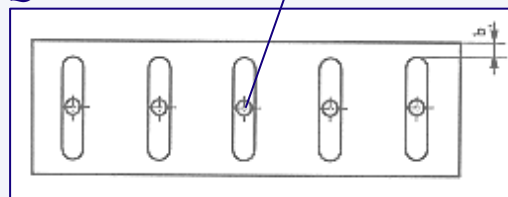
Schmiernuten haben die Aufgabe, die Zuführung und Verteilung des Schmiermittels auf der gesamten Gleitfläche sicherzustellen. Sie werden grundsätzlich in die Schlittenführung eingearbeitet.

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

**Beispiel:** bei Verwendung von Längsnuten kann kein Schmierdruck aufgebaut werden

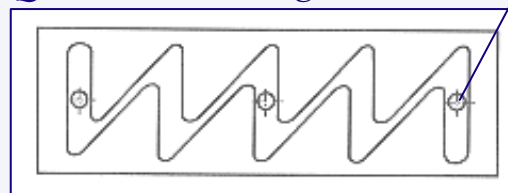
## Schmiernutenformen (Beispiele)

Quernuten



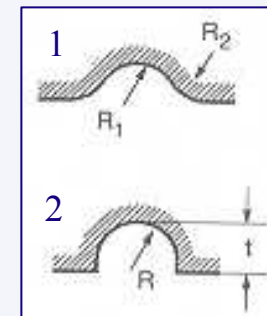
- hoher Schmierdruck durch Quernuten (hohe Tragkraft)
- günstiges Reibungsverhalten

Quernuten mit Diagonalnuten



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

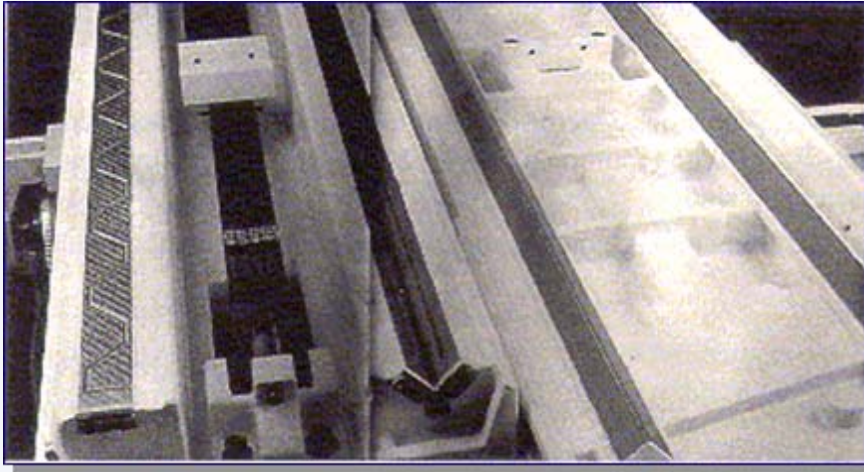
## Schmiernutenquerschnitt



günstig

ungünstig  
(Schmiermittel wird abgestriffen)

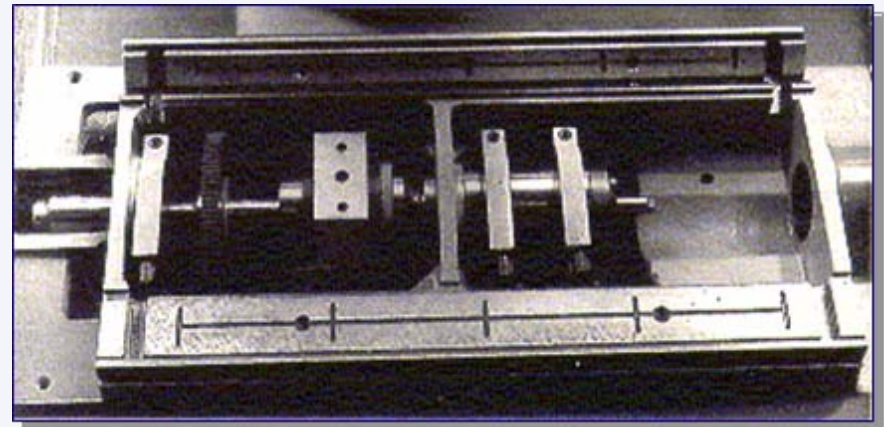
## Schmiernuten: hydrodynamische V-Flach-Führungen ohne Umgriff



*Quelle: Hirsch, WZM)*

*Führungsbahnen beschichtet, Gegenbahnen geschliffen und von Hand gemustert*

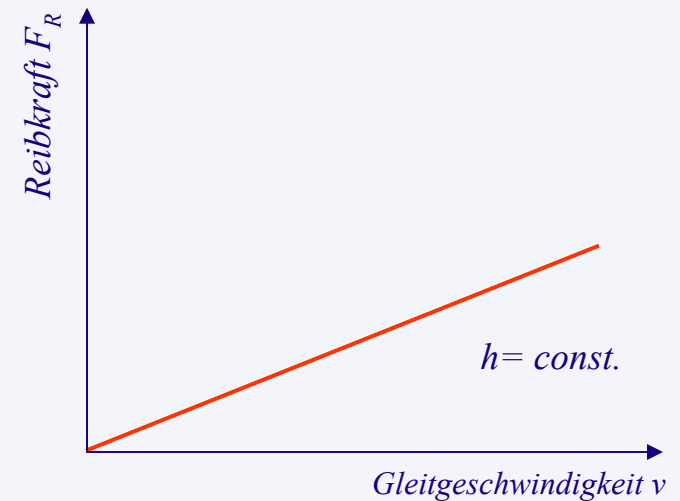
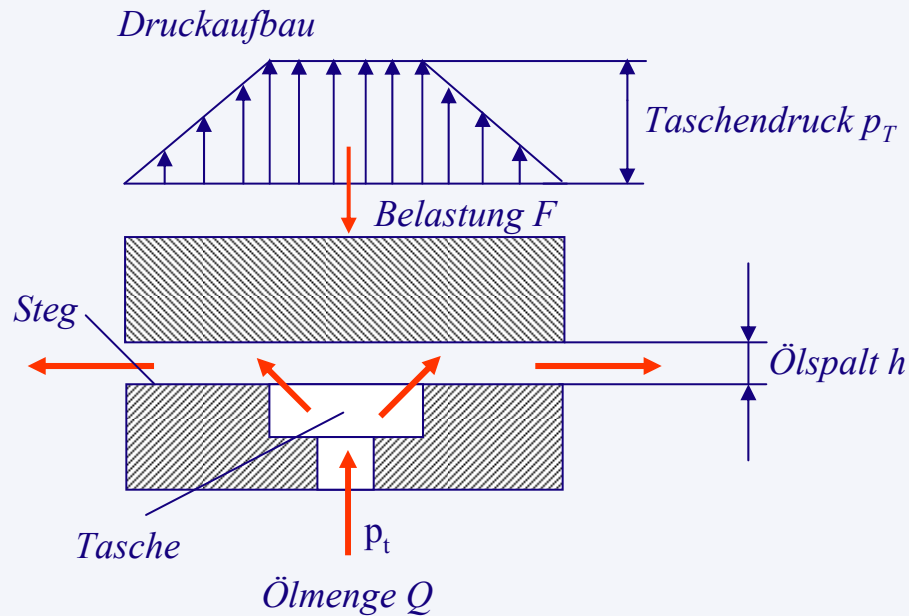
*Führungsbahnen unbeschichtet, geschliffen und eingeschliffen*



*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

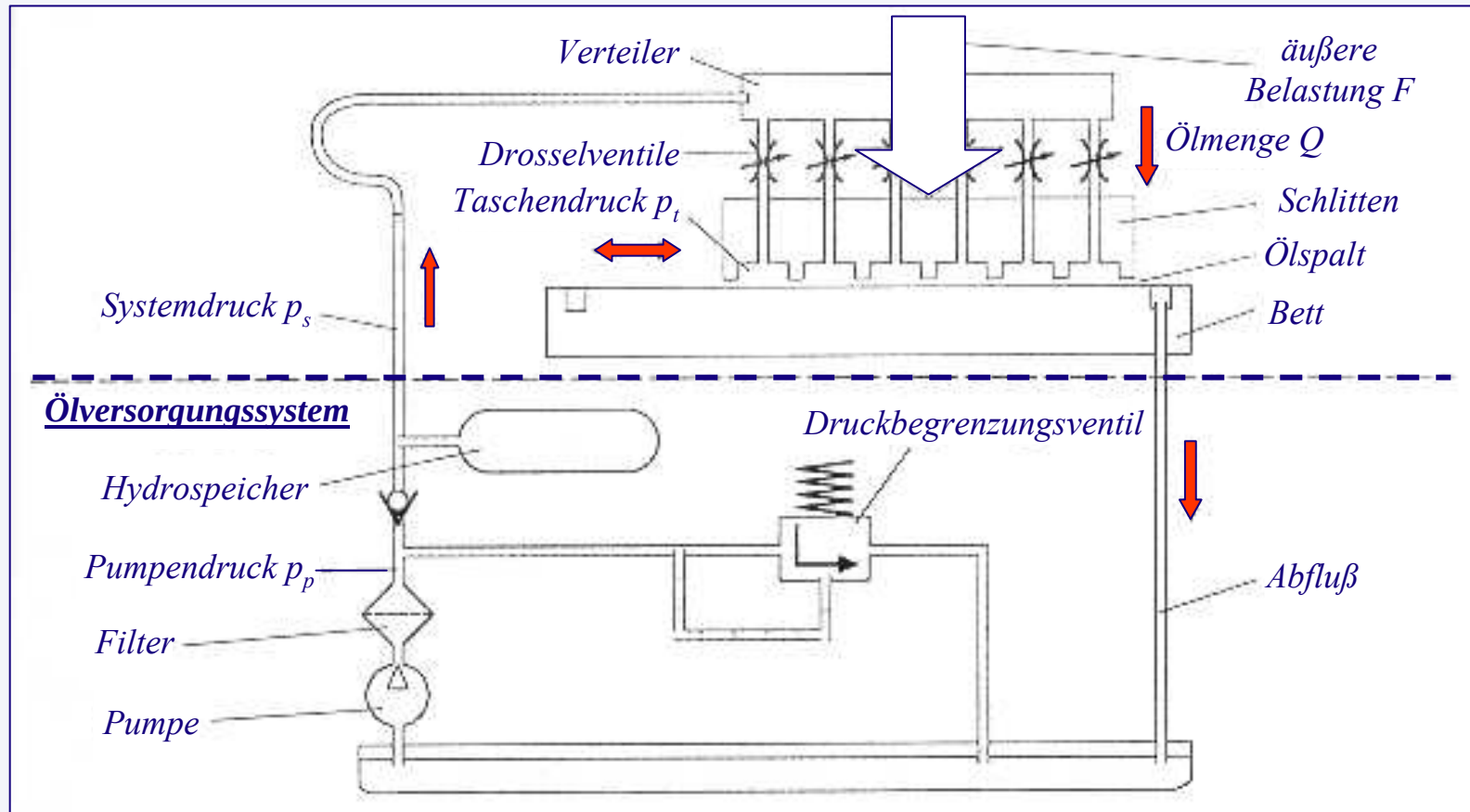
- Vorteile:**
- *verschleißfrei*
  - *hohe Bewegungsgleichförmigkeit (kein Stick-Slip-Effekt)*
  - *gutes statisches Verhalten*
  - *hohe Tragfähigkeit*
  - *gute Dämpfung in Tragrichtung*

- 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.*

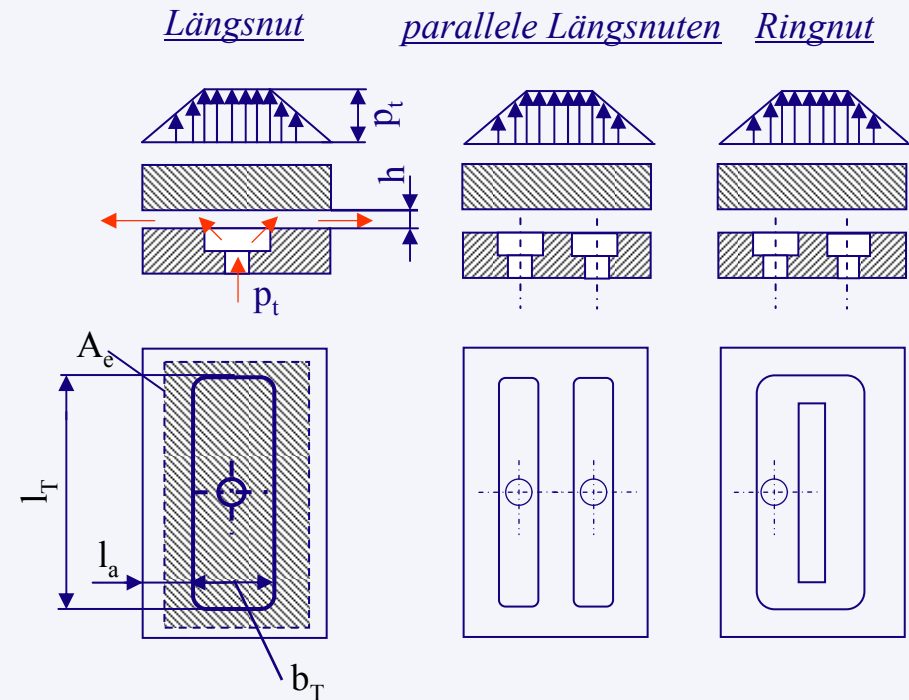
# Wesentliche Komponenten einer hydrostatischen Führung



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

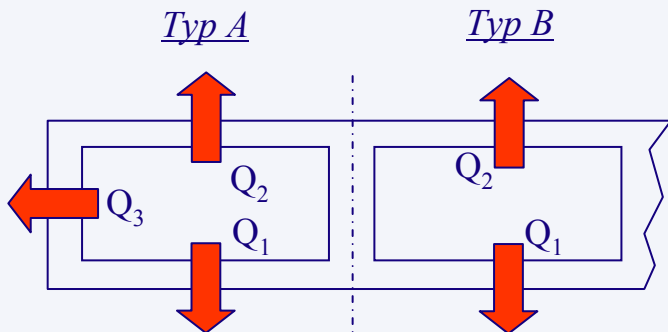
$p_t$  Taschendruck



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

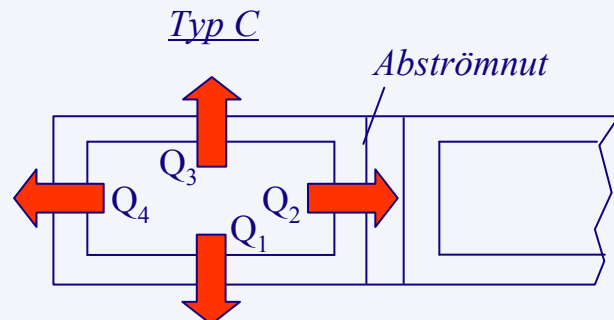
*Abströmen des Öls über die beiden Längsstege und den Quersteg am Rand der Führungsfläche*

## Typ B: Mitteltasche

*Abströmen des Öls über die beiden Längsstege*

## Typ C: Randtasche mit Abströmnut

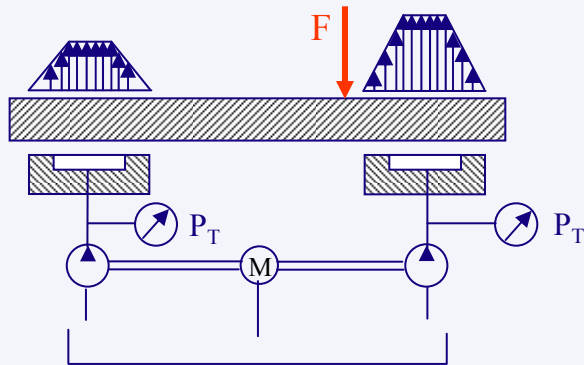
*Abströmen des Öls über zwei Längs- und zwei Querstege*



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

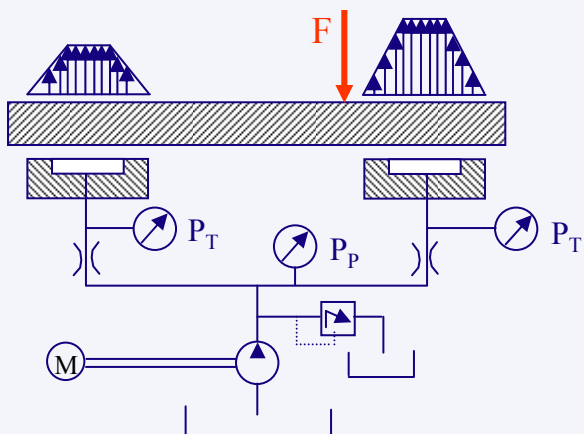
# Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Ölversorgungssysteme

## 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:

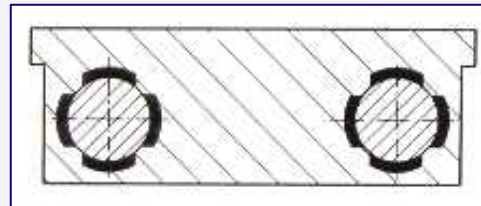
Konstantdrossel (Blenden oder Kapillaren)

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

# Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung: Schlittenführungen

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

## Rundführung



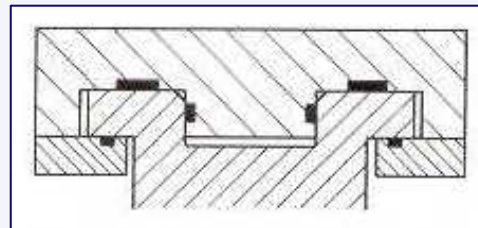
### *Vorteil:*

- einfache Fertigung

### *Nachteil:*

- starke Durchbiegung bei schlanken Säulen
- statisch überbestimmt

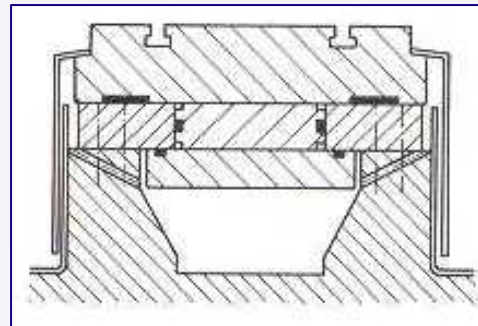
## Flachführung mit außenliegendem Umgriff



### *Vorteil:*

- einfache Montage

## Flachführung mit innenliegendem Umgriff



### *Vorteil:*

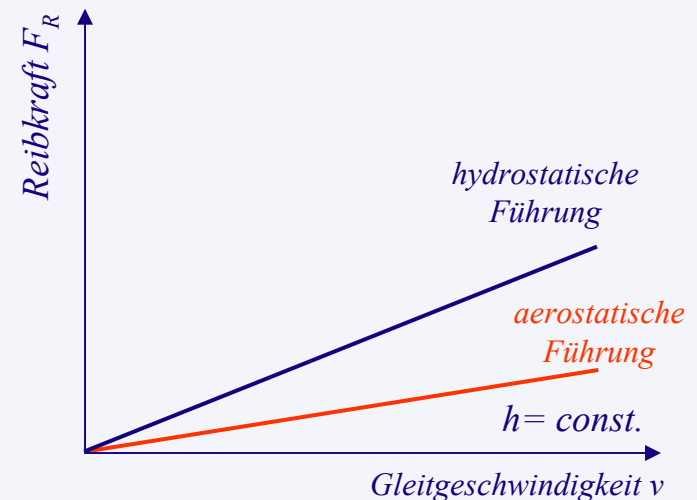
- steifer als bei außenliegendem Umgriff, da der innenliegende Umgriff sich weniger aufbiegt!

Quelle: Weck, WZM

# Gleitführung mit aerostatischer Schmierung

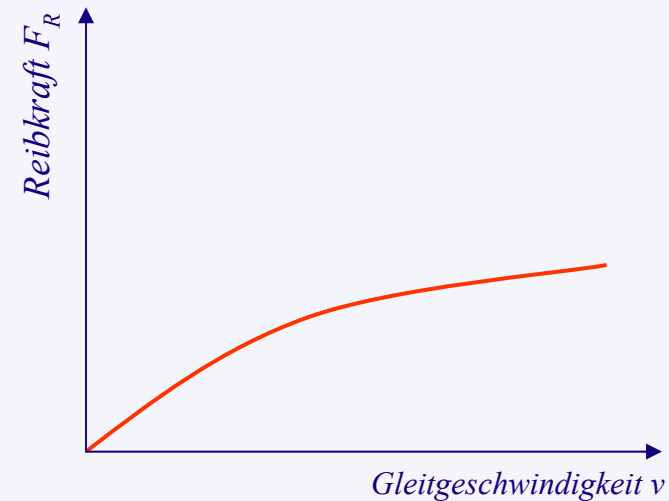
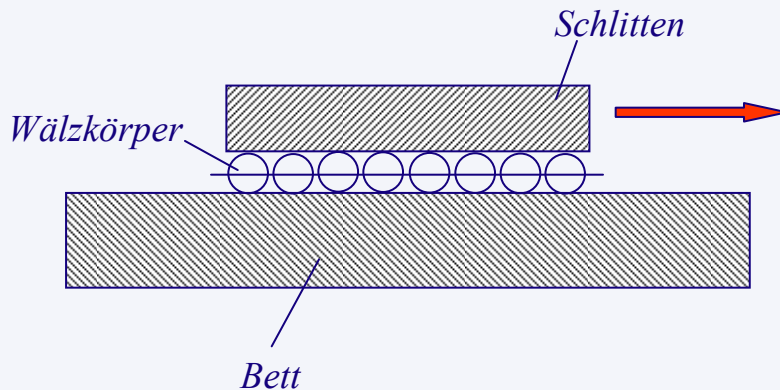
**Funktionsprinzip:** Aerostatische Führungen (Luftlager) arbeiten ähnlich wie hydrostatische. Als Trennmittel wird jedoch Luft verwendet. Wegen der geringeren Zähigkeit von Luft gegenüber Öl und wegen der Kompressibilität ergeben sich einige typische Merkmale gegenüber der hydrostatischen Führung:

- 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



# Wälzföhrungen

**Funktionsprinzip:** Bei Wälzföhrungen werden die Föhrungsflöchen durch Wälzkörrer voneinander getrennt. Als Wälzkörrer werden Kugeln (punktförmige Beröhrung) oder Zylinder (linienförmige Beröhrung) eingesetzt. Bei der Bewegung der Föhrungspartner entsteht hauptsöchlich Rollreibung.



## Wälzführungen

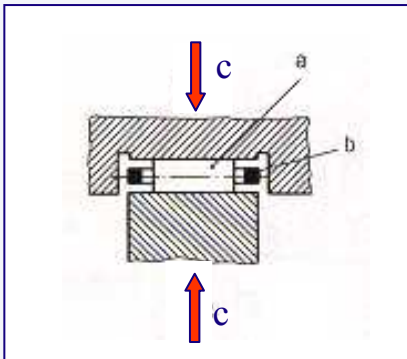
- Vorteile:**
- *kein Stick-Slip-Effekt (wegen Rollreibung)*
  - *geringer Verschleiß*
  - *problemloser Einbau*
  - *geringer Wartungsaufwand*
  - *für höchste Verfahrgeschwindigkeiten geeignet*
  - *Standardisierung der Wälzelemente*

- Nachteile:**
- *geringe Dämpfung*
  - *Neigung zu unruhigem Lauf, besonders bei Systemen, bei denen die Wälzkörper rückgeführt werden*
  - *wegen der hohen Anzahl an Tragelementen ist die Führung in der Regel statisch überbestimmt*

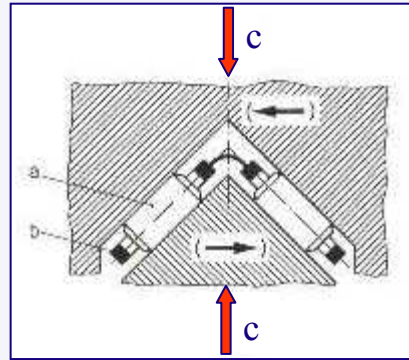
# Wälzführungen: Unterscheidungsmerkmale

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

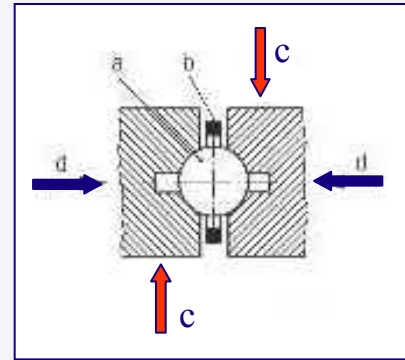
Flachführung



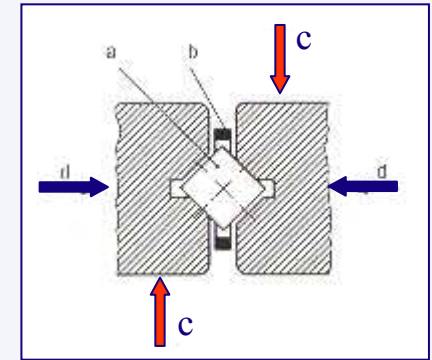
prismatische Führung



Kugelführung



Kreuzrollenkette



*Unterscheidungsmerkmale zwischen den einzelnen Wälzführungselementen:*

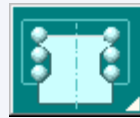
- Wälzkörpertyp (Kugel, Zylinderrolle)
- Berührungsart zwischen den Wälzkörpern und Laufbahnen (punktformige bzw. linienförmige Berührung)
- Anzahl der Wälzkörperreihen
- Wälzkörperleisten oder Wälzkörperrückführung in den Laufeinheiten

# Wälzführungen: Beispiele zu den Unterscheidungsmerkmalen

## ● Anzahl der Wälzkörperreihen



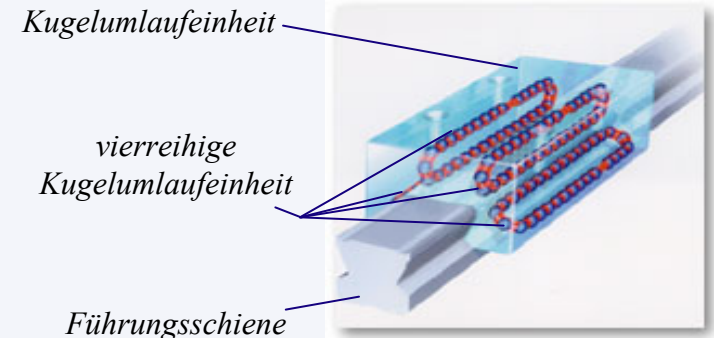
zweireihige  
Kugelumlaufeinheit



sechsstufige  
Kugelumlaufeinheit



vierreihige  
Kugelumlaufeinheit



Linearführung mit  
Kugelschleife (Quelle: THK)

## ● Wälzkörperleisten oder Wälzkörperrückführung in den Laufeinheiten

mit  
Wälzkörperleiste



Nadelrollenführung

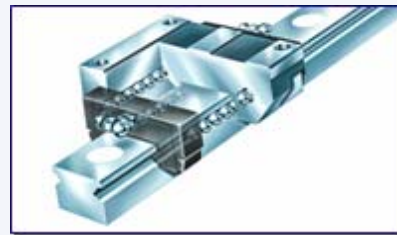


Kreuzrollenführung

mit  
Wälzkörperrückführung



Rollenumlaufeinheit



Kugelumlaufeinheit

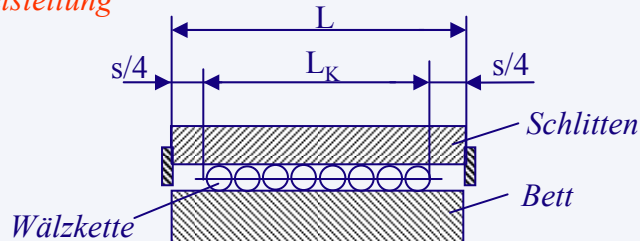


Linearkugellager

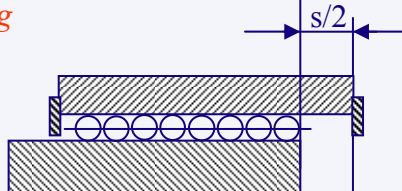
# Ausführungsformen: Linear-Wälzfürungen mit Wälzkörperkette

## Wälzkette kürzer als Führungsschiene

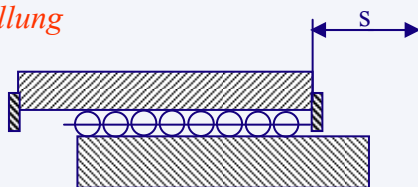
### Mittelstellung



### rechte Endstellung



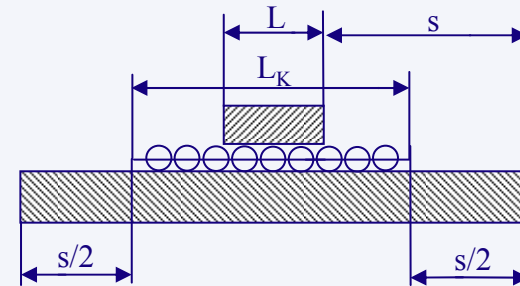
### linke Endstellung



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 Wälzfürung zu viel Bauraum in Anspruch nehmen würde!

## Wälzführungen: Linear-Wälzführungen mit Wälzkörperrückführung

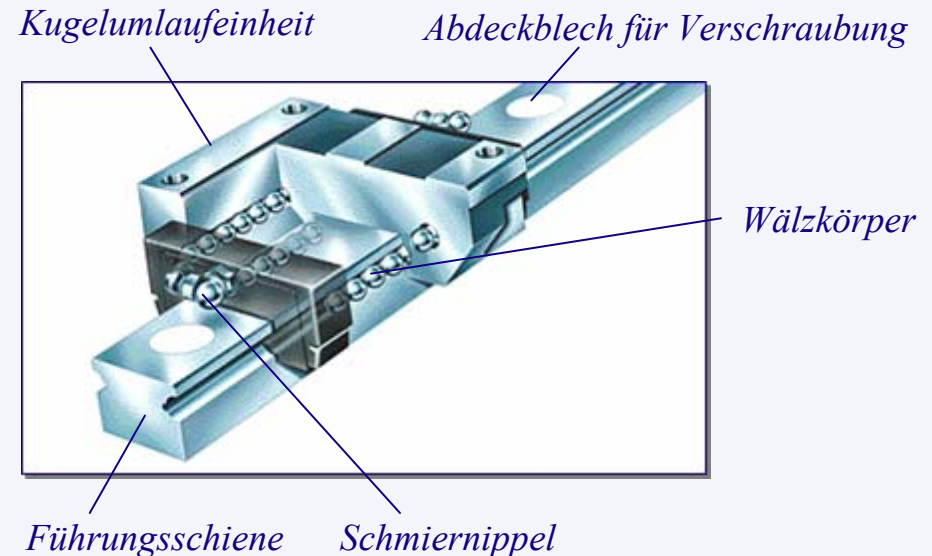
Zur Realisierung großer Verfahrswege werden Wälzführungen mit rückgeführten Wälzkörpern verwendet. Die Wälzkörper laufen in einer Endlosschleife, so dass der Verschiebeweg nur von der Länge der Führungsschiene begrenzt wird.

### Nachteile:

(gegenüber Wälzführungen ohne Wälzkörperrückführung)

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

### Kugelumlaufeinheit (Quelle: INA)



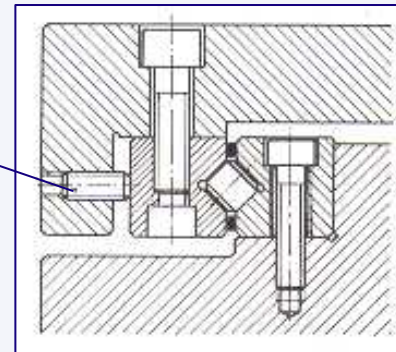
## Wälzführungen: Einstellmöglichkeiten der Vorspannung

➔ 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

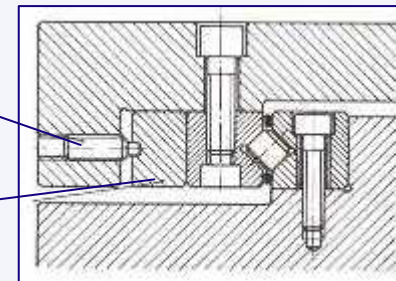
Stellschraube für  
Vorspannung



b) Für höhere Genauigkeit und Steifigkeit wird eine Zwischenplatte verwendet

Stellschraube für  
Vorspannung

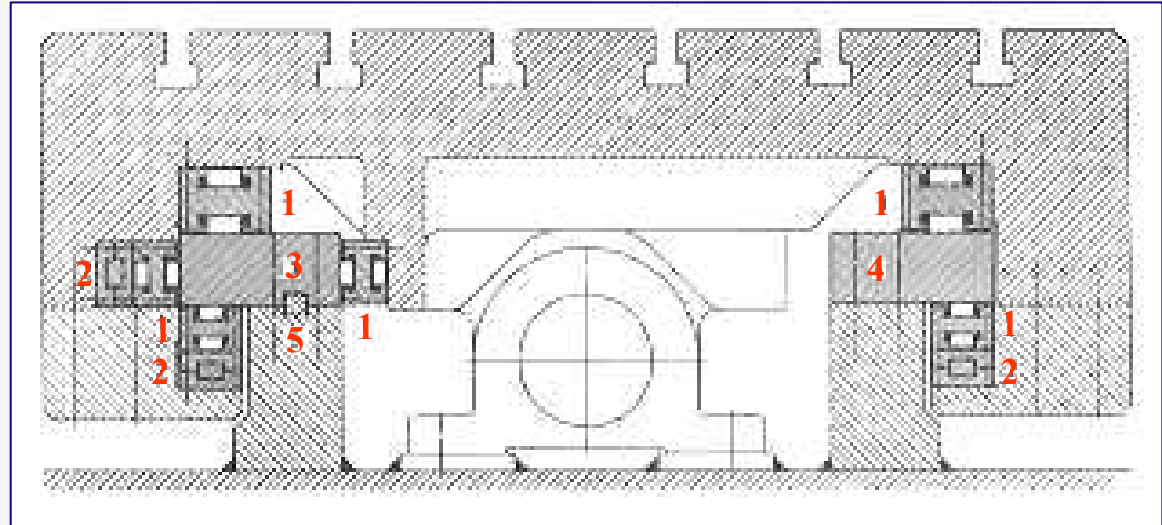
Zwischenplatte



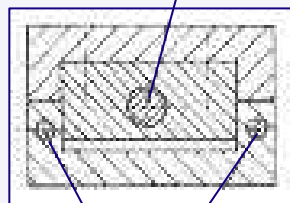
# Einstellmöglichkeiten der Vorspannung: Tischführung einer NC-Bohrmaschine

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

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

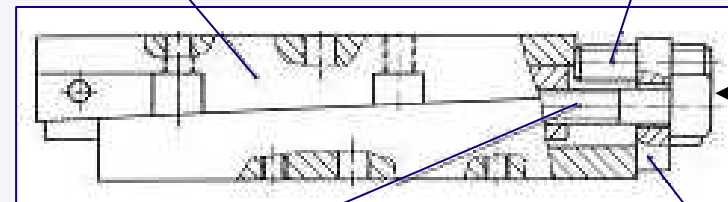


A Zugschraube



Befestigungsschrauben der Halteplatte

axial verschiebbarer Klemmkeil



Zugschraube zum Einstellen der Vorspannung

Konterschraube zum Klemmen der Halteplatte

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*

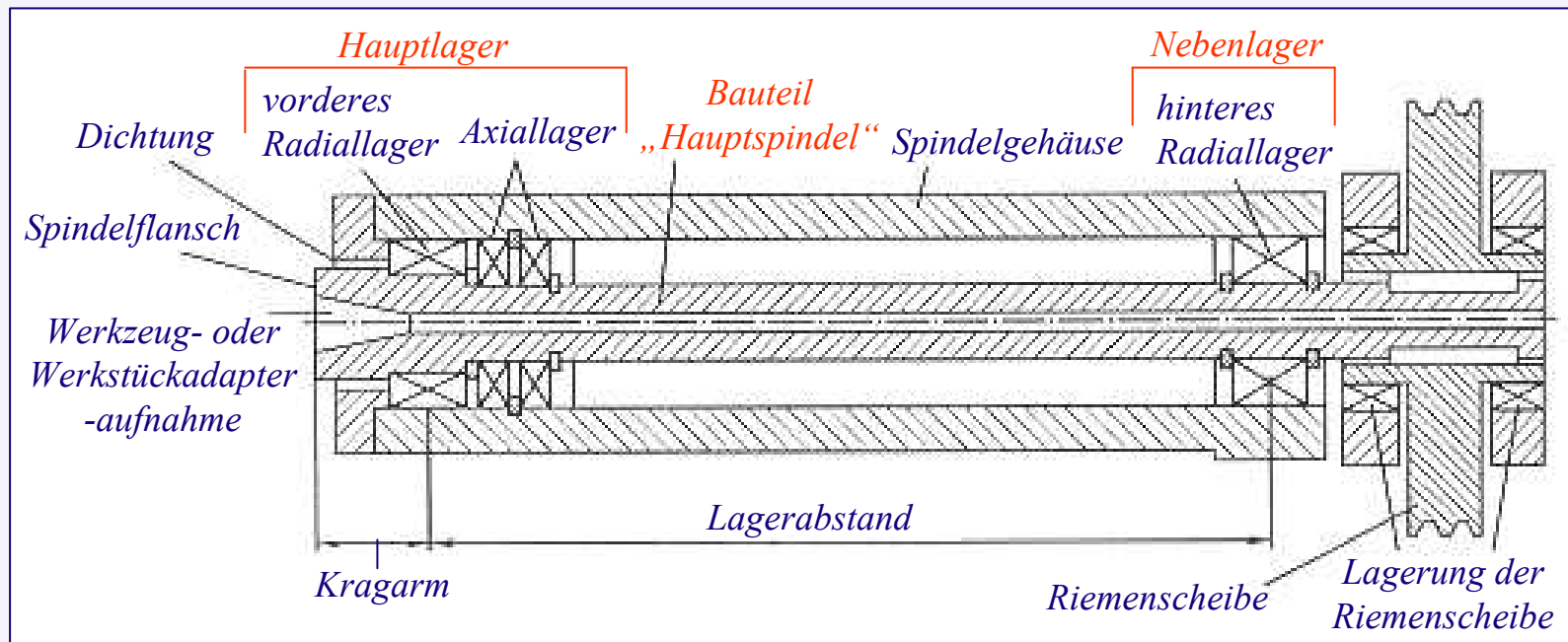
Quelle: Prof. Reinhart, iw b

# ***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*

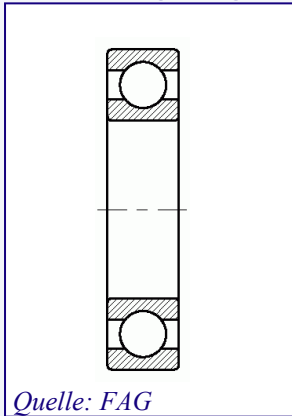
# Wälzlager

- 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: *Radialwälzlager* für Hauptspindeln (typische Beispiele)

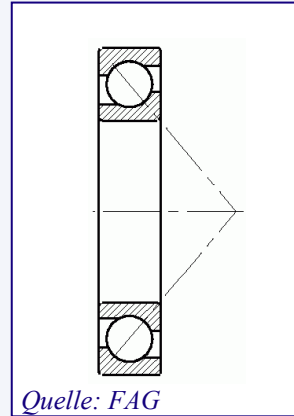
*Rillenkugellager*



*Eigenschaften:*

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

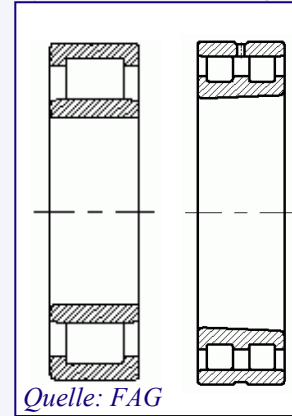
*Schräggugellager*



*Eigenschaften:*

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

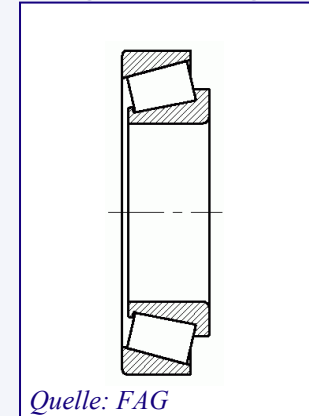
*Zylinderrollenlager*



*Eigenschaften:*

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

*Kegelrollenlager*

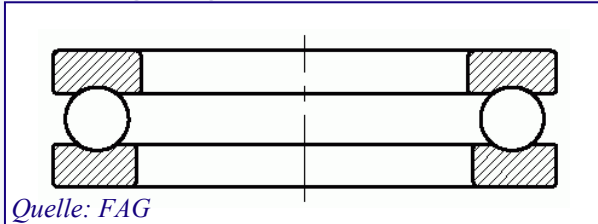


*Eigenschaften:*

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

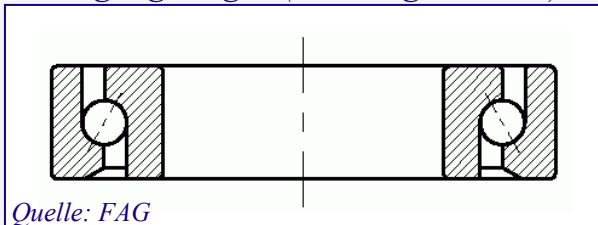
## Wälzlager: Axialwälzlager für Hauptspindeln (typische Beispiele)

### Rillenkugellager



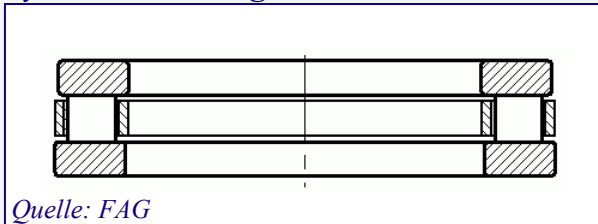
- Eigenschaften:*
- mittlere Axialkräfte
  - mittlere Drehzahlen
  - einfache Spieleinstellung

### 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

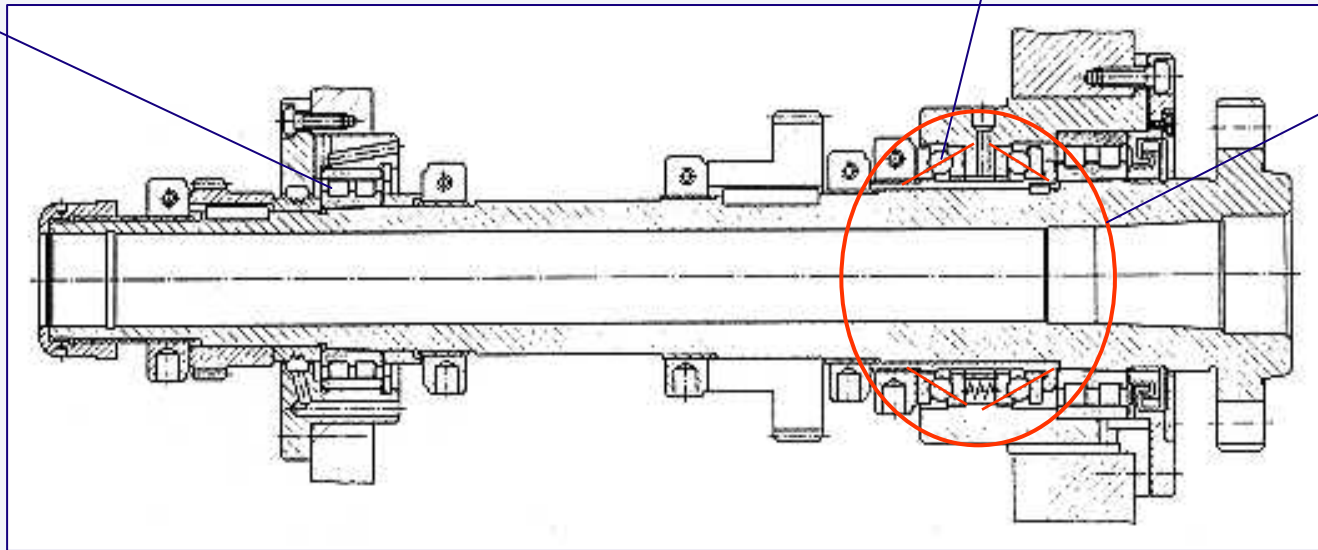
*axiale Lagerung: Axialrillenkugellager*

- mittlere Drehzahlen

zweireihiges  
Zylinderrollenlager

Axialrillenkugellager

O-Anordnung



*Belastungsprofil:* • mittlere Drehzahlen  
• mittlere Belastungen

*Verwendungszweck:* • Fräsmaschine  
• Drehmaschine

Quelle: Perović

## Wälzlager: bevorzugte Spindellagerungen

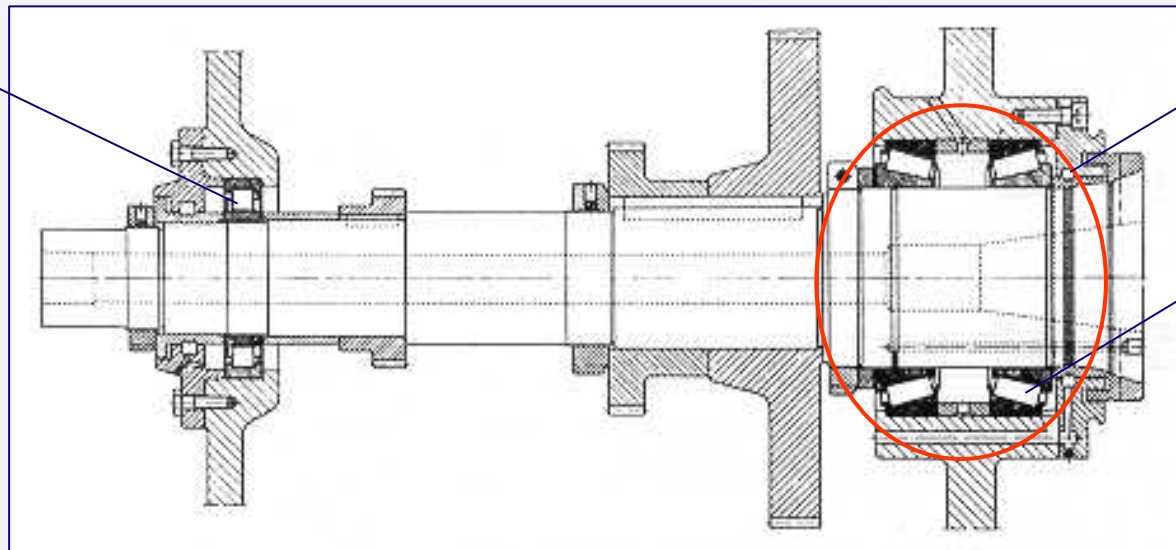
*radiale Lagerung: Kegelrollenlager,  
Zylinderrollenlager*

- *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*

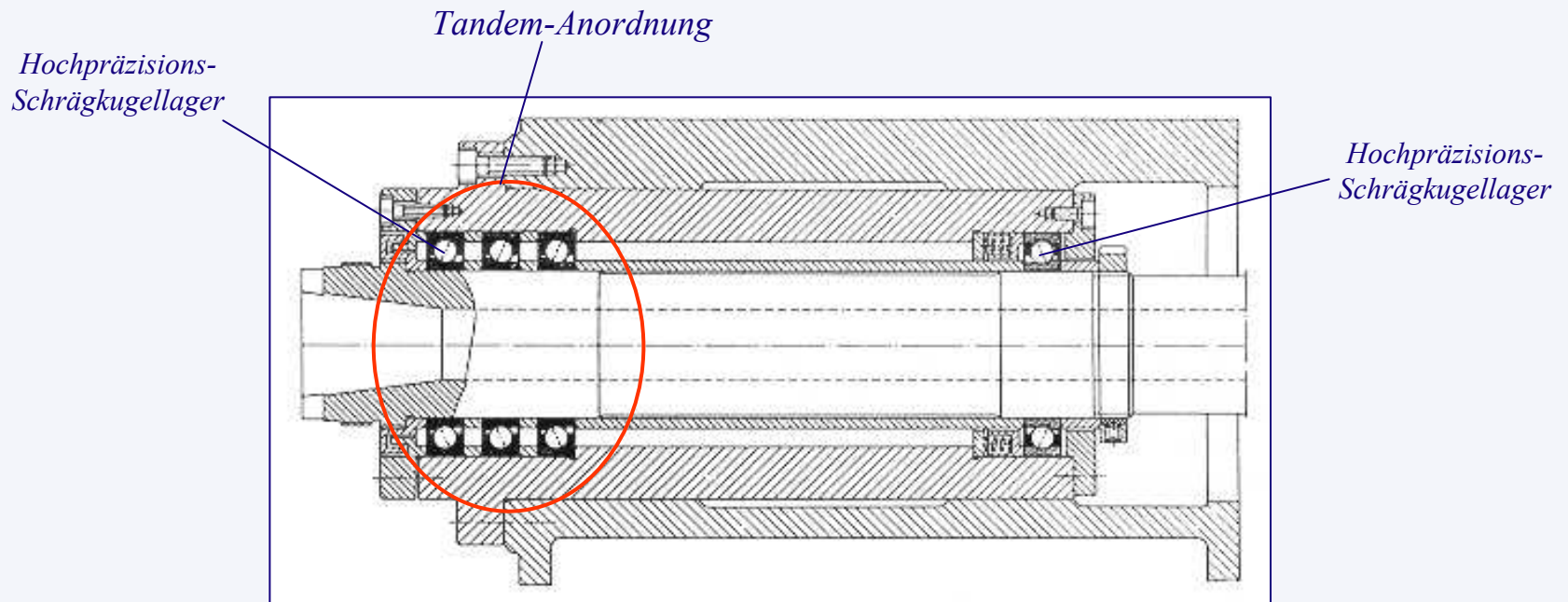
*Verwendungszweck:* • *Schruppfräsmaschinen*  
• *Schruppdrehmaschinen*

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

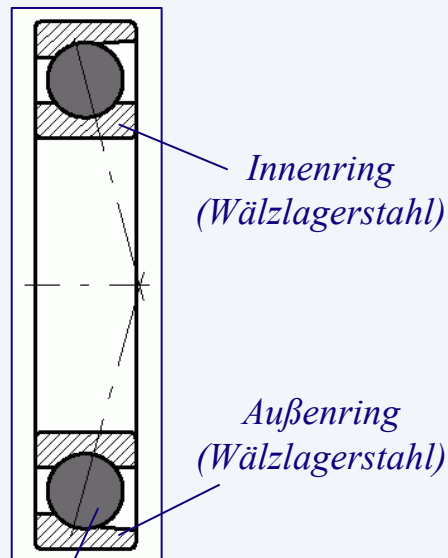
*Verwendungszweck:*

- Schleifmaschine
- Feinbohrmaschine
- Feindrehmaschine

Quelle: Perović

## Wälzlager: Keramik-Hybrid-Lager

### Hybrid-Keramikspindellager (Schräggugellager)



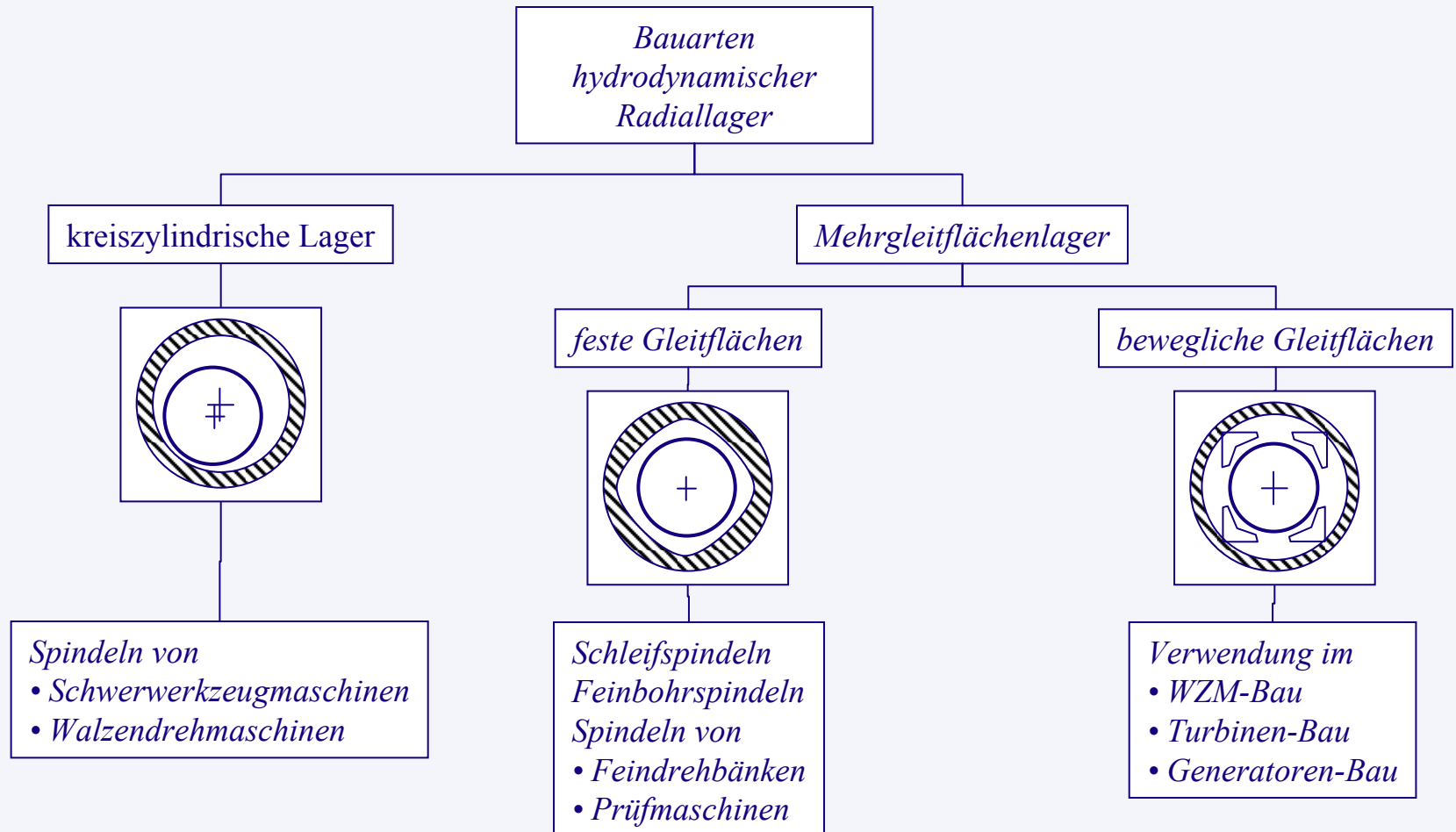
Keramik-Hybrid-Lager besitzen, gegenüber herkömmlichen Wälzlagern, Kugeln aus Keramik (Siliziumnitrid  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).  
Damit erheben sich eine Reihe von **Vorteilen**:

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

### Nachteil:

- höherer Preis (wegen Herstellung der Keramikugeln)

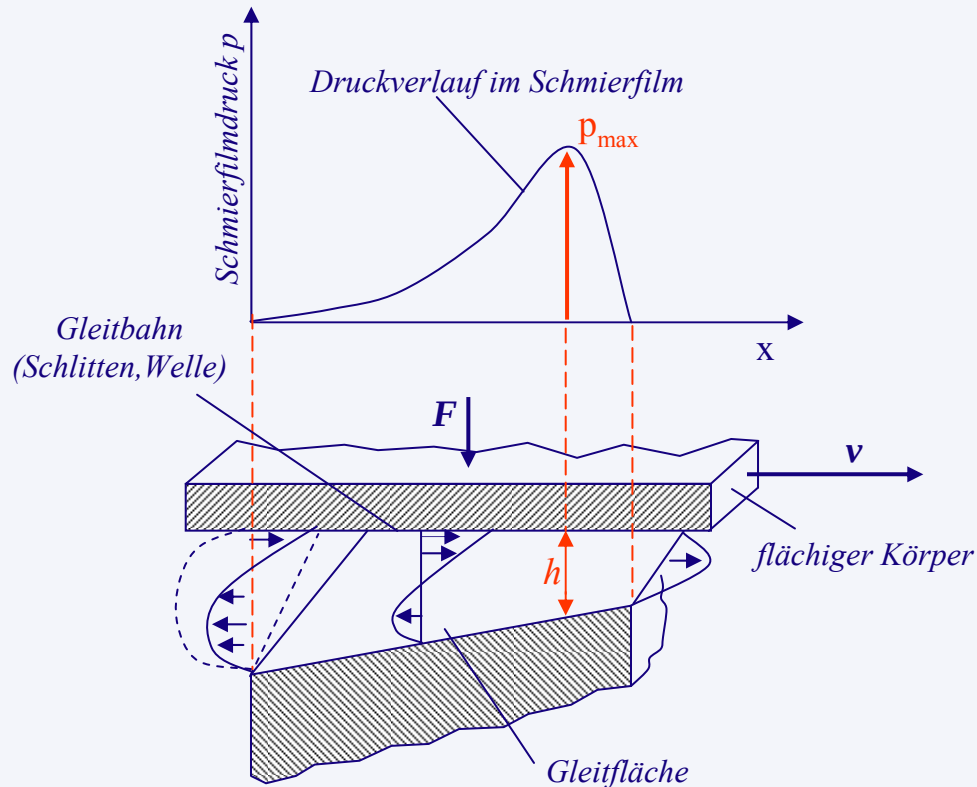
# Hydrodynamische Gleitlager



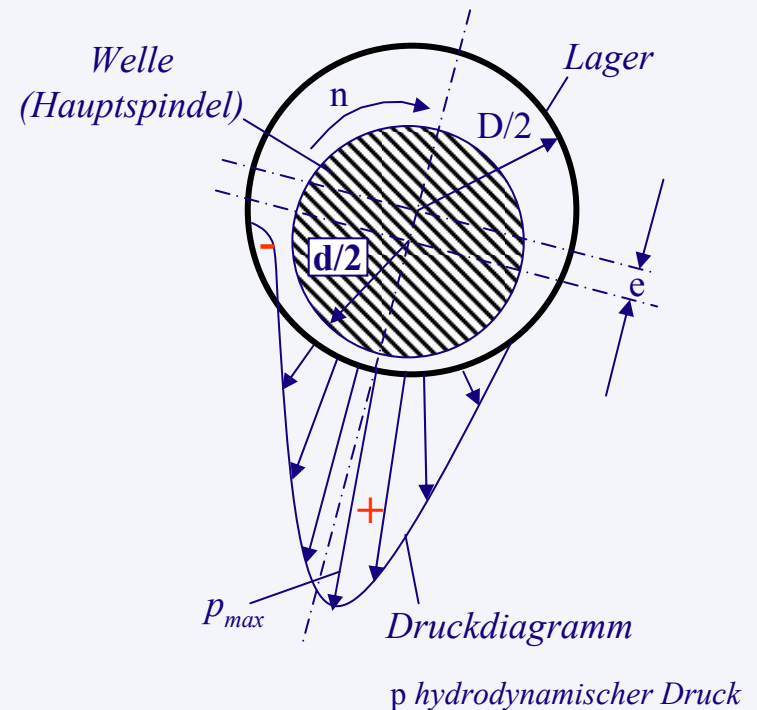
Quelle: Weck, WZM

# Hydrodynamische Gleitlager

Druckaufbau und -verteilung in einer Gleitführung



Druckaufbau und -verteilung im Gleitlager

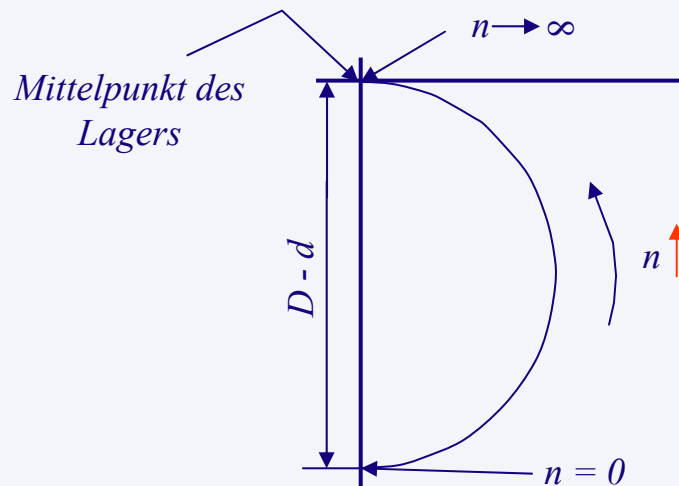


➔ Wie bei der Gleitführung entsteht im Gleitlager kurz vor der engsten Stelle, zwischen Welle und Lager, das Druckmaximum. Danach fällt der Druck ab und es kann ein Unterdruck entstehen.

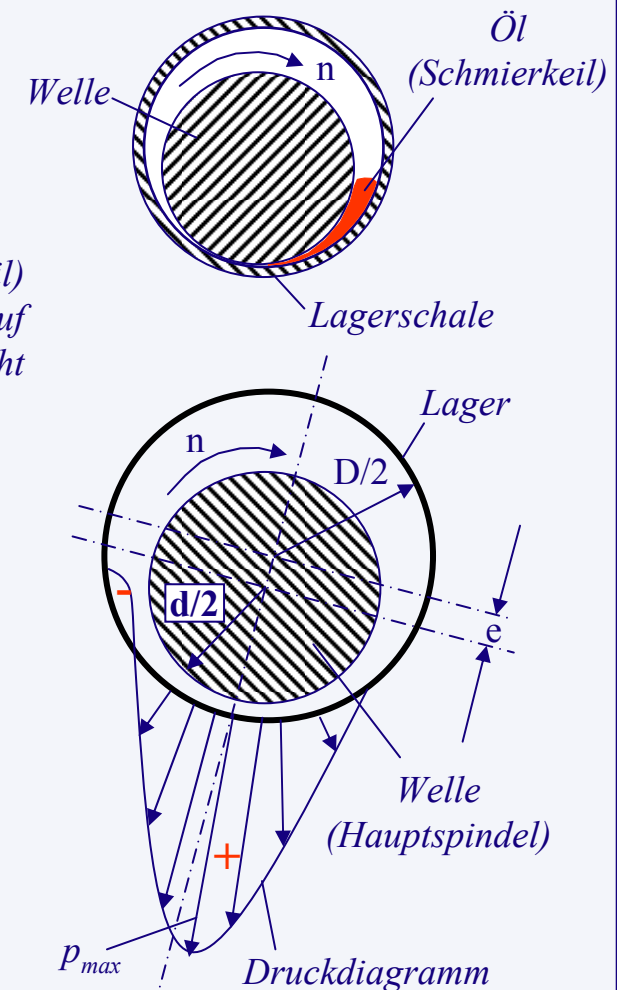
# Hydrodynamische Gleitlager: Druckaufbau (kreiszyklindrisches Gleitlager)

- 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!

## Gumbelscher Halbkreis



## Druckaufbau und -verteilung



# 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

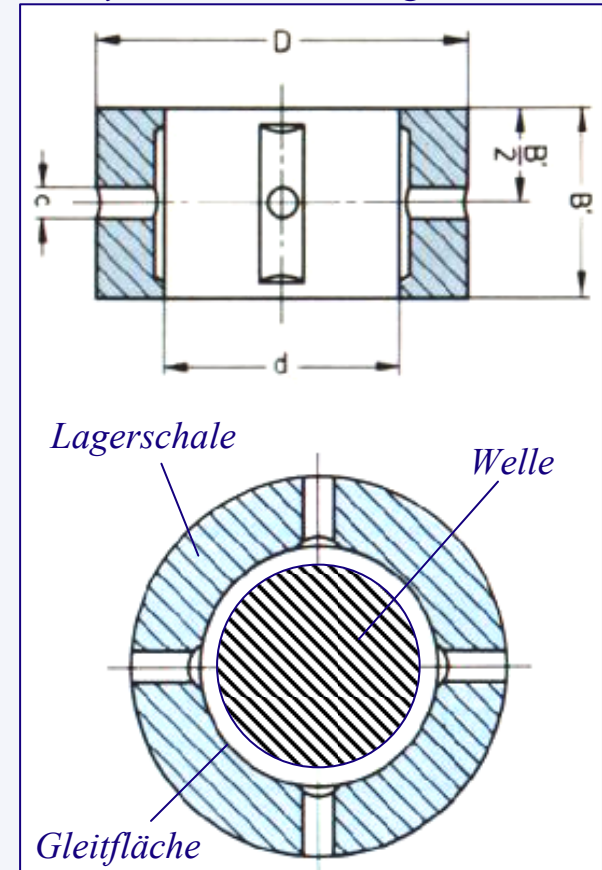
➔ Die Tragkraft von hydrodynamischen Lagern ist von der Drehzahl abhängig!

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

$F$  Tragkraft des Lagers  
 $K$  Proportionalitätsfaktor  
 $\eta$  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!

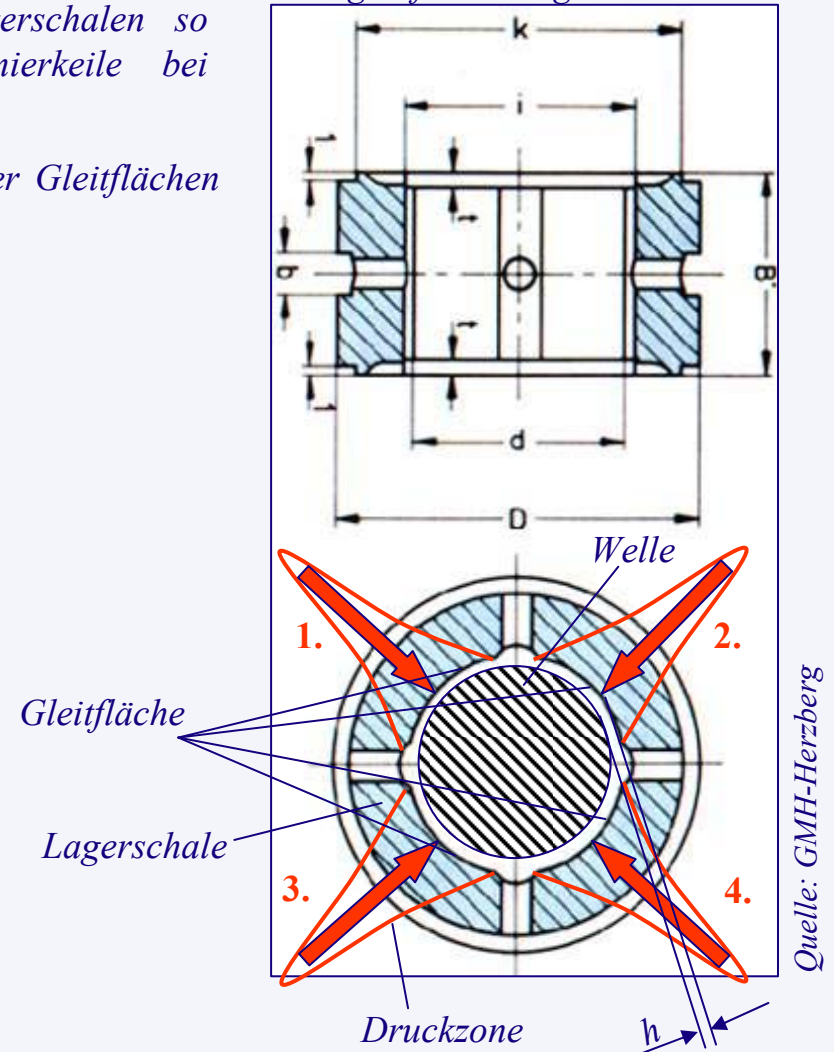
## Vorteil:

- 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.

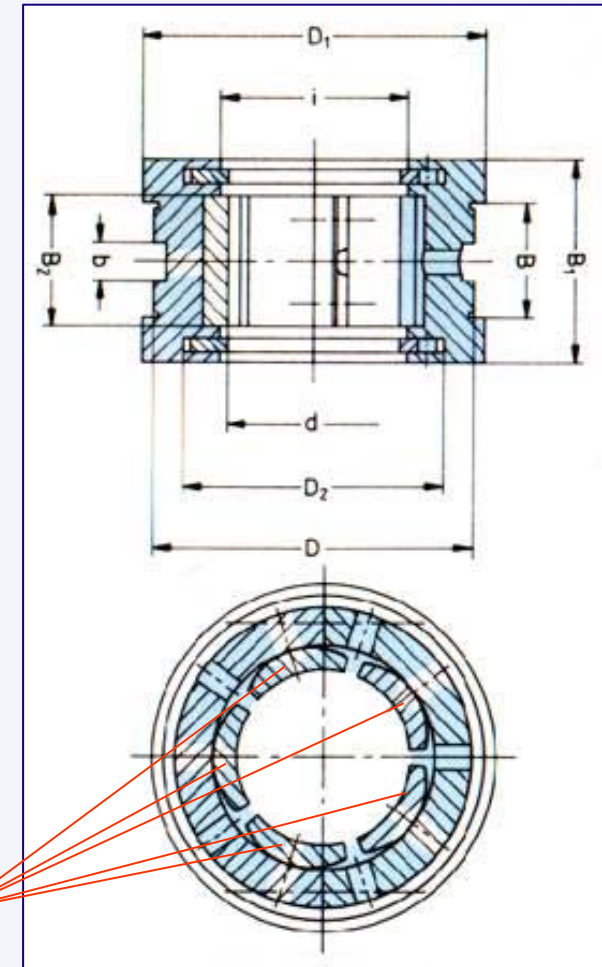
## Vorteil:

- 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

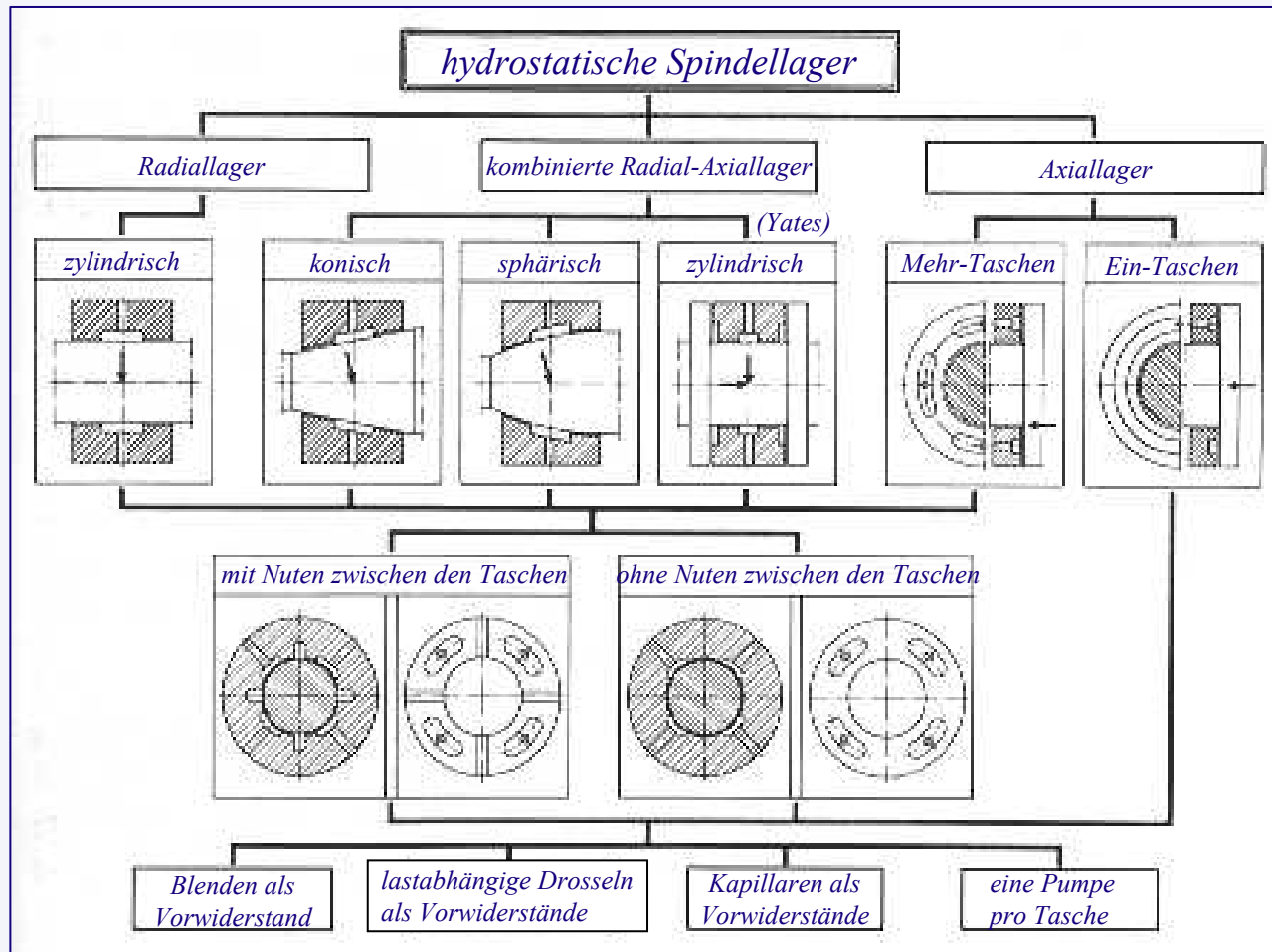
Kippsegmentlager



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*

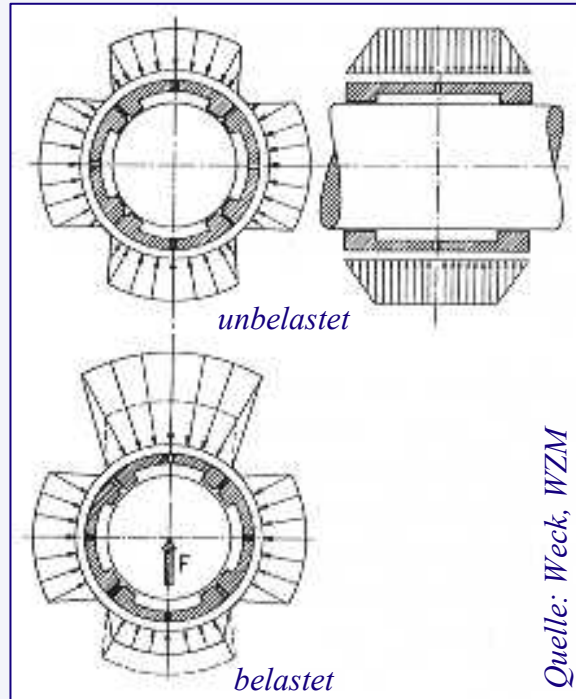
$$K \approx \frac{p_p \cdot A_w}{h_0}$$

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

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

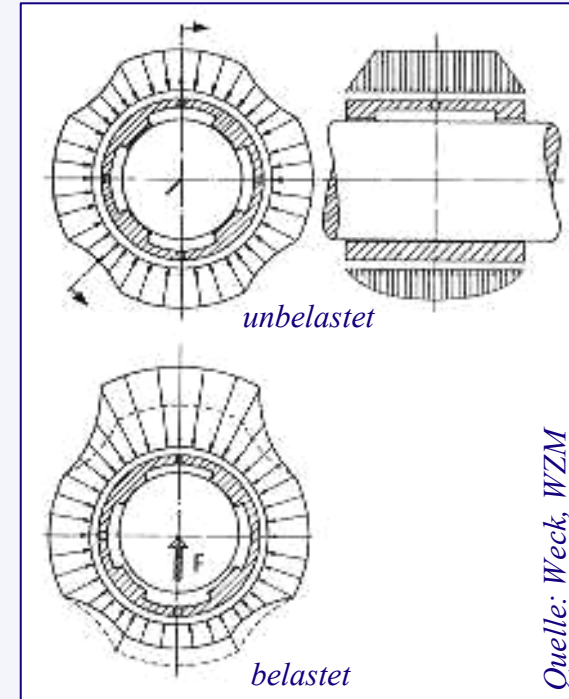
# Hydrostatische Gleitlager: Druckverlauf in einem Radiallager

*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 $[K]$        | <i>wesentlicher Einfluss auf</i> → | geometrische Formgenauigkeit |
| dynamische Steifigkeit $[K_{dyn}]$ | <i>wesentlicher Einfluss auf</i> → | Oberflächengüte              |

Es gilt:

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

$F$  statische Kraft

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

$\tilde{F}$  dynamische Kraft

$y$  statische Verlagerung

$\tilde{y}$  dynamische Verlagerung

# Statische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

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

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

$a$  Kraglänge

$b$  Lagerabstand

$K_V$  radiale Steifigkeit des vorderen Lager

$K_h$  radiale Steifigkeit des hinteren Lagers

$E$  Elastizitätsmodul

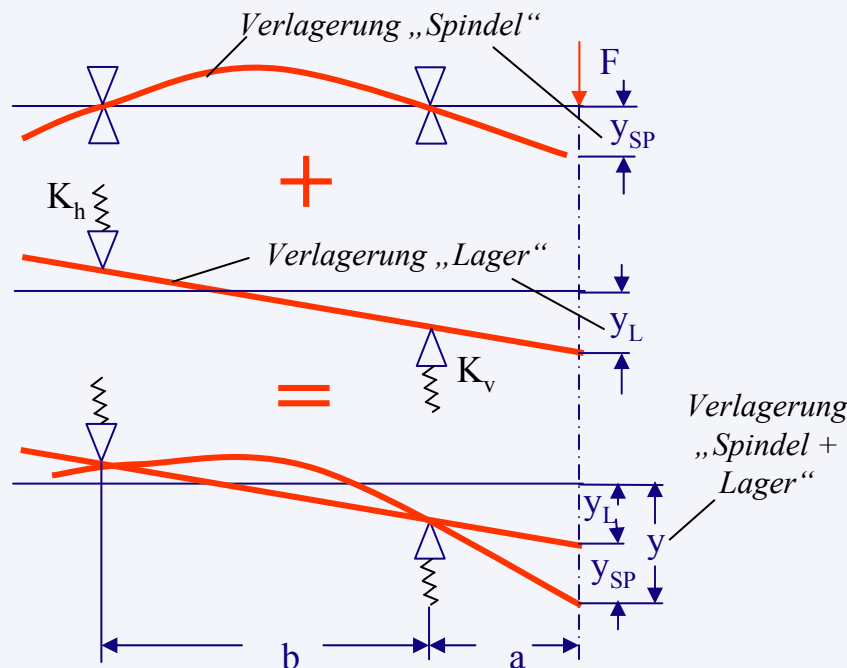
$F$  statische Kraft

$J_{SP}$  axiales (äquatoriales) Flächenträgheitsmoment der Spindel

$y_L$  Lageranteil an der Kraftangriffsstelle

$y_{SP}$  Spindelanteil an der Kraftangriffsstelle

$y$  Gesamtverlagerung



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

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

Gesamtverlagerung:

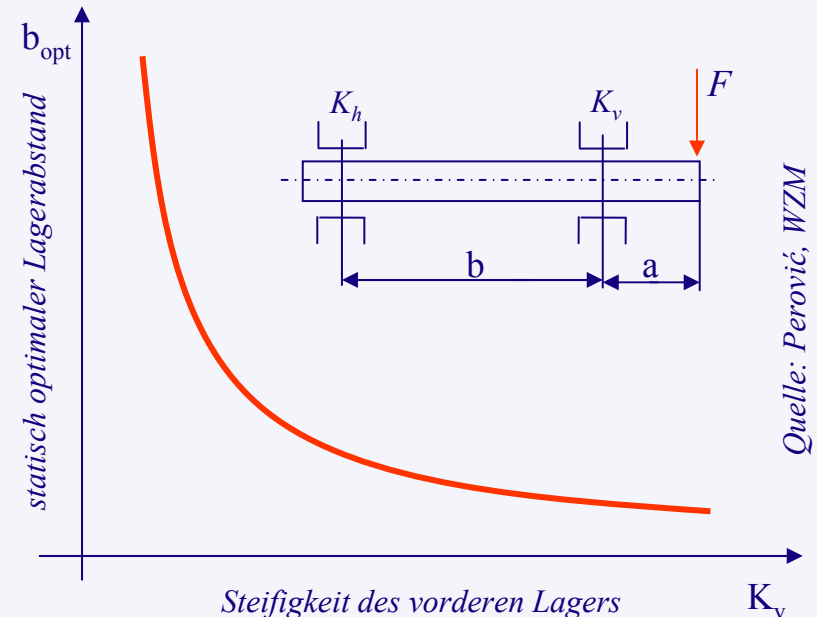
$$y = y_{SP} + y_L = \frac{F \cdot b \cdot a^2}{3 \cdot J_{SP} \cdot E} \left( 1 + \frac{a}{b} \right) + \frac{F}{b^2} \cdot \left[ \frac{(a+b)^2}{K_V} + \frac{a^2}{K_h} \right]$$

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

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

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

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

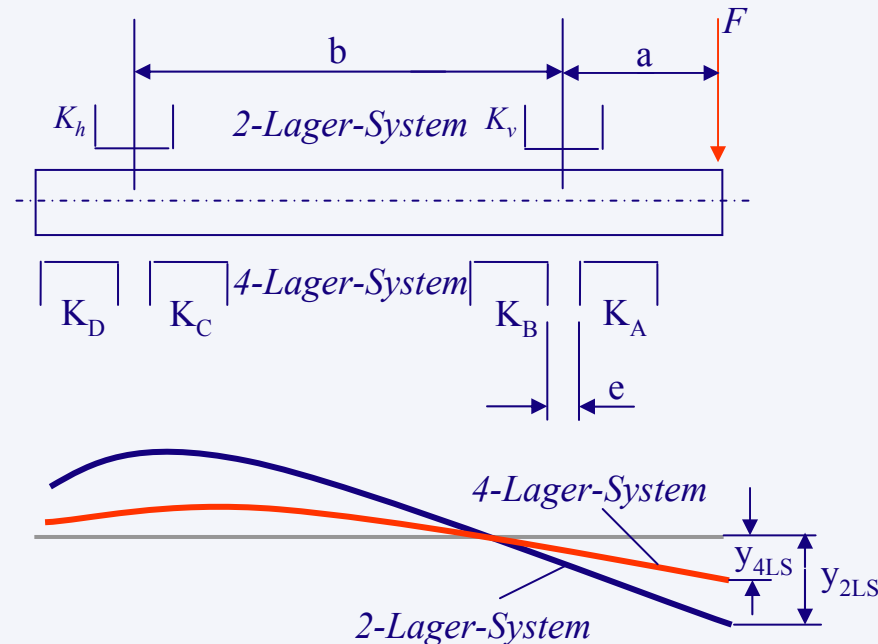


Quelle: Perović, WZM

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

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

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

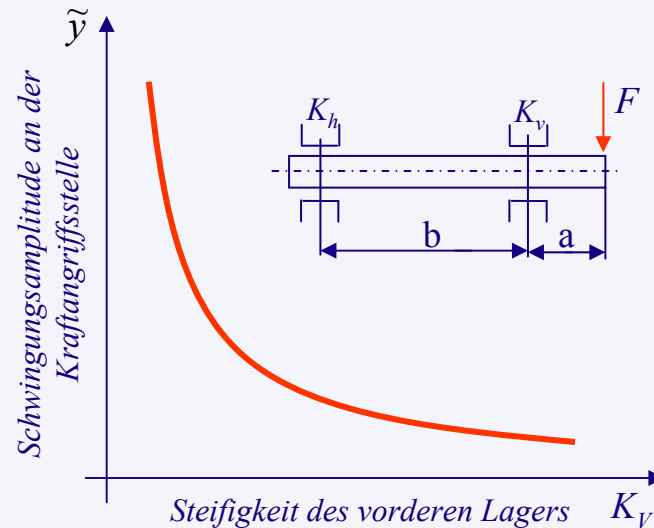


Mit Zunahme des Abstands  $e$  zwischen zwei vorderen Lagern verringert sich die Gesamtverlagerung  $y$ . Diesem Trend sind jedoch Grenzen gesetzt, da bei immer größer werdendem Abstand  $e$  das vordere Lager schließlich so nah an das hintere rückt, dass die Vorteile des zweiten vorderen Lagers aufgehoben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

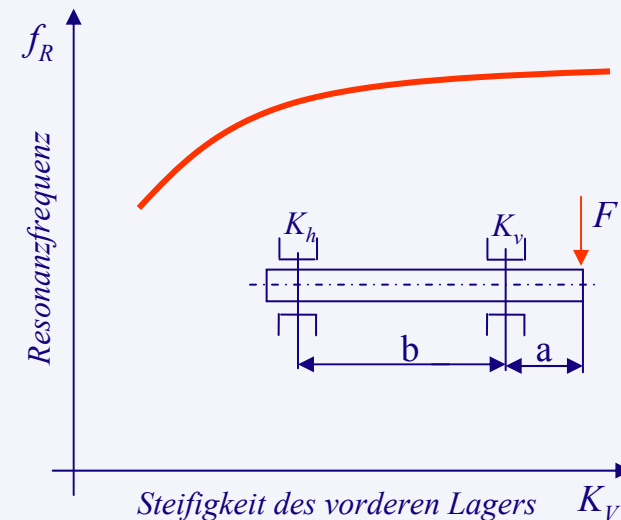
Quelle: Perović, WZM

# 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*

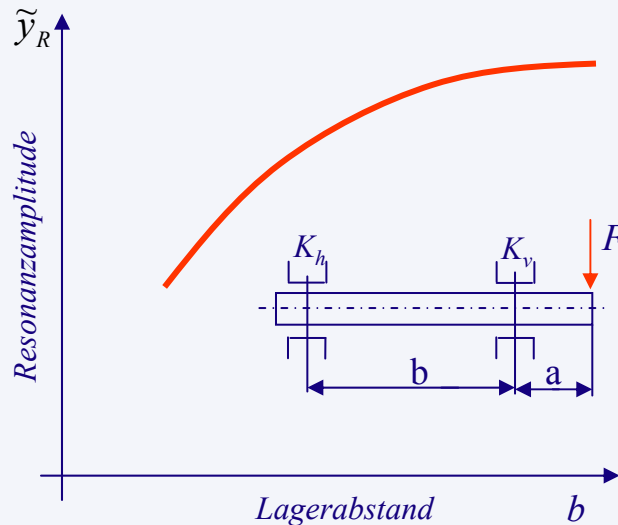


*Mit zunehmender Steifigkeit des vorderen Lagers nimmt die Schwingungsamplitude an der Kraftangriffsstelle ab und die Resonanzfrequenz zu. Die Kurve der dynamischen Steifigkeit verläuft ähnlich wie die Kurve der statischen Steifigkeit!*

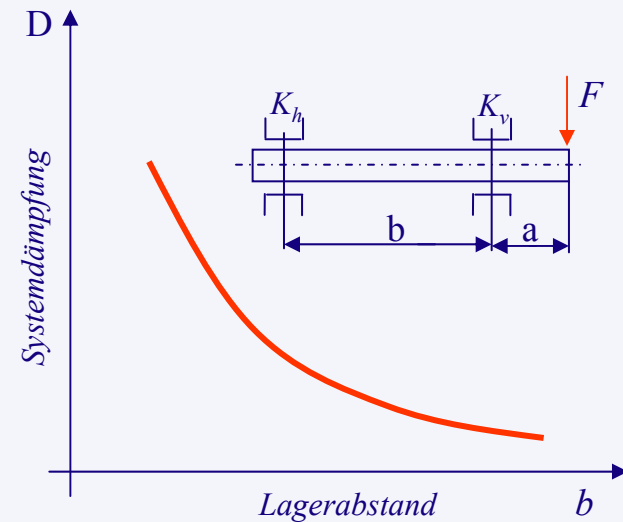
Quelle: Perović, WZM

# Dynamische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

*Einfluss des Lagerabstands auf die Resonanzamplitude*



*Einfluss des Lagerabstands auf die Systemdämpfung*

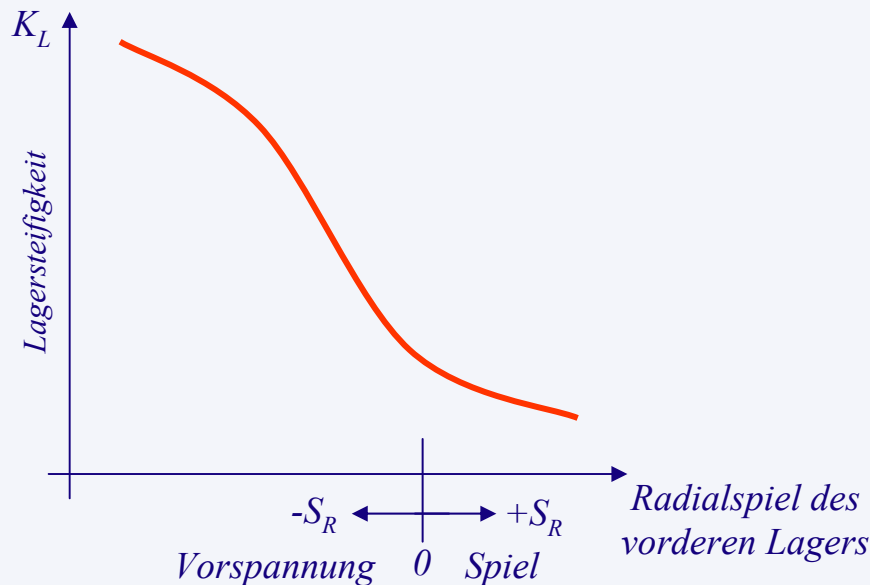


Mit abnehmendem Lagerabstand  $b$  verbessert sich das dynamische Verhalten des Spindel-Lager-Systems. Die Systemdämpfung  $D$  nimmt zu und die Resonanzamplitude ab. Dabei ist zu beachten, dass kleine Lagerabstände nur bei großen Lagersteifigkeiten zu wählen sind, damit die statische Verlagerung minimal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

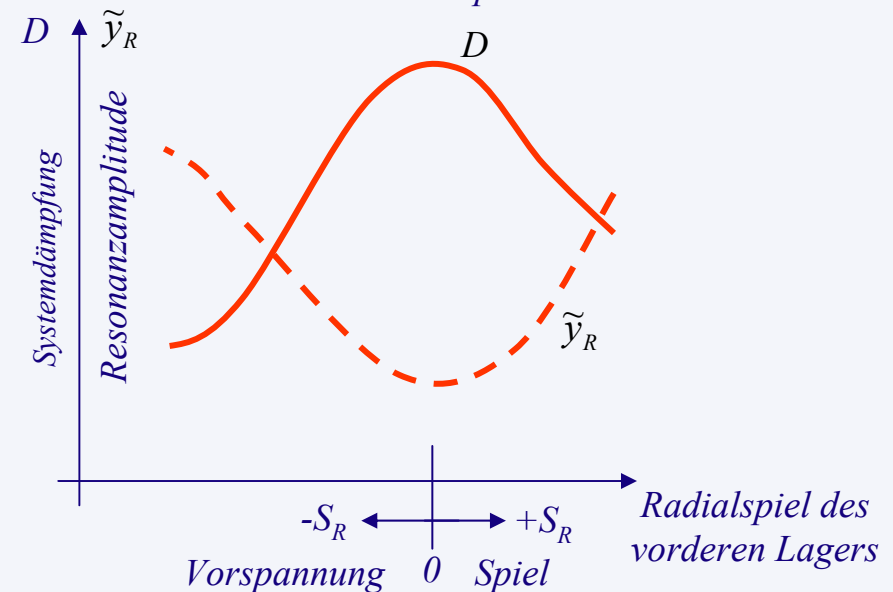
Quelle: Perović, WZM

# Dynamische Steifigkeit von Spindel-Lager-Systemen

*Einfluss des Lagerspiels auf die Lagersteifigkeit*



*Einfluss des Lagerspiels auf die Systemdämpfung und Resonanzamplitude*



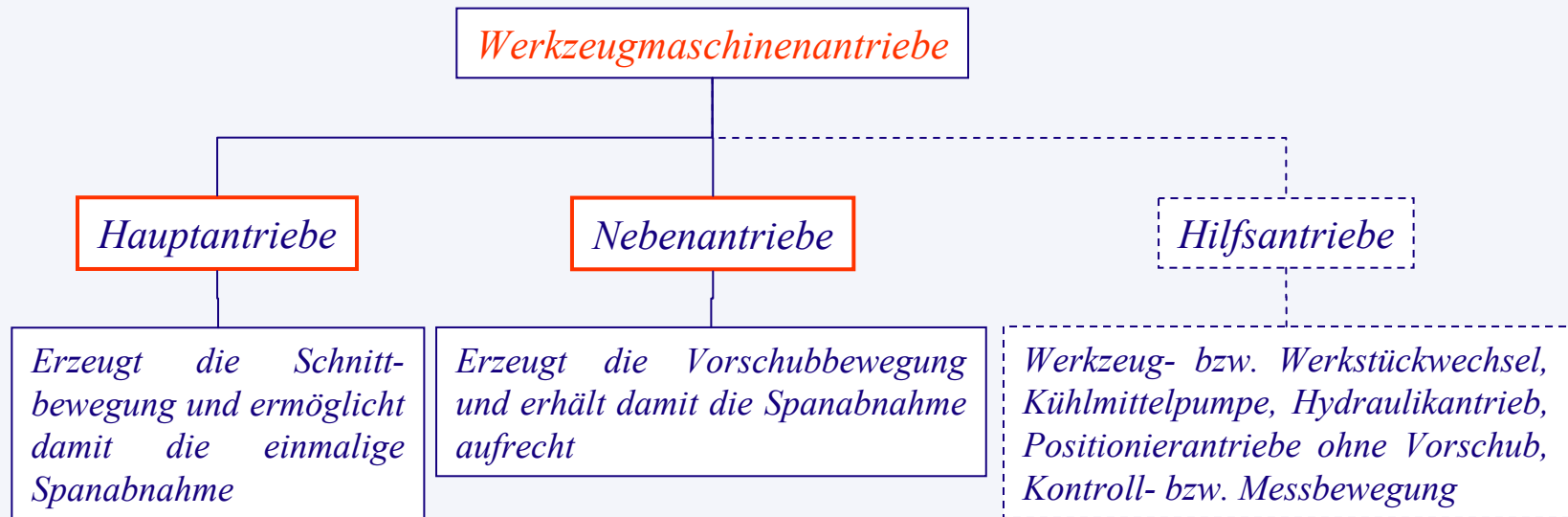
Mit Abnahme des Lagerspiels bzw. mit Zunahme der Lagervorspannung erhöht sich die Lagersteifigkeit  $K_L$ . Das günstigste dynamische Verhalten liegt im Bereich des spielfreien Zustands des Lagers ( $S_R=0$ ), da die Systemdämpfung den maximalen und die Resonanzamplitude den minimalen Wert erreichen.

Quelle: Perović, WZM

# *Antriebe*



# Antriebe



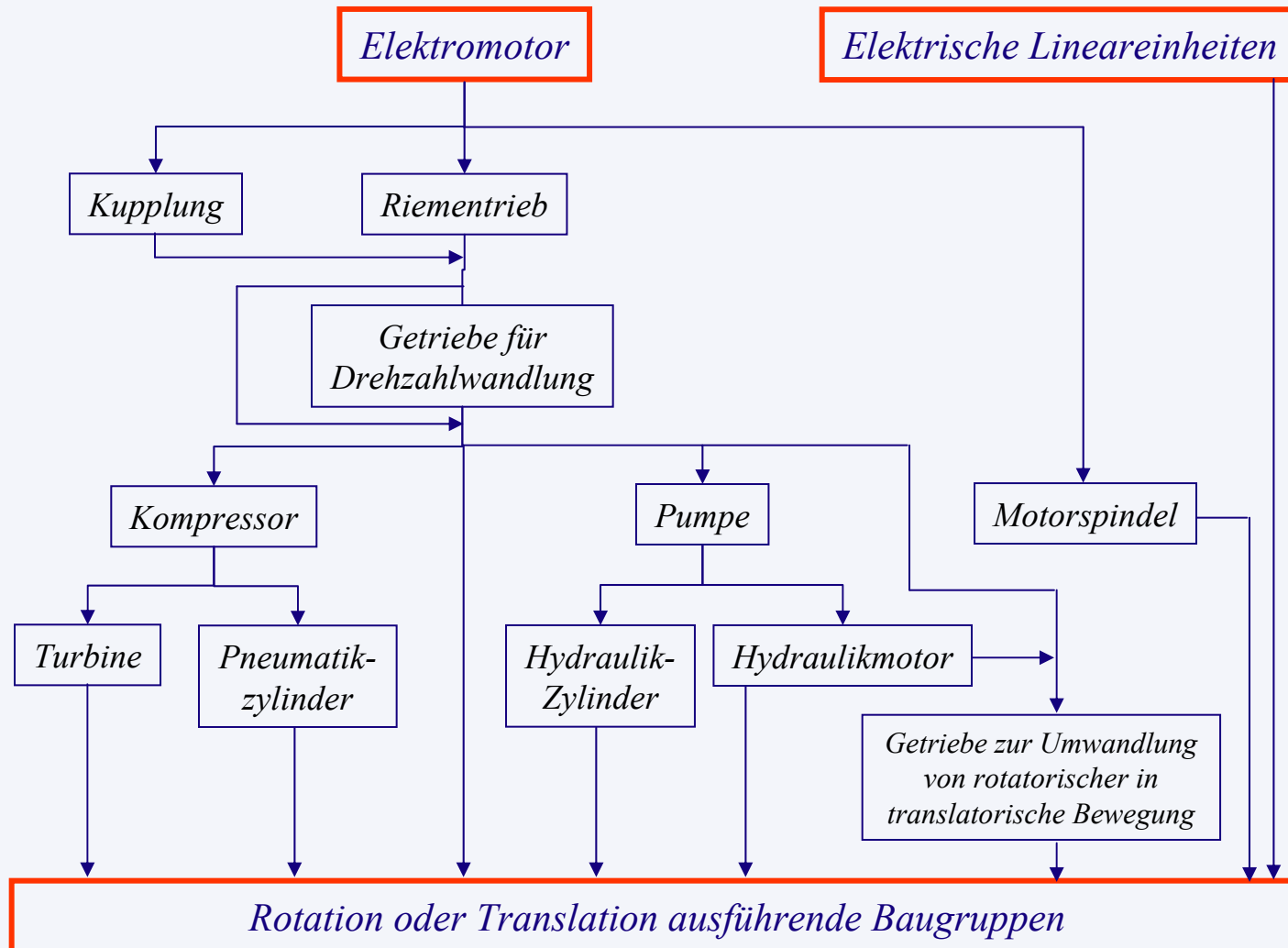
➔ Der Haupt- und Nebenantrieb sind die produktivitätsbestimmenden Baugruppen einer Werkzeugmaschine. Bei der Maschinenanwendung bzw. Maschinenentwicklung müssen deren Eigenschaften gut mit den fertigungstechnischen Ansprüchen abgestimmt werden.

# Antriebe

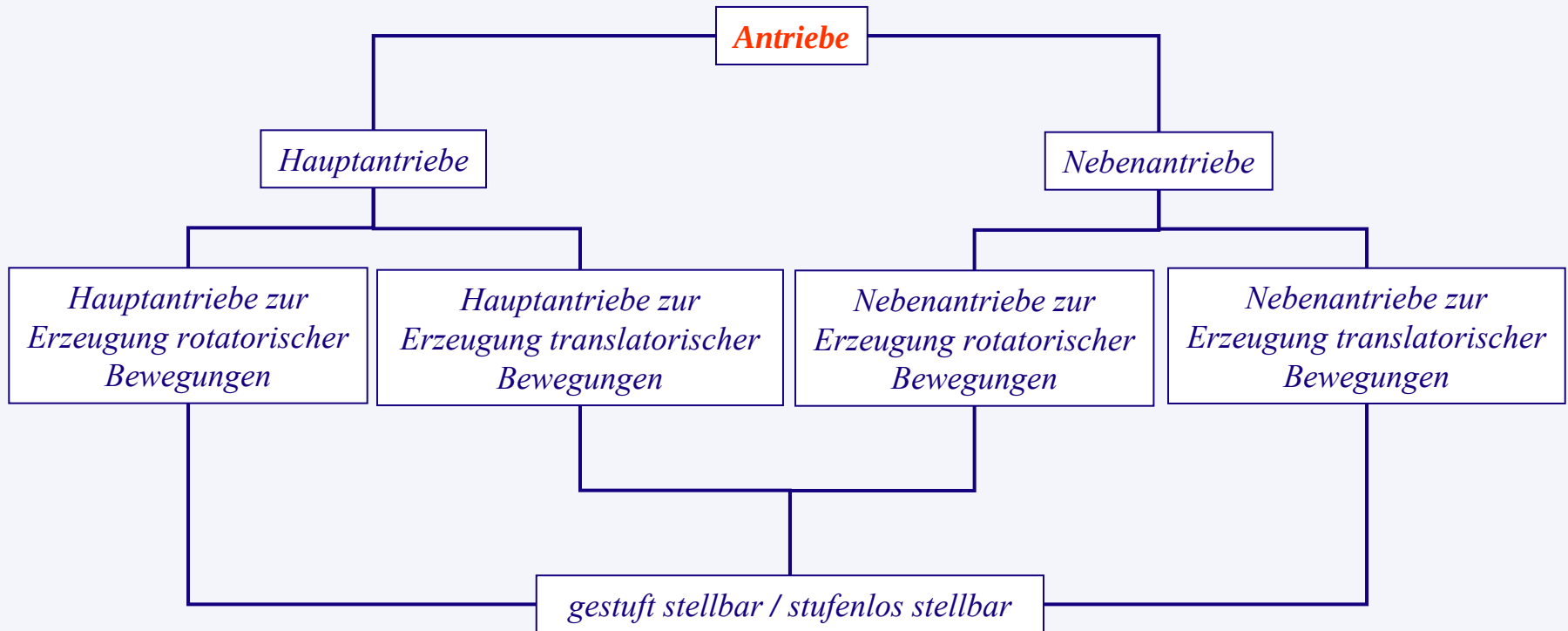
## *Anforderungen an Haupt- und Nebenantriebe:*

- *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  $\varphi$ . Der Stufungsfaktor  $\varphi$  wird auch als Stufensprung bezeichnet.

$$\begin{aligned}
 &n_1 \\
 &n_2 = n_1 \cdot \varphi \\
 &n_3 = n_2 \cdot \varphi = n_1 \cdot \varphi^2 \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{array}{c}
 \text{allgemein} \\
 \longrightarrow
 \end{array}
 \quad
 \boxed{n_z = n_1 \cdot \varphi^{(z-1)}}$$

Berechnung des Stufensprungs  $\varphi$

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

$\varphi$  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  
 $\varphi$  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:  $\varphi$ ,  $n_2 - n_5$ ,  $p$

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

errechnete Drehzahlreihe (gerundet)

45, 63, 90, 125, 180, 250

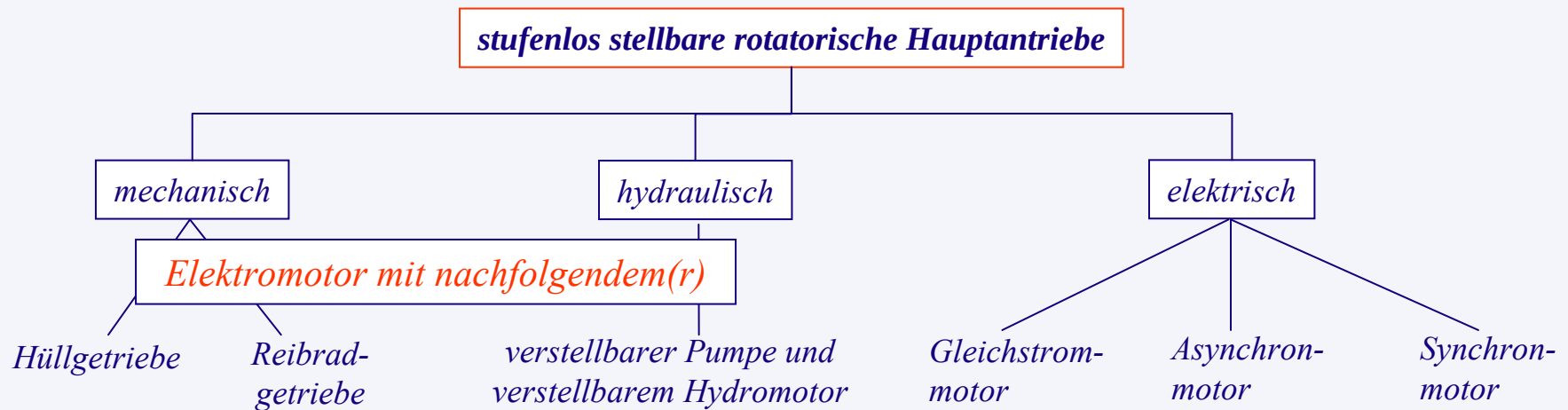
Drehzahlabfall  $p$

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

## *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

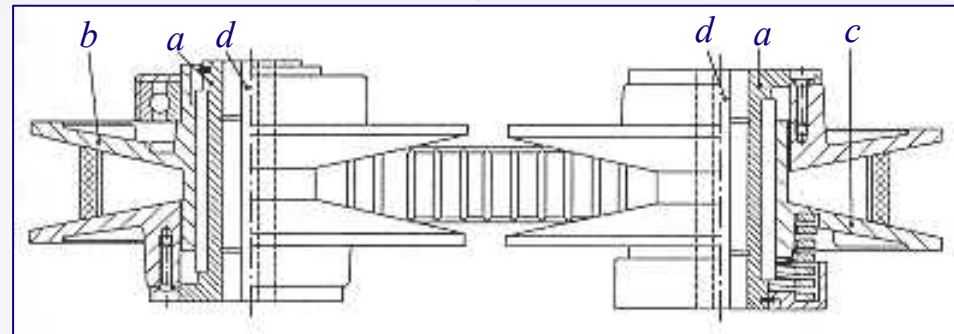
Durch axiales Verschieben der kegelförmig gestalteten Riemenscheibenhälften wird der wirksame Durchmesser einer Scheibe vergrößert bzw. verkleinert, während der andere verkleinert bzw. vergrößert wird.

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



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

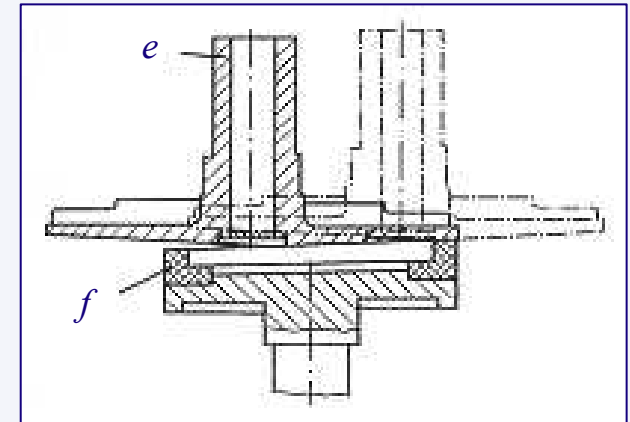
# Mechanisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

## *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 Abtriebsscheibe aus  
verschleißarmen Material*

*Quelle: Hirsch, WZM*

# Stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

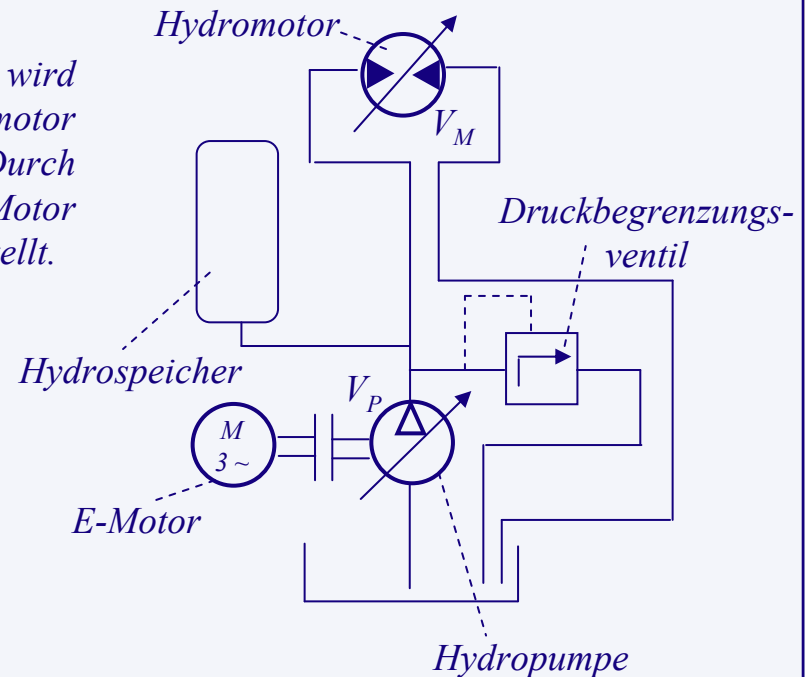
➔ hydraulisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

## 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

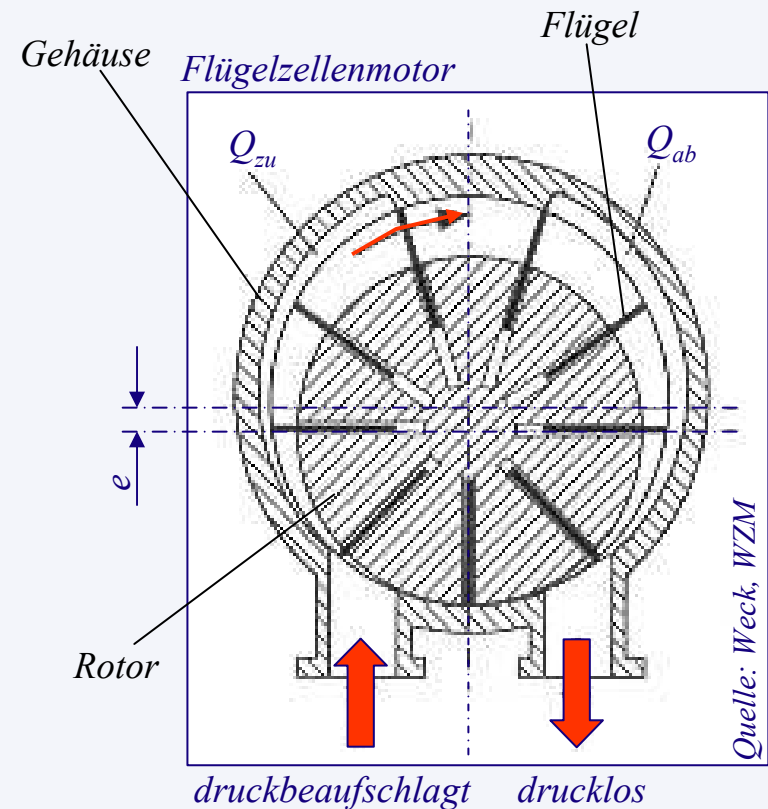
# Hydraulisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

*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<sup>-1</sup>*

### *2. Asynchronmotor*

- mittlere Drehmomente und Leistungen*
- hohe Drehzahlen*

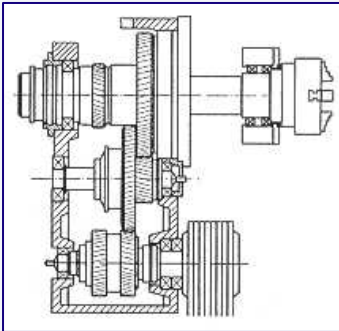
*Der Asynchronmotor bietet folgende Vorteile gegenüber dem Gleichstrommotor:*

- |                                                                                        |                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>• sehr großer Drehzahlbereich, z.B. Drehzahl (0,0001 bis 9000) min<sup>-1</sup></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

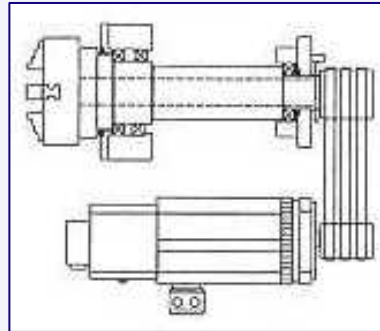
*Folgende Aufbauprinzipien haben sich für Hauptantriebe durchgesetzt:*

*Variante 1*



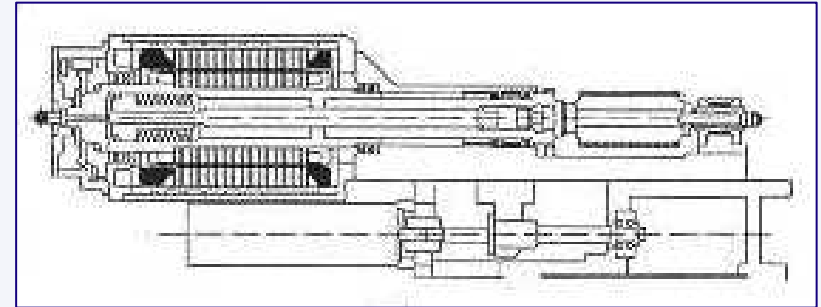
*mit Schaltgetriebe*

*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)

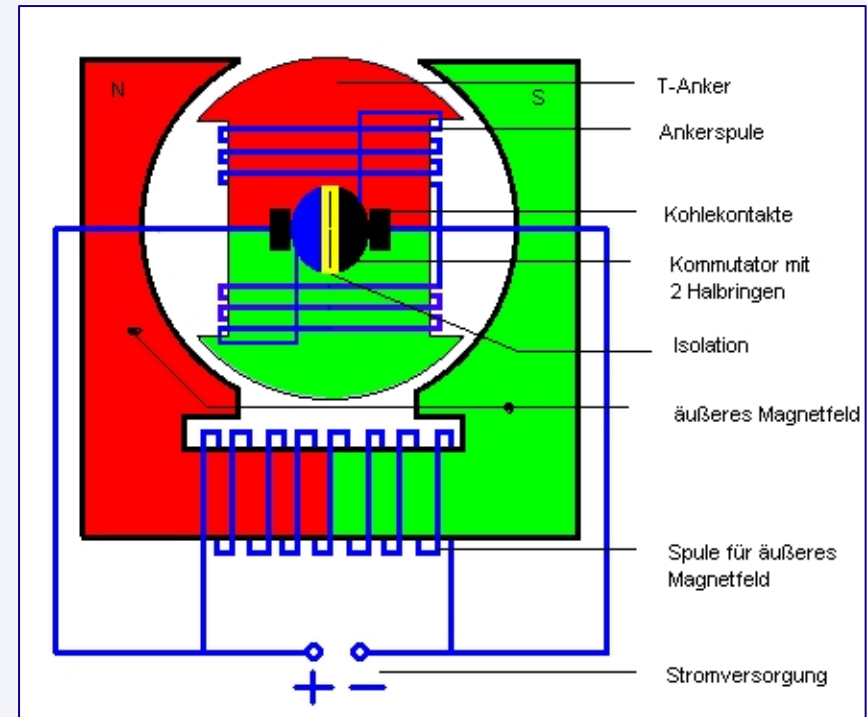
# Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

## *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 Drehzahleinstellungen stufenlos bei konstantem Drehmoment vorgenommen werden. Dieser Bereich wird als Ankerstellbereich  $s_{nn,A}$  bezeichnet
- Im Bereich zwischen Nenndrehzahl  $n_{nenn}$  und Maximaldrehzahl  $n_{max}$  (Feldstellbereich  $s_{nn,F}$ ) ist die Motordrehzahl bei konstanter Leistung wählbar

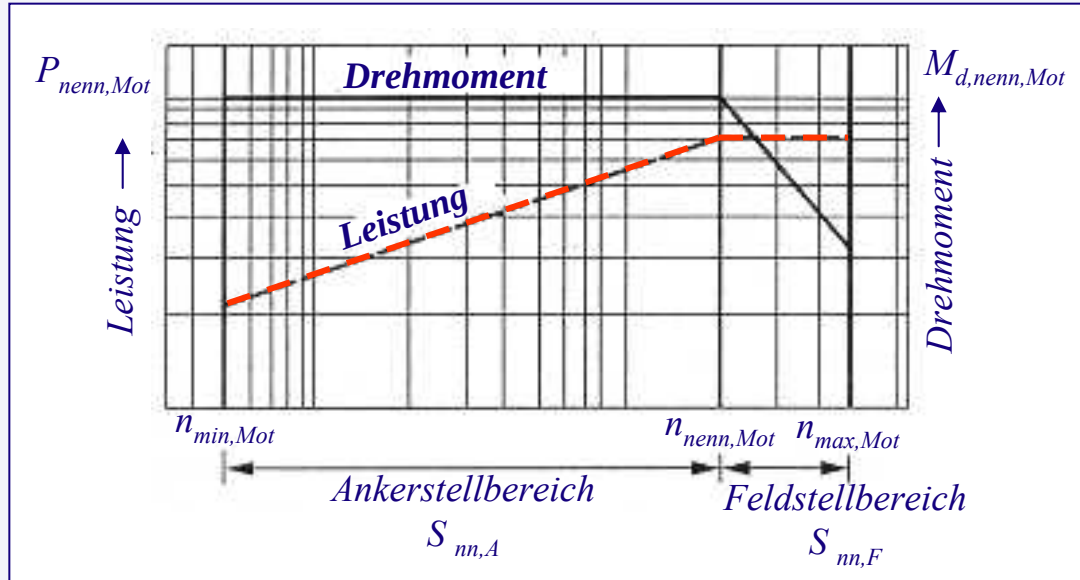
Feldstellbereich  $s_{nn,F}$ :

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

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

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

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



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

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

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

# Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe

## Funktionsprinzip: Asynchronmotor

Werden drei Spulen um  $120^\circ$  ( $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ ) 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

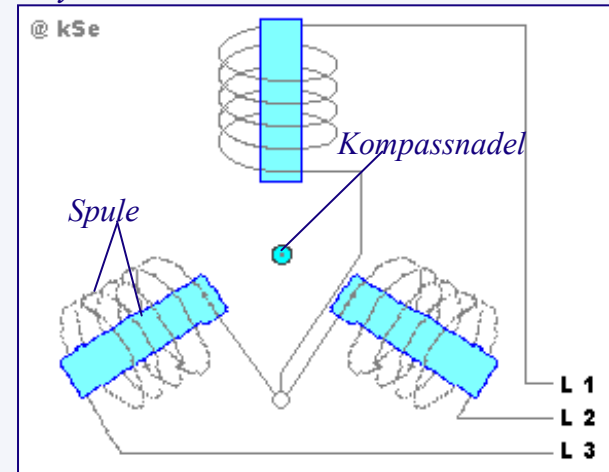
Der Schlupf  $s$  wird in Prozent, bezogen auf die Drehfelddrehzahl, angegeben.

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

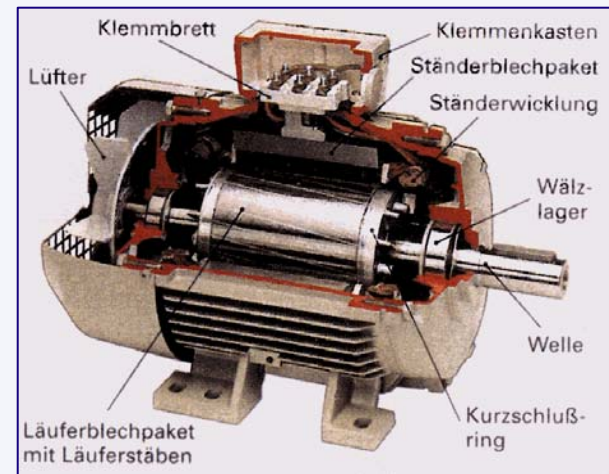
$s$  Schlupf  
 bei großen Motoren  $s \approx 5 \%$

Die Drehzahlstellung erfolgt durch Veränderung der Netzfrequenz (Netzfrequenzwandler).

## Asynchronmotor



Quelle: [www.mechatronik-neuwied.de](http://www.mechatronik-neuwied.de)



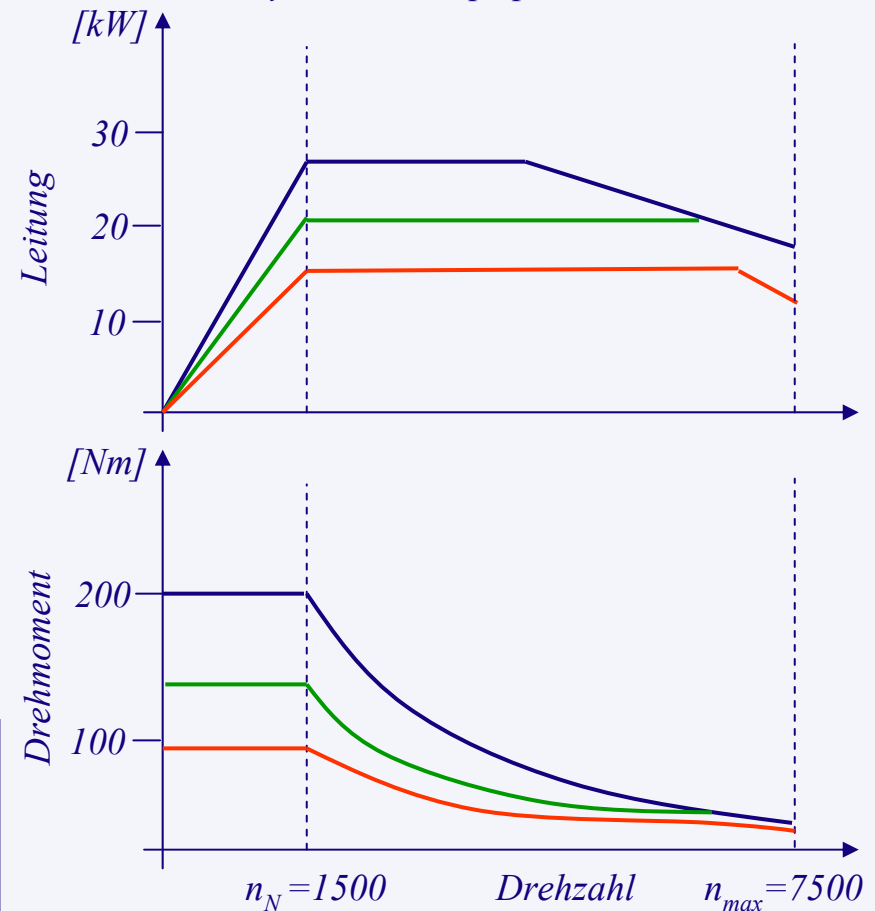
# Elektrisch stufenlos stellbare rotatorische Hauptantriebe: Asynchronmotor

- *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

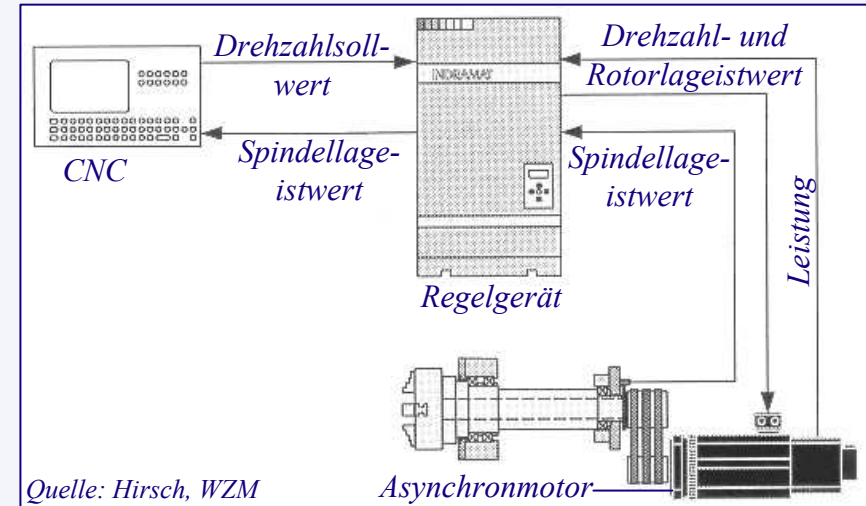
*Mit einer entsprechenden Steuerungstechnik sind folgende Eigenschaften erreichbar:*

- 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 Netzzurückspeisung

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

*Ohne zusätzliche Komponenten sind messbar:*

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



# Hauptantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

*Einsatzbereich:*

- Hobeln
- Stoßen
- Ziehen
- Räumen

*Ausführungsformen:*

- mechanisch
- hydraulisch  $\implies$  translatorische Bewegung durch:
  - Hydraulikzylinder
  - Hydromotor mit Umwandlungsgetriebe

Profil:

- hohe Kräfte bei geringem Platzbedarf
- Geschwindigkeit und Kräfte sind unabhängig vom Weg einstellbar
- hohe Anschaffungs- und Betriebskosten

- pneumatisch (keine Anwendung wegen Kompressibilität der Luft)

*Anforderungen:*

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

# Hauptantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

➔ *elektromechanische translatorische Hauptantriebe*



## Umwandlungsgetriebe:

### ● *Schraubengetriebe (m – Modul, g – Gangzahl)*

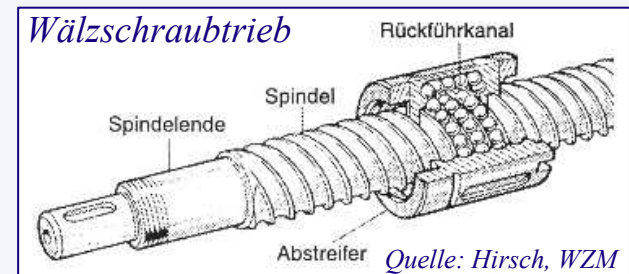
- *Wälzschraubgetriebe mit Gewindesteigung  $h_{Gew}$*
- *Trapez- oder Flachgewindespindel/Mutter-System mit Gewindesteigung  $h_{Gew}$*
- *Schnecken/Zahnstangen-System mit Schneckensteigung  $h_{Sch} = \pi \cdot m \cdot g$*
- *Schnecke/Schnecken Zahnstangen-System mit Schneckensteigung  $h_{Sch} = \pi \cdot m \cdot g$*

*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

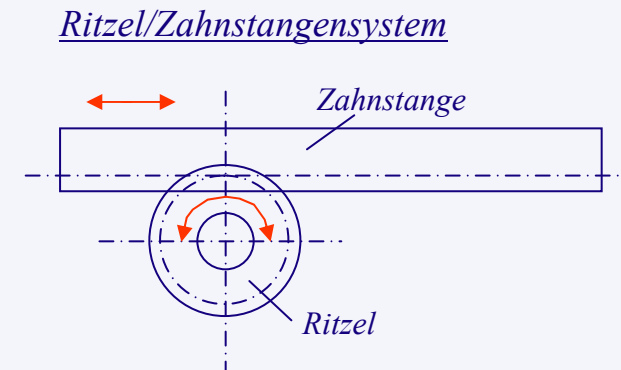
- Ritzel/Zahnstangen-System (z.B. Hobelmaschine)

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

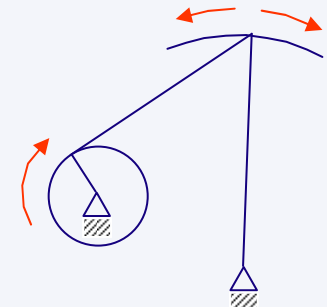
- Schubkurbel
- schwingende Kurbelschleife
- Kurbelschwinge

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

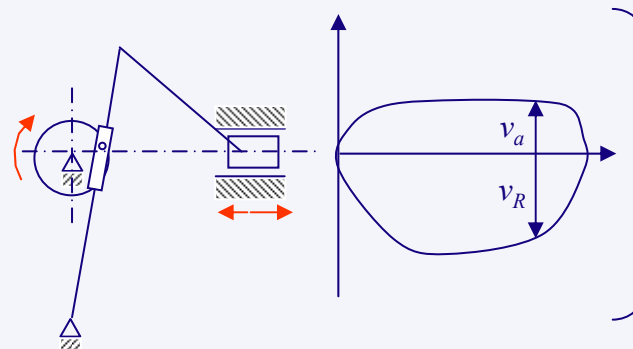
Schubkurbel



Kurbelschwinge

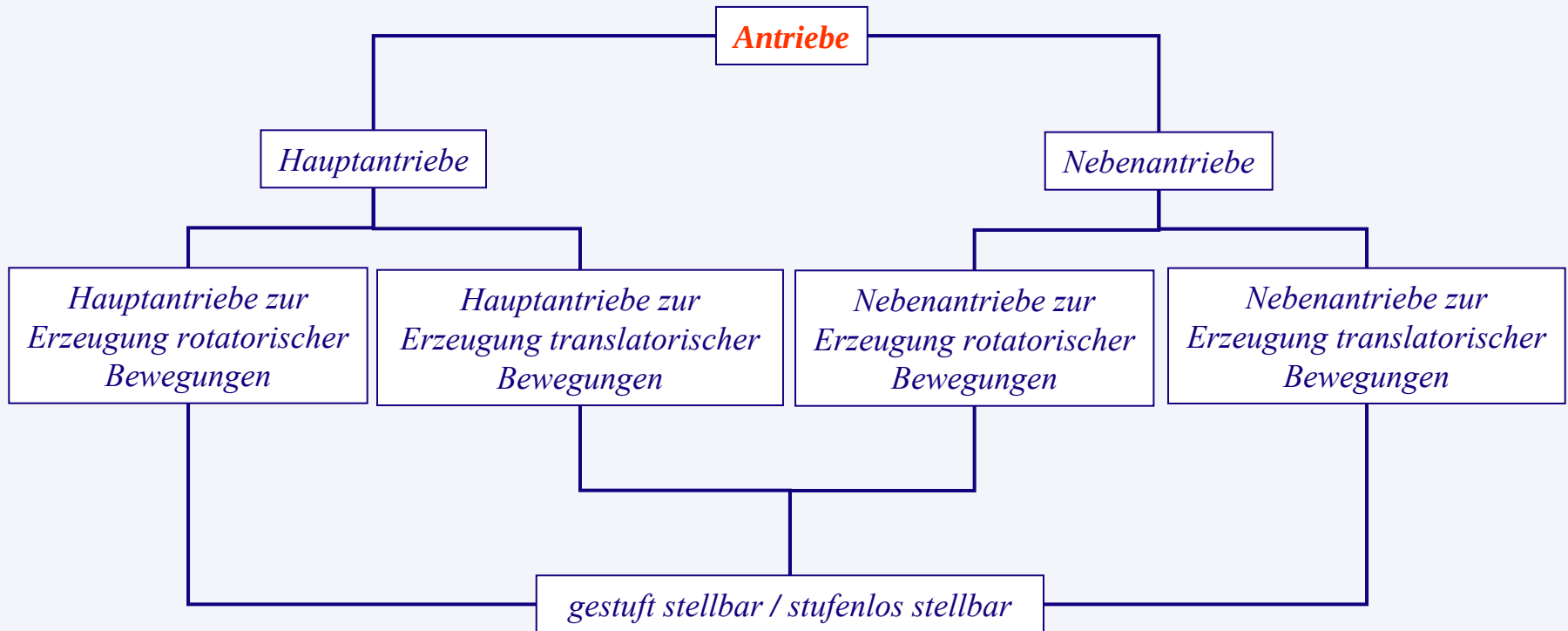


schwingende Kurbelschleife



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

# Antriebe: Übersicht



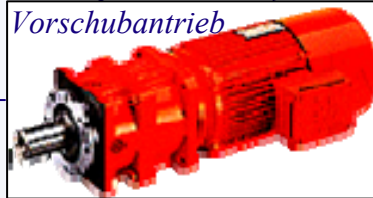
## Nebenantriebe (Vorschubantrieb)

*feinfühlig  
Einstellung  
der Bewegung*

*große Stellbereiche*

*hohe geometrische und  
kinematische Genauigkeit*

Vorschubantrieb



*ruckfreier Geschwindigkeitsverlauf  
(auch bei Schleichgang)*

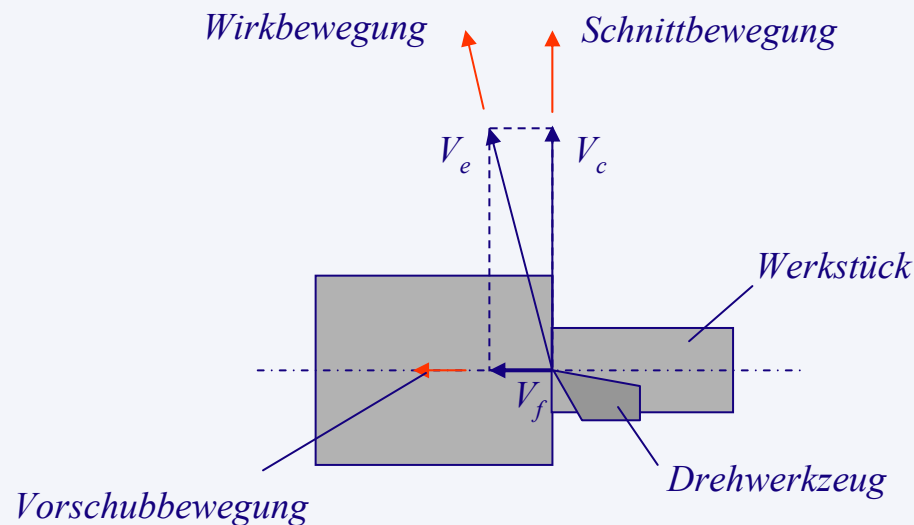
*hohe statische und  
dynamische  
Antriebssteifigkeit*

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

## Nebenantriebe (Vorschubantrieb)

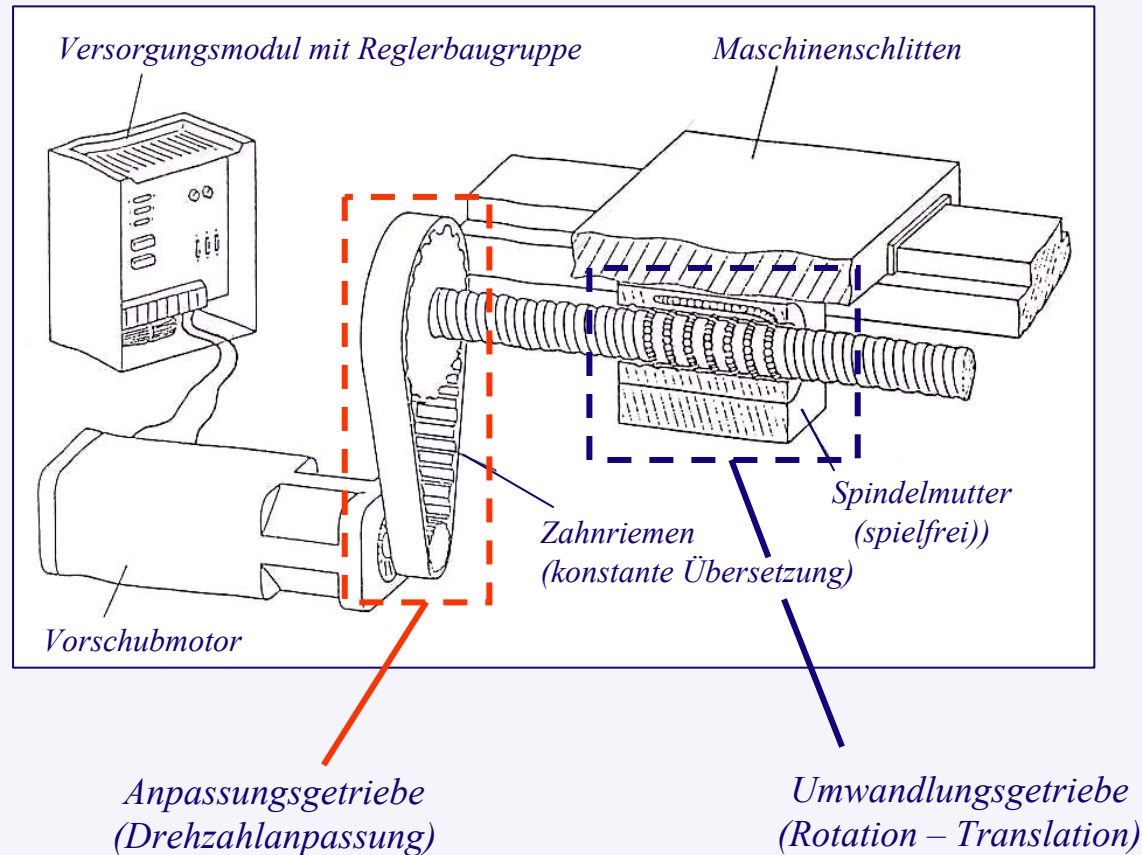
### Definition der Vorschubbewegung nach DIN 6580

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)*

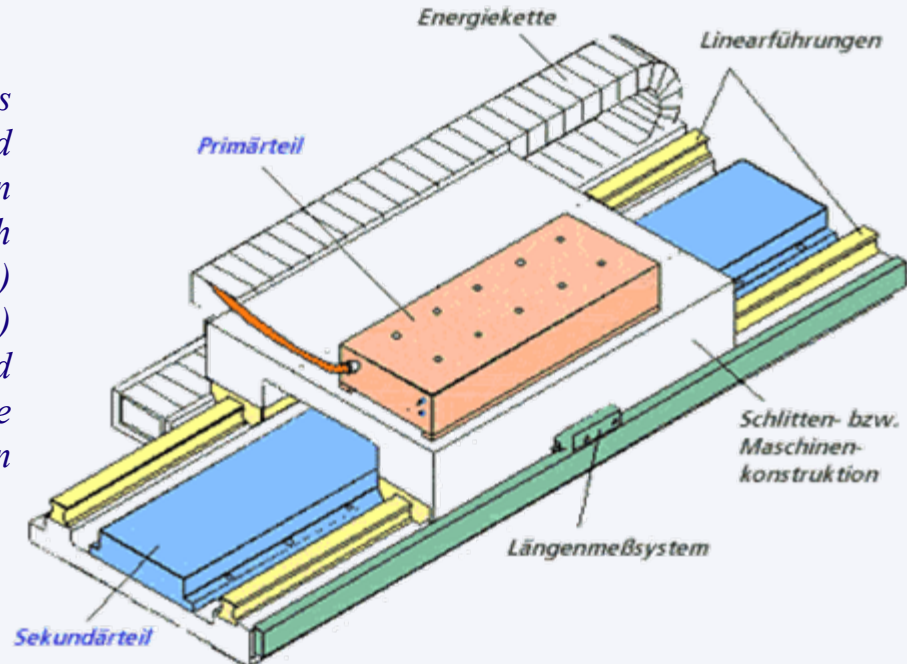


Quelle: FHD

## 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)

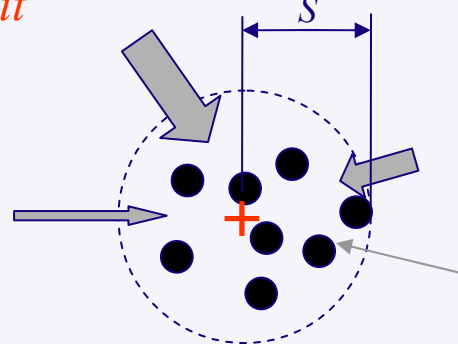
- kein Anpassungsgetriebe
- kein Umwandlungsgetriebe
- hohe Beschleunigungswerte (bis  $450 \text{ m/s}^2$ )
- sehr hohe Verfahrgeschwindigkeiten (bis  $300 \text{ m/s}$ )
- hohe Positioniergenauigkeit

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

Quelle: Rexroth

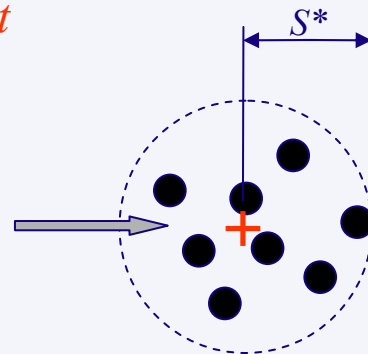
## Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen

### Positioniergenauigkeit



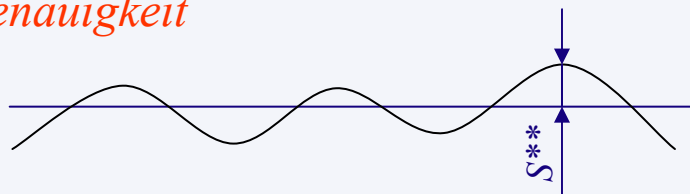
$S$  ist die größte Abweichung der Ist-Position vom programmierten Sollwert bei unterschiedlichen Anfahrtrichtungen und Geschwindigkeiten.

### Wiederholgenauigkeit



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

### Bahngenauigkeit

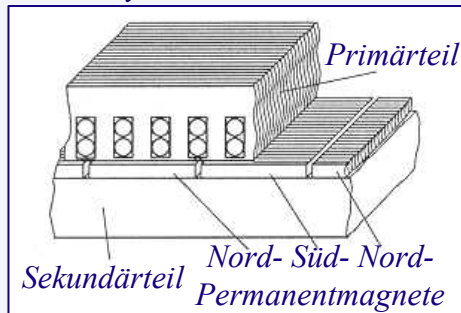


$S^{**}$  ist die größte Abweichung der tatsächlichen Bahn von der programmierten Bahn

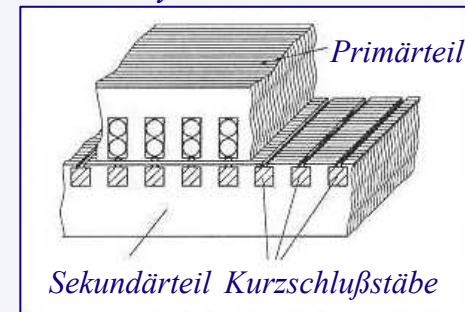
Quelle: FHD

## Nebenantriebe zu Erzeugung translatorischer Bewegungen: Vergleich

*Synchronmotor*



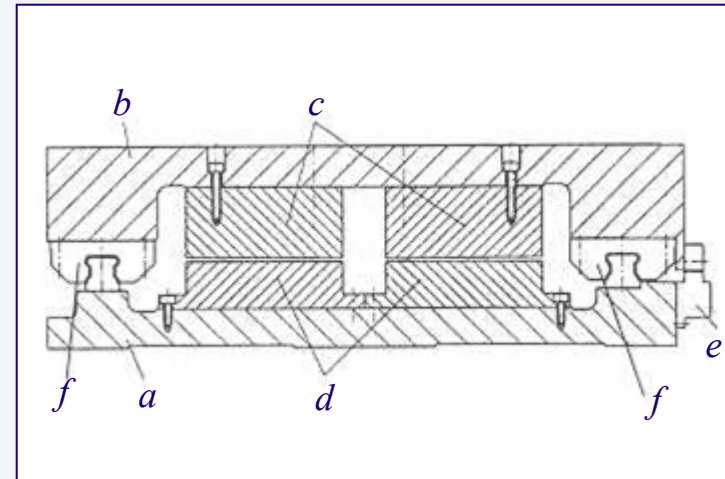
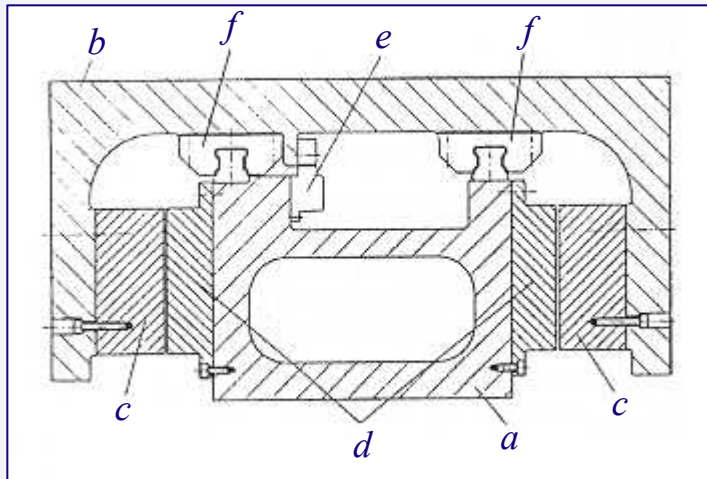
*Asynchronmotor*



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

## 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:

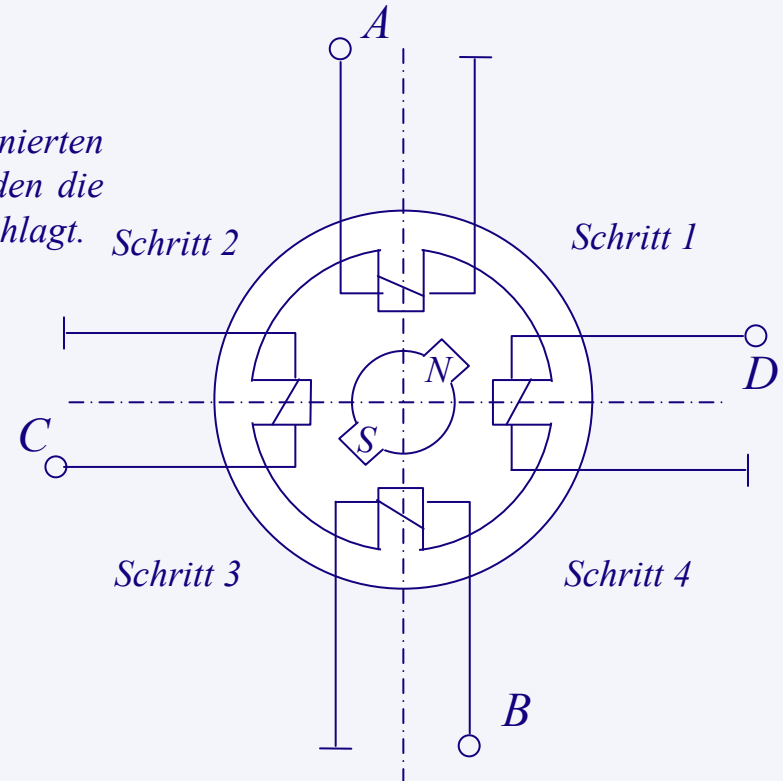
Die Drehung der Motorwelle setzt sich aus genau definierten Winkelschritten zusammen. Zur Drehung der Motorwelle werden die Wicklungen in festgelegter Reihenfolge mit Gleichstrom beaufschlagt.

### 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  $3200 \text{ min}^{-1}$



### 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  $0 \text{ min}^{-1}$  bis ca.  $6000 \text{ min}^{-1}$
- 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)

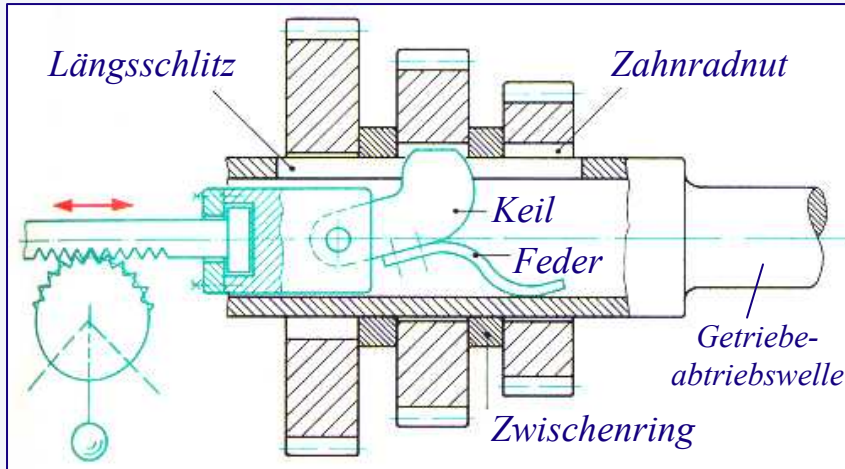
## Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren

### 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 stellbaren Lösungen die Anforderungen kostengünstiger erfüllen*
  - *geringerer Wirkungsgrad*
- *Planetengetriebe zur Erzeugung einer konstanten Übersetzung*

Umwandlungsgetriebe → *siehe Hauptantriebe zur Erzeugung translatorischer Bewegungen*

## Nebenantriebe mit rotatorischen Motoren: Anpassungsgetriebe (Beispiele)



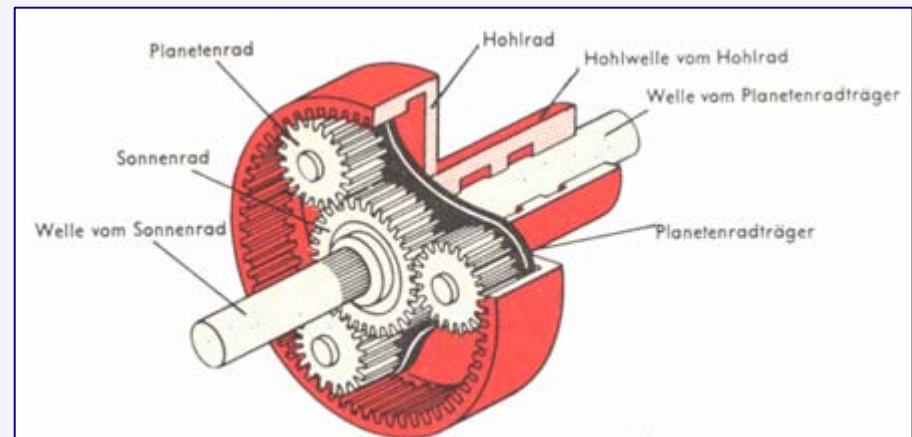
Ziehkeilgetriebe (Quelle: Witte, WZM)

### Funktionsprinzip: Ziehkeilgetriebe

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

### Funktionsprinzip: Planetengetriebe

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



Planetengetriebe

# *Werkzeuge und Schneidstoffe*



## Zerspanwerkzeug

*An jedem Zerspanwerkzeug können folgende drei Teile unterschieden werden:*

### **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.*

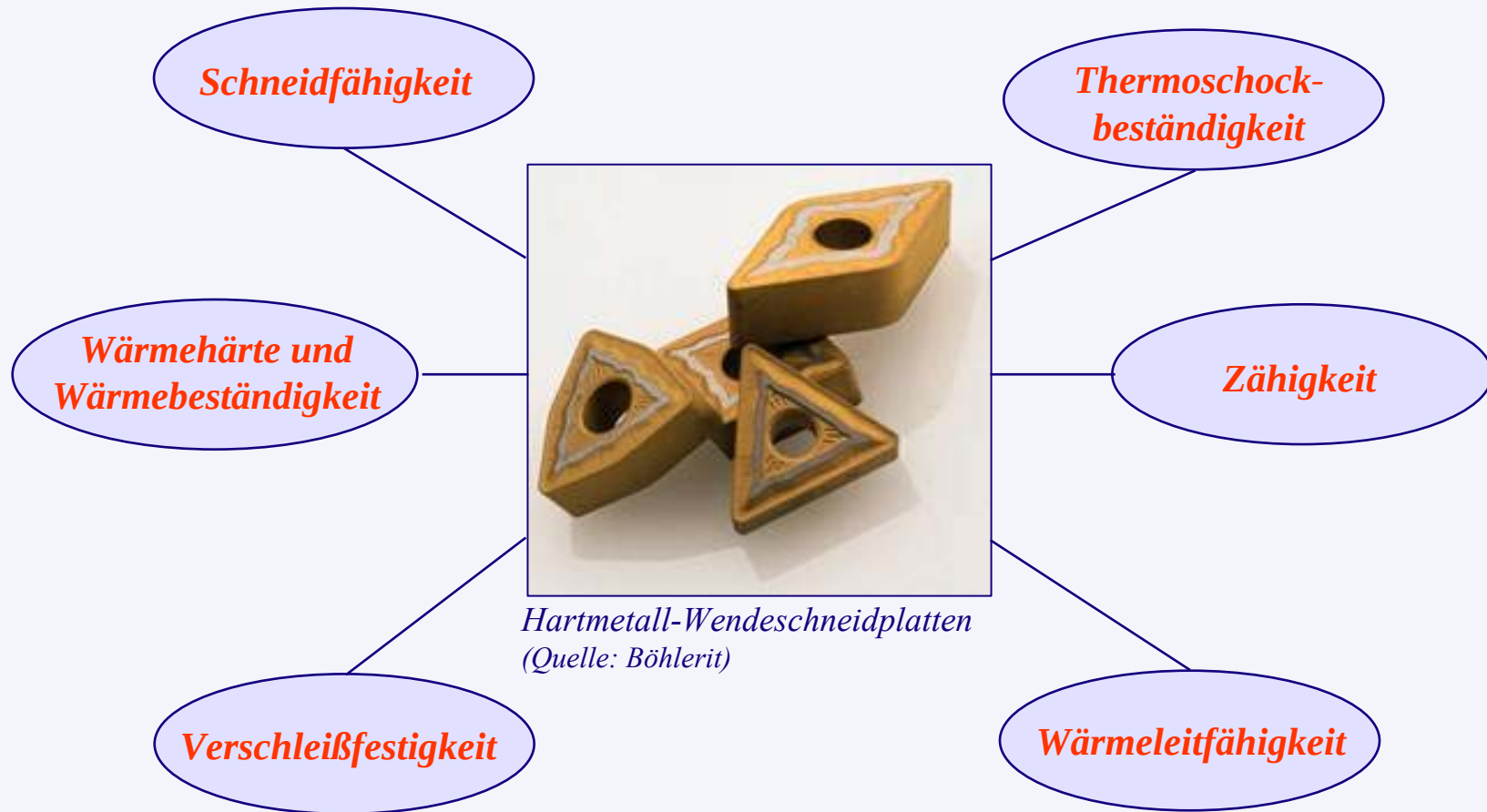
**1.**

### **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.*

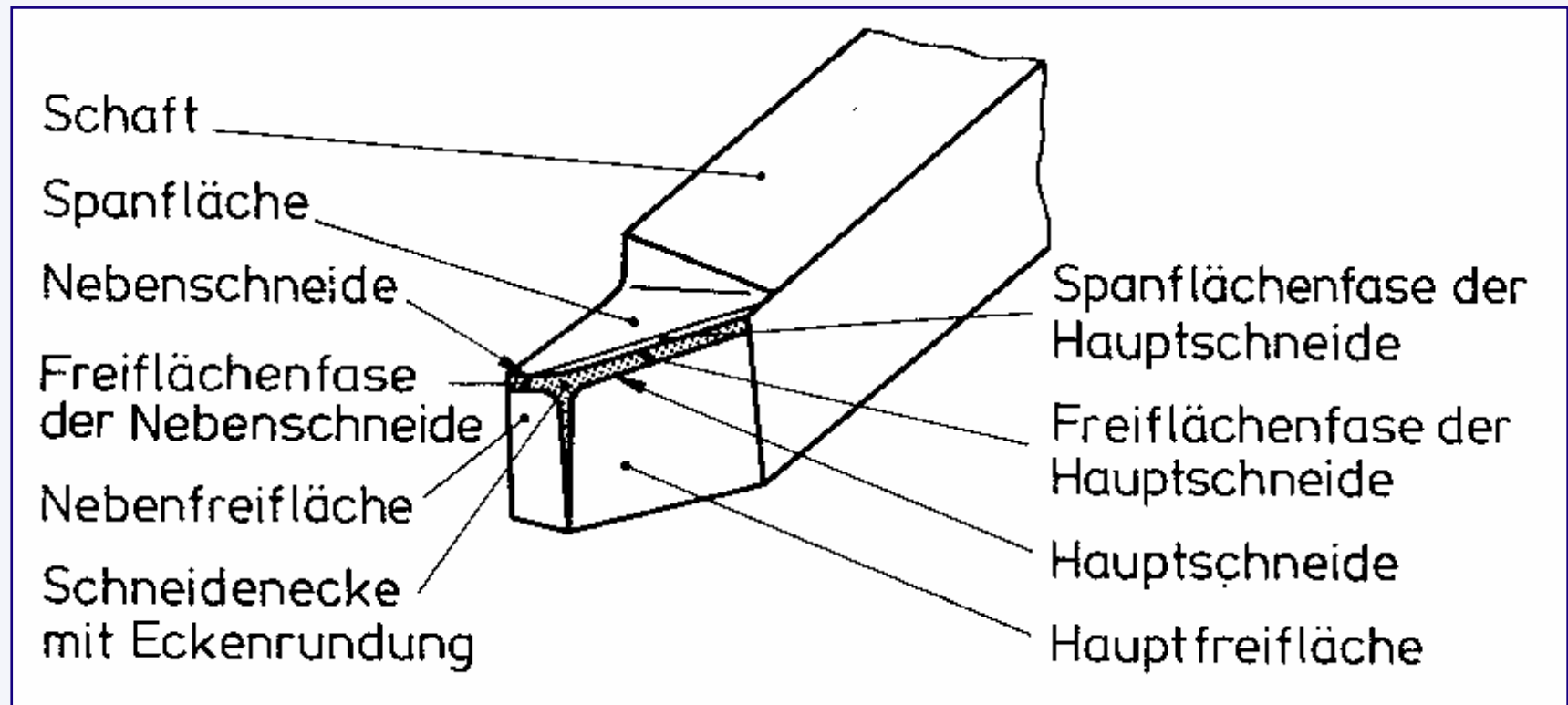
*So ist z.B. die Kenntnis über auftretende Zerspanungskräfte und deren Größe wichtig für*

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

*Die Grundbegriffe der Zerspantechnik werden am Beispiel eines Drehvorganges vorgestellt!*

## Grundbegriffe der Zerspantechnik: Drehmeißel (Beispiel)

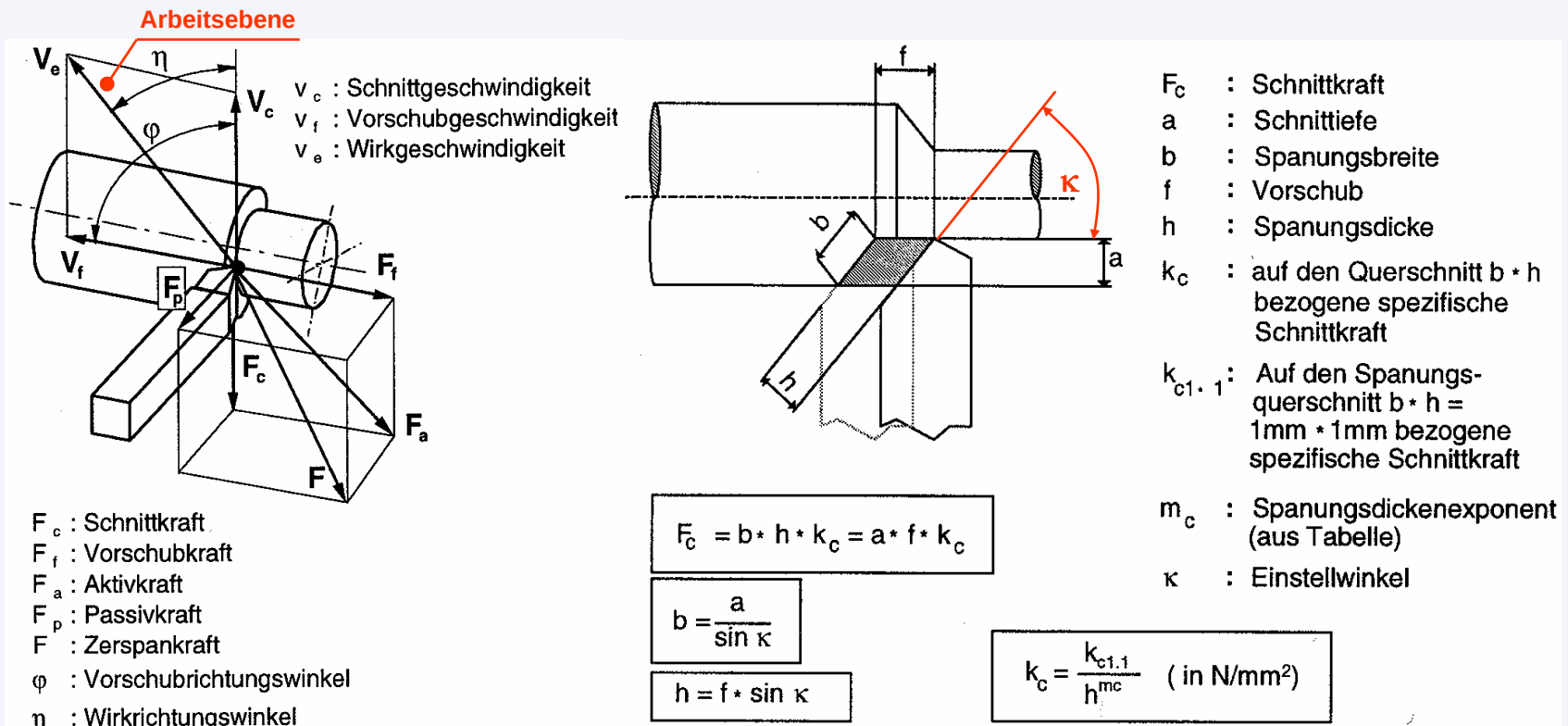
*nach DIN 6581:*



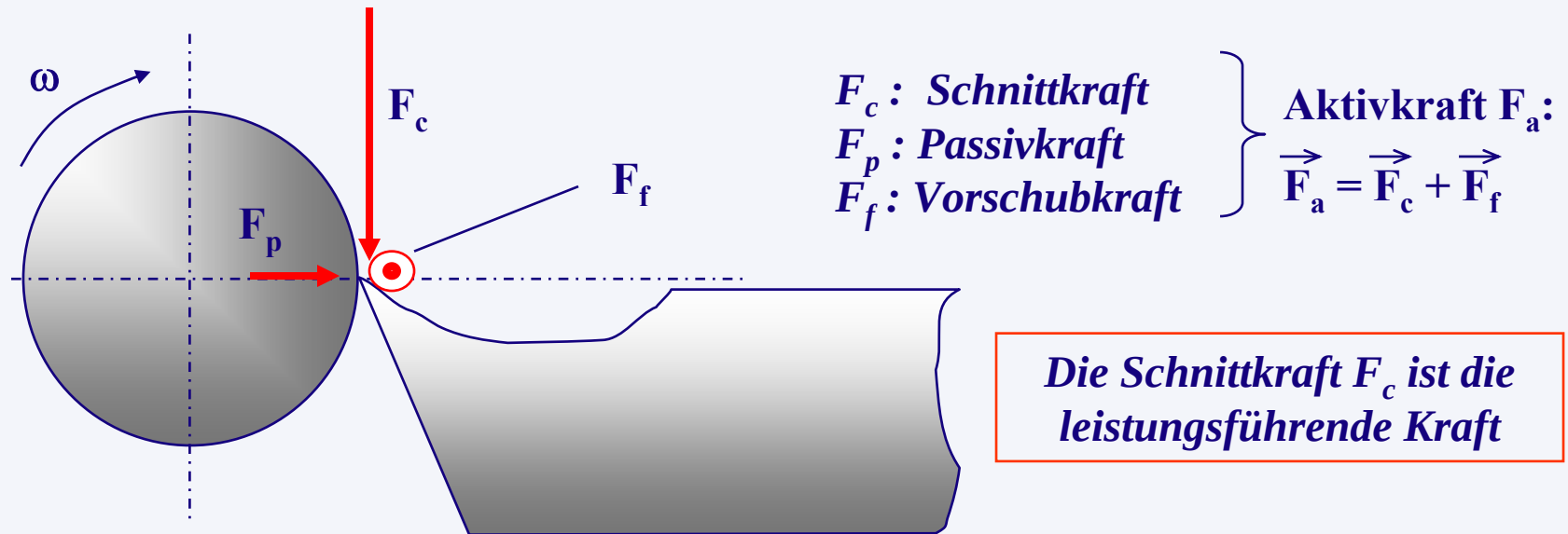
Quelle: Fritz /Schulze: Fertigungstechnik, VDI-Verlag

# 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



# Grundbegriffe der Zerspantechnik: Kräfte am Drehmeißel



## Einflußgrößen der Schnittkraft $F_c$ :

- Werkstoff des Werkstücks
- Vorschub ( Spanungsdicke )
- Schnitttiefe ( 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/mm<sup>2</sup>]

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

**$k_c$**  ist werkstoffabhängig und hauptsächlich abhängig von der Spanungsdicke **h**:

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

**m:** werkstoffabhängig

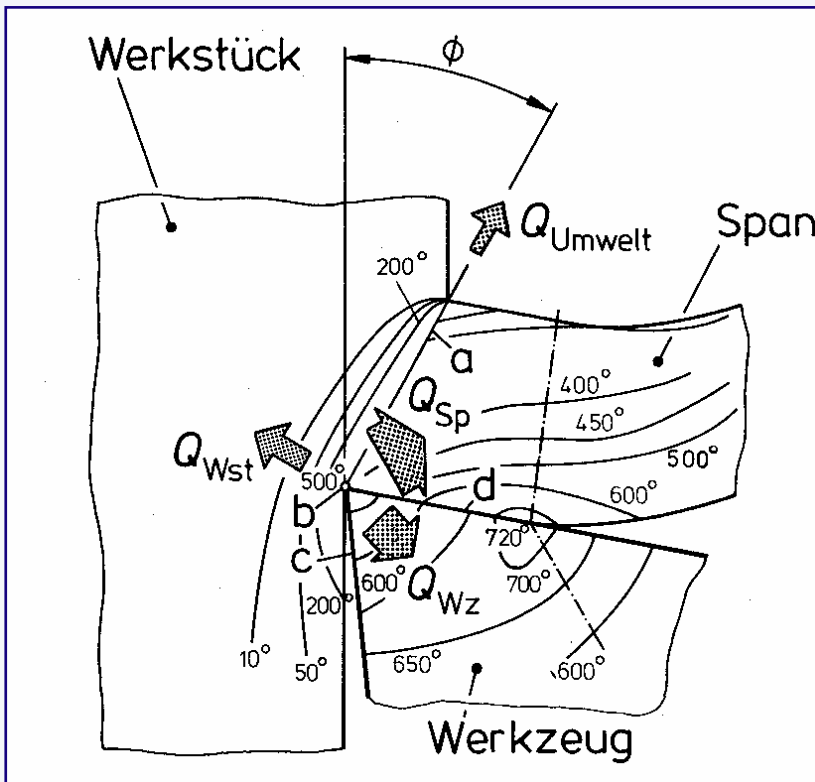
**$k_{c1.1}$ :** spezifische Schnittkraft

bezogen auf einen Querschnitt

mit **b = 1 mm** und **h = 1 mm**

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

# Grundbegriffe der Zerspantechnik: Spanbildung



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

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

Quelle: Fritz / Schulze: Fertigungstechnik, VDI-Verlag

## Grundbegriffe der Zerspantechnik: Drehmoment und Leistung

*spezifische Schnittkraft:*  $k_c = F_c / A$

*Drehmoment:*  $M_d = F_c * r$

*Leistung an der Wirkstelle:  
(Schnittleistung)*

$$\begin{aligned} P_c &= M_d * \omega \\ &= F_c * V_c \\ &= k_c * A * V_c \\ &= k_c * a * f * V_c \end{aligned}$$

*Maschinenleistung*  $P_a = P_c / \eta$

(  $\eta$  = 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  $\mu\text{m}$
- 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  $\text{Si}_3\text{N}_4$*
- *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)*

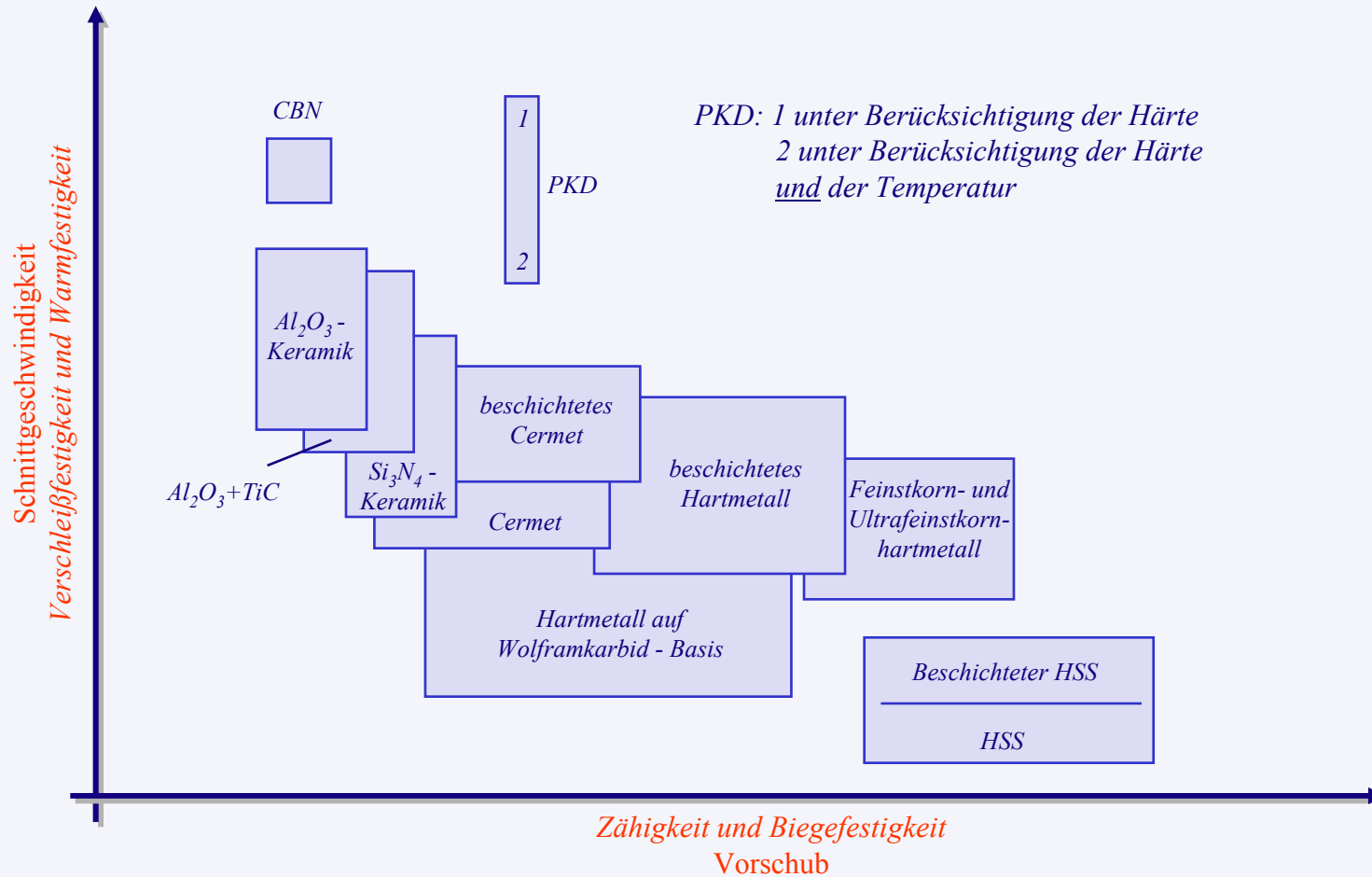
- *kubisch-kristallines Bornitrid (CBN)*

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

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

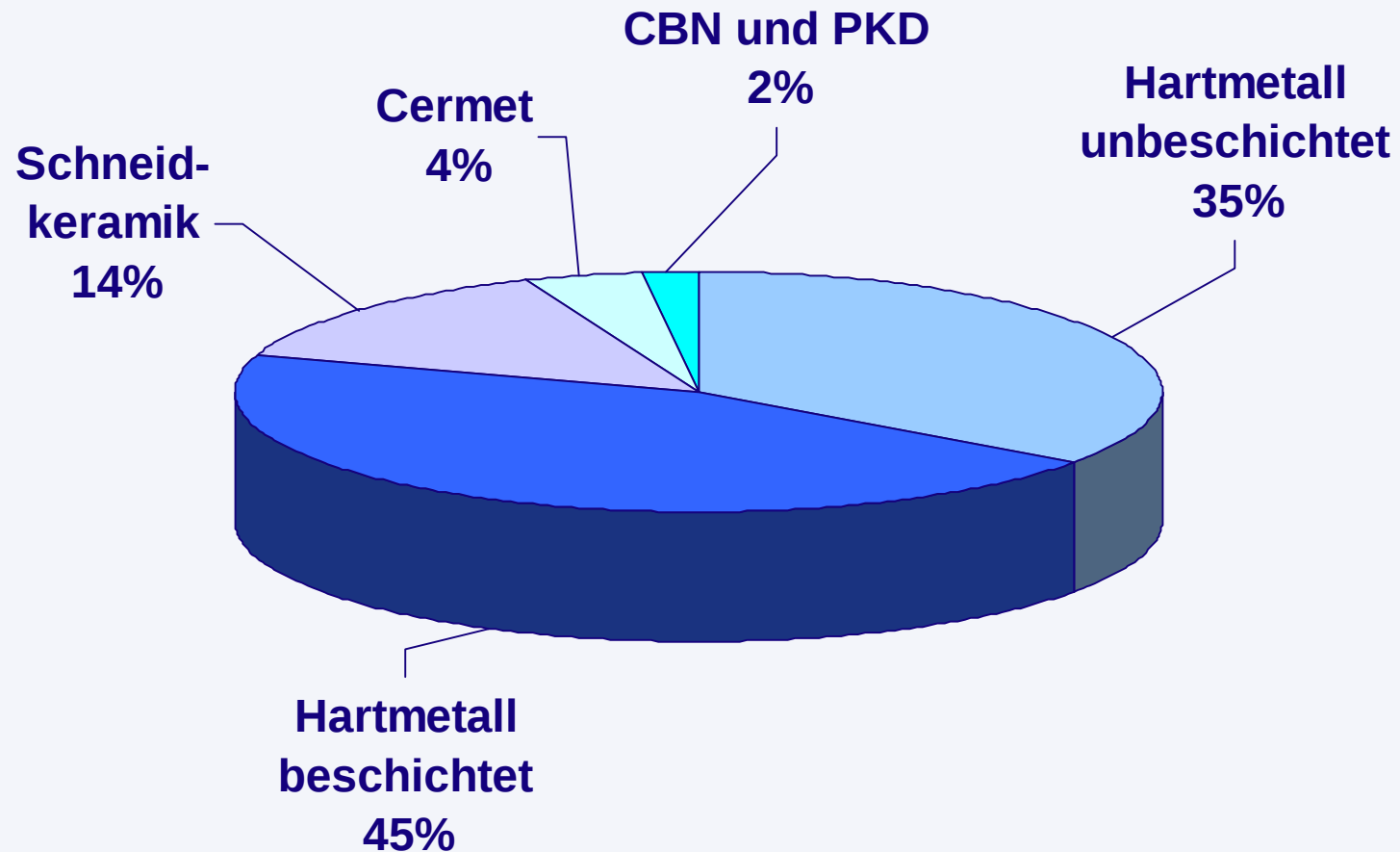
*- Anwendung: CBN eignet sich vor allem bei der Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffe (z.B. gehärtete Stähle, Hartguß). Bei der Zerspaltung von gehärtetem Stahl werden Schnittgeschwindigkeiten von 120 m/min, bei Grauguß bis 800 m/min erreicht.*

# Einteilung der Schneidstoffe



Quelle: König

## Verwendung von Schneidstoffen bei einem Automobilhersteller



Quelle: Koether, Fertigungstechnik

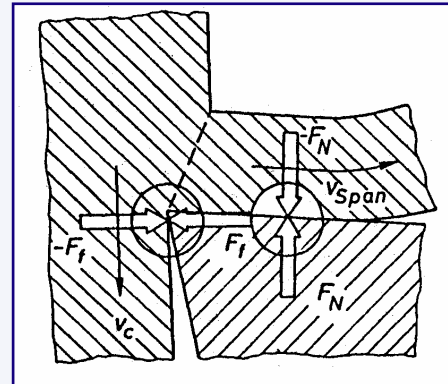
# Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels

## ➔ Reibungverschleiß

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

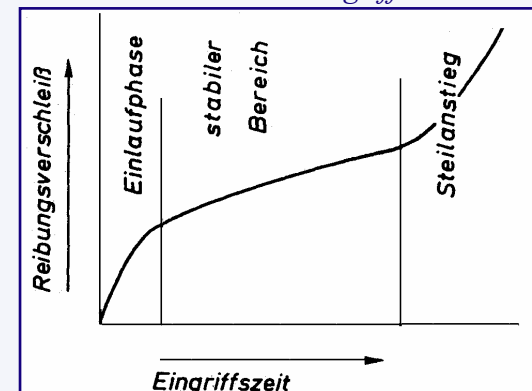
- *Die ungünstige Berührung entsteht an zwei Stellen:*
  1. *auf der Spanfläche, wo der Span unter der Normalkraft  $F_N$  abläuft*
  2. *an den Freiflächen unterhalb der Schneidkante, hier wirken Vorschubkraft  $F_f$ , Passivkraft  $F_p$  und Werkstückgeschwindigkeit  $v_c$  zusammen*
- *Verschleißfördernd 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

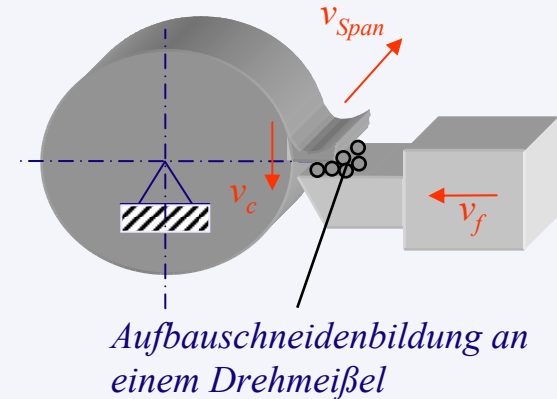


# Verschleißvorgänge am Beispiel eines Drehmeißels

## ➔ 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



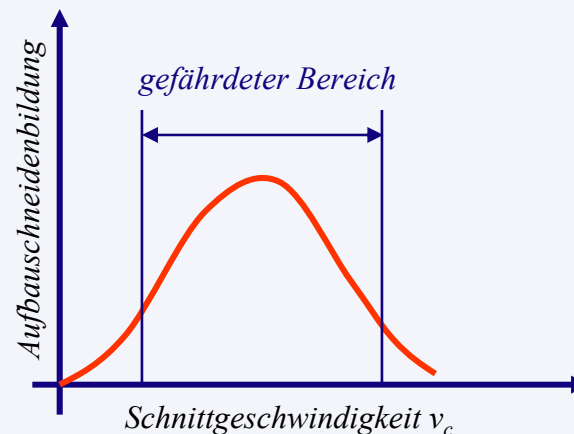
*Die verschlissene Schneidenoberfläche ist rauh aber ohne Riefen!*

- 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:*

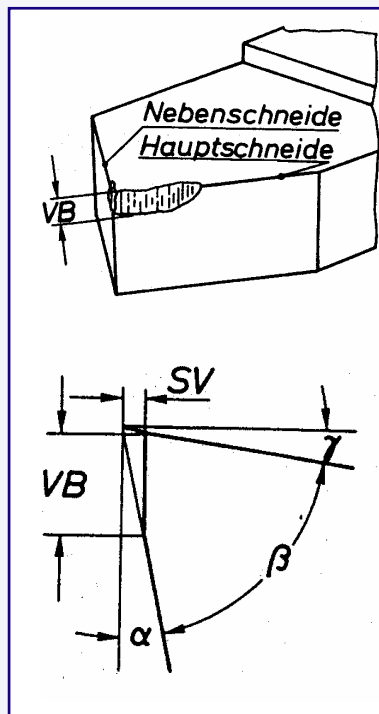
- Kobalt-Diffusion: Kobalt wandert aus der Schneidenoberfläche in den Stahl, dadurch werden die Karbide im Hartmetall freigelegt und der Reibung des Spanes ausgesetzt.*
- Bei kleineren Spangeschwindigkeiten kann der Werkstoff Stahl derart auf die Karbide einwirken, dass diese sich auflösen und vom Span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

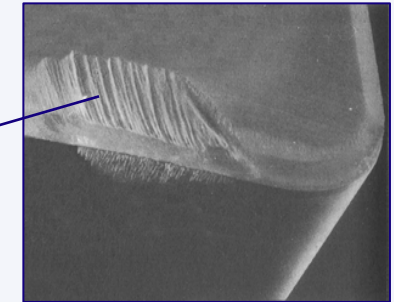
Ursache für den Kolkverschleiß ist das Zusammenwirken von Reibung und Diffusion. Er verändert wie eine Änderung des Spanwinkels  $\gamma$  die Spanablaufrichtung und somit den Scherwinkel  $\Phi$ .

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.

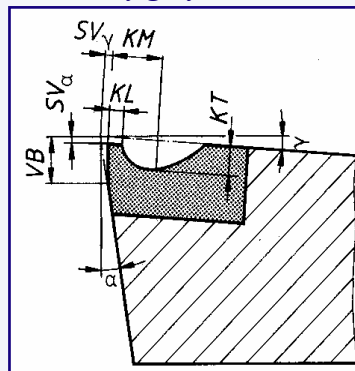
REM-Aufnahme einer  
Wendeschneidplatte



Kolkverschleiß

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

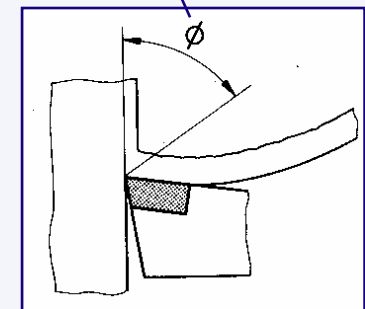
Verschleißgrößen am Schneidteil eines Drehmeißels



|             |                                                       |
|-------------|-------------------------------------------------------|
| $\gamma$    | Spanwinkel                                            |
| $\alpha$    | Freiwinkel                                            |
| $SV_a$      | Schneidenversatz, in Richtung der Freifläche gemessen |
| $SV_\gamma$ | Schneidenversatz, in Richtung der Spanfläche gemessen |
| $VB$        | Verschleißmarkenbreite an der Freifläche              |
| $KM$        | Kolkmittenabstand                                     |
| $KT$        | Kolktiefe                                             |
| $KL$        | Kolkklippenbreite                                     |

Quelle: Fritz / Schulze:  
Fertigungstechnik, VDI-Verlag

Scherwinkel  $\Phi$

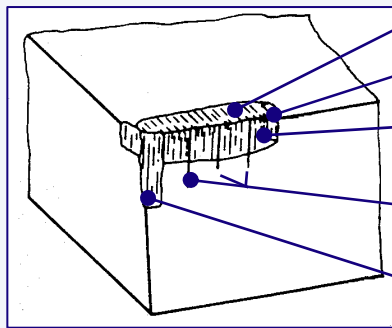


Quelle: Fritz / Schulze:  
Fertigungstechnik, VDI-Verlag

## Verschleißformen am Beispiel eines Drehmeißels

### ➔ weitere Verschleißformen

Verschiedene Verschleißformen  
an einer Drehmeißelschneide



Spanflächenverschleiß

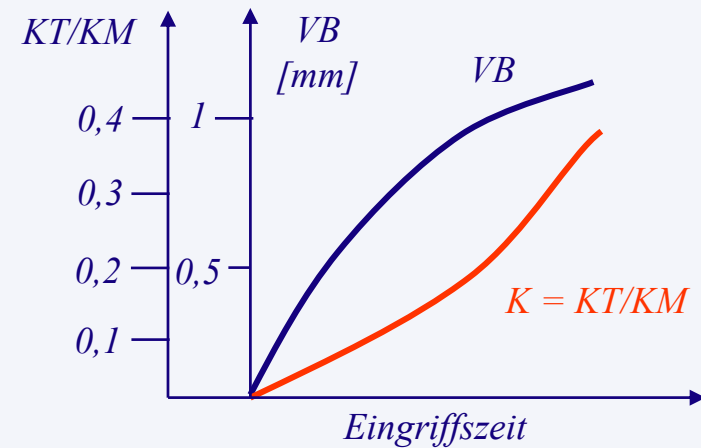
Kantenabrundung

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

### Ziele

Qualität erhöhen

**Fertigungssystem  
Werkzeugmaschine**

Mengenleistung  
erhöhen

Fertigungskosten  
senken

### Wege



Flexibilität erhöhen



Flexible Fertigungssysteme



Geschwindigkeiten  
erhöhen



High Speed Cutting  
(HSC)



Genauigkeiten  
erhöhen



Ultra- und Hoch-  
präzisionsbearbeitung



Werkstoffspektrum erweitern



Hartbearbeitung



Ressourcenverbrauch  
minimieren



Trockenbearbeitung,  
Mikrobearbeitung

## Flexibilität erhöhen: Flexible Fertigungssysteme (FFS)

### *Was ist ein Flexibles Fertigungssystem?*

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

*Das flexible Fertigungssystem läßt sich in drei Komponenten untergliedern:*

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

### *Ziel eines flexiblen Fertigungssystems?*

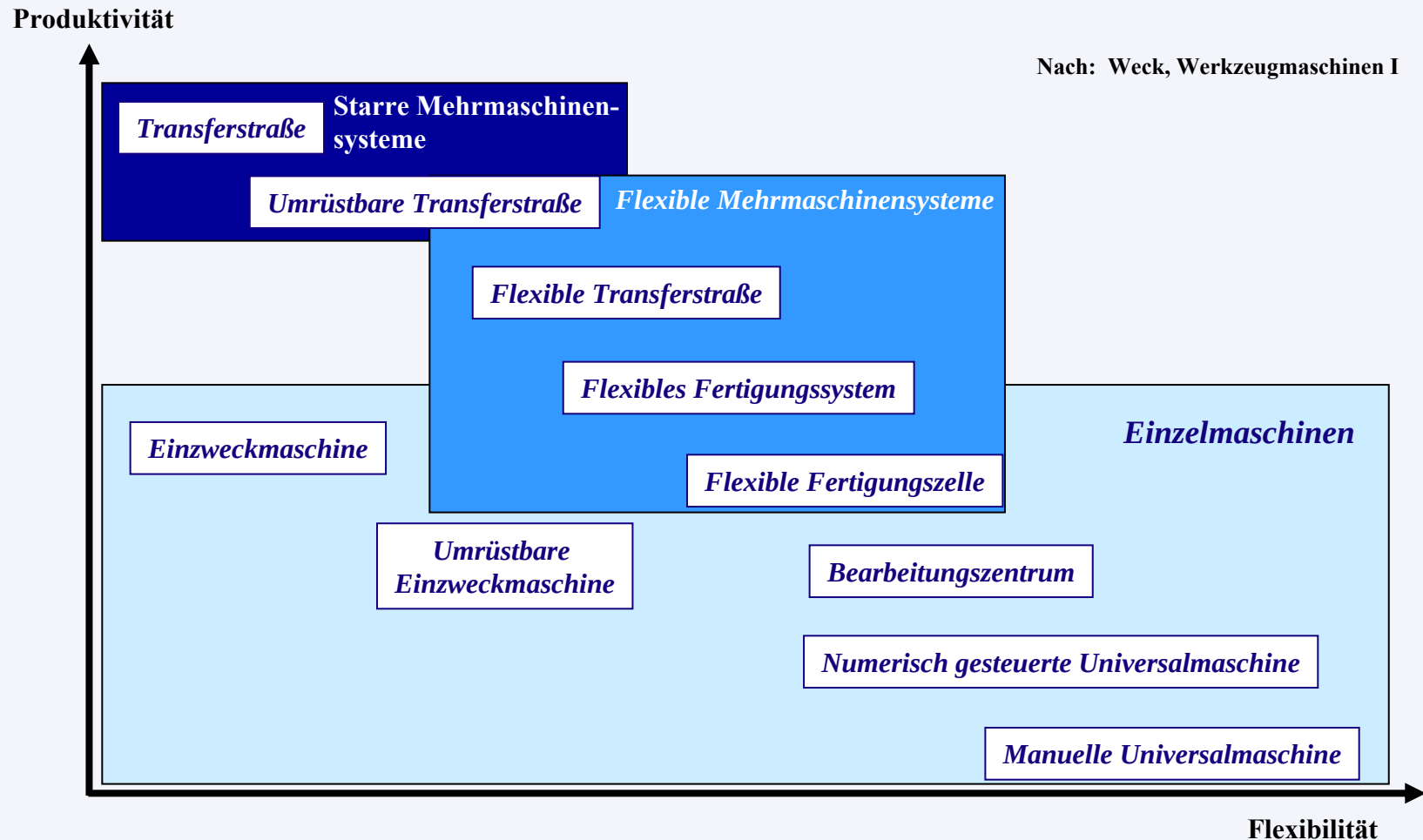
*Bei der Umsetzung eines flexiblen Fertigungssystems werden die konträren Ziele*

- hohe Flexibilität*
- bei relativ hoher Produktivität*

*verfolgt.*

## Flexibilität erhöhen: Flexible Fertigungssysteme (FFS)

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*



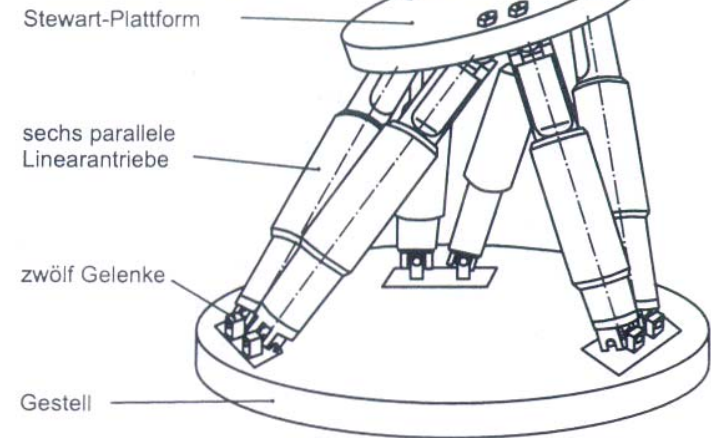
*Quelle: AXA-Maschinenbau*

## 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

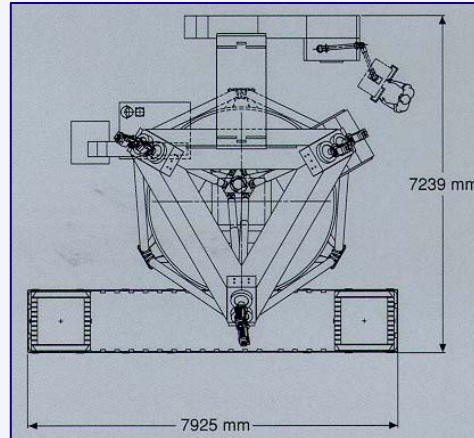
#### Nachteile:

- 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

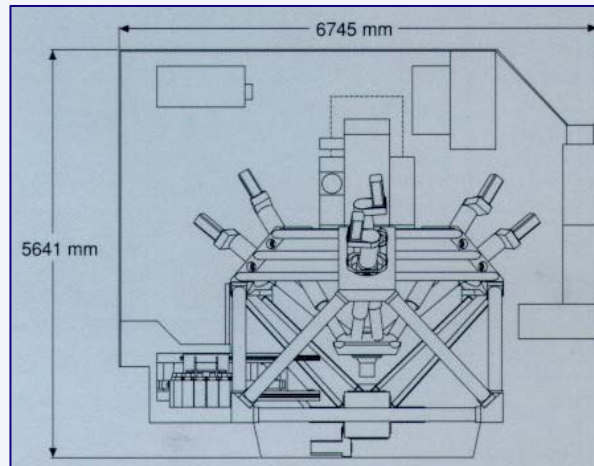
## Geschwindigkeiten erhöhen: High Speed Cutting -Bearbeitung

*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

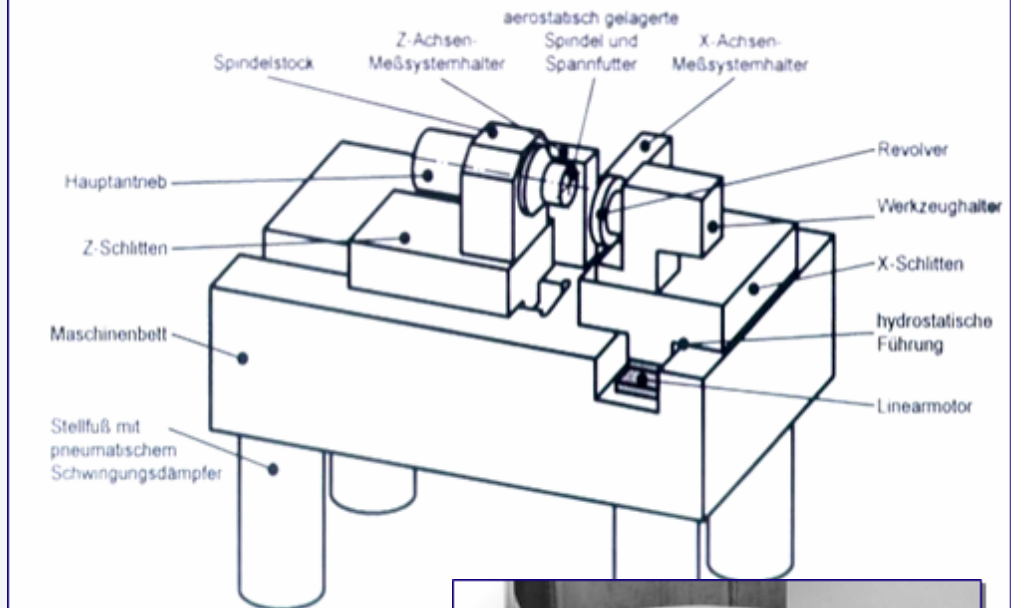
- höhere thermische Stabilität,
- luftgelagerte Führungselemente (verschleißfrei) und
- einem Laserinterferometer-Wegmeßsystem in Verbindung mit einer hochauflösenden Steuerung.

# 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*

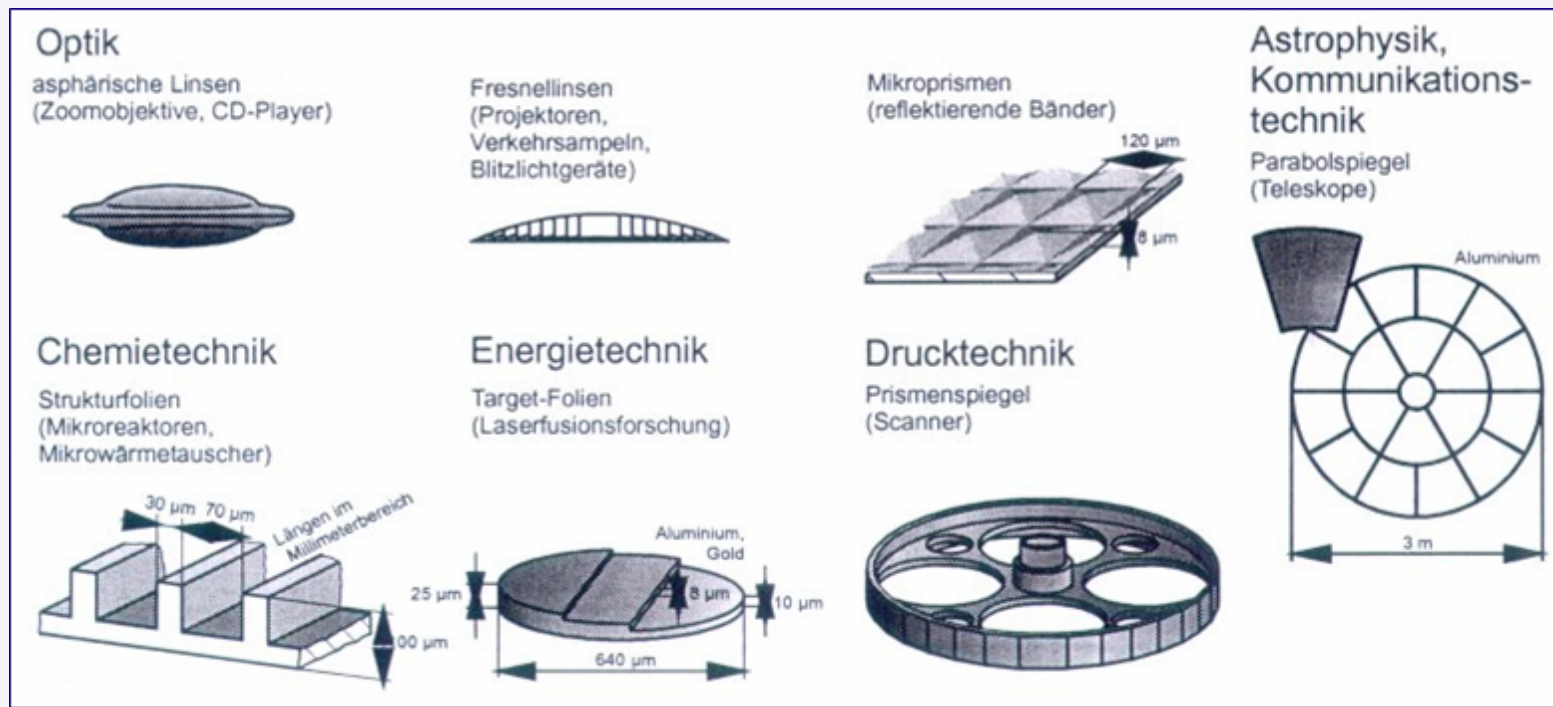
### *Nachteile:*

- *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

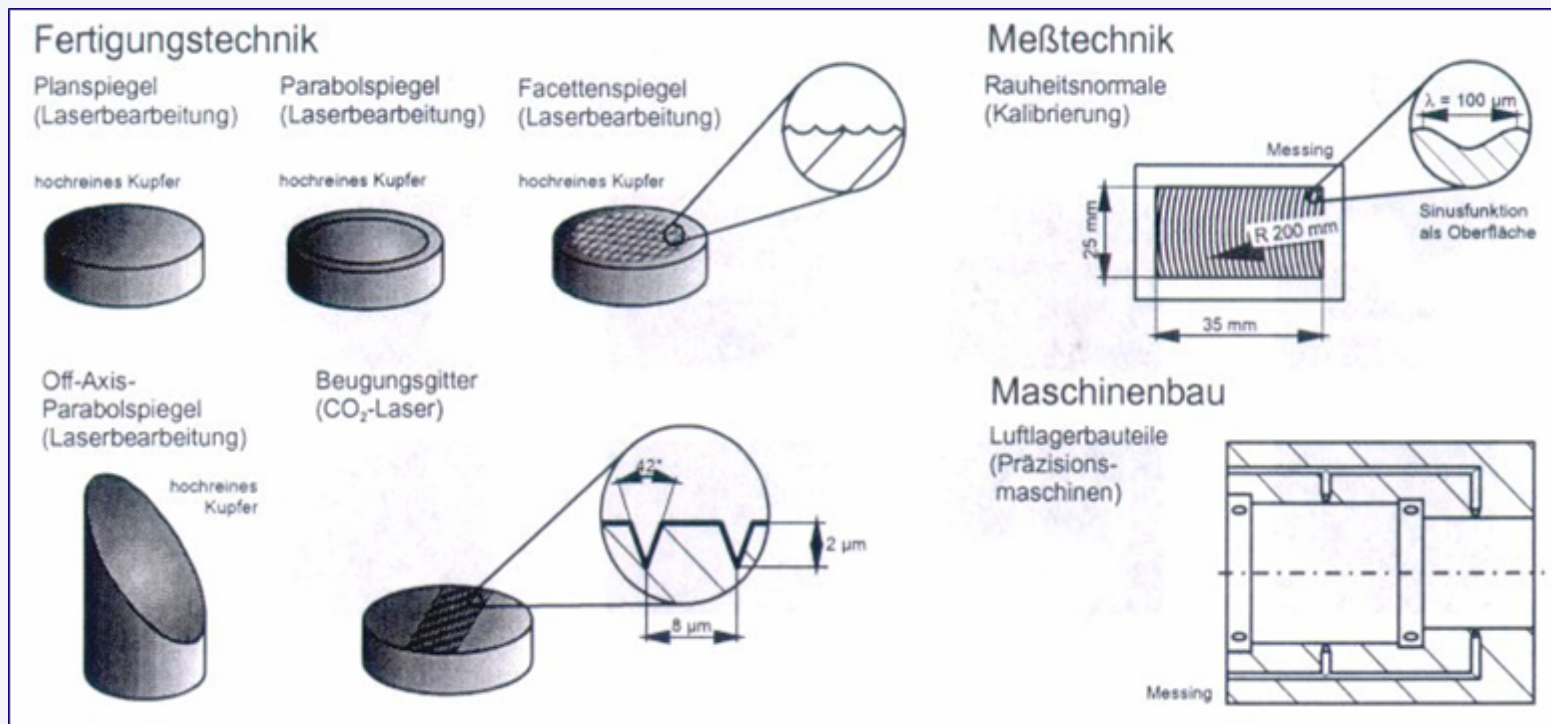
## Ultrapräzisionsbearbeitung: Anwendungsbeispiele



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

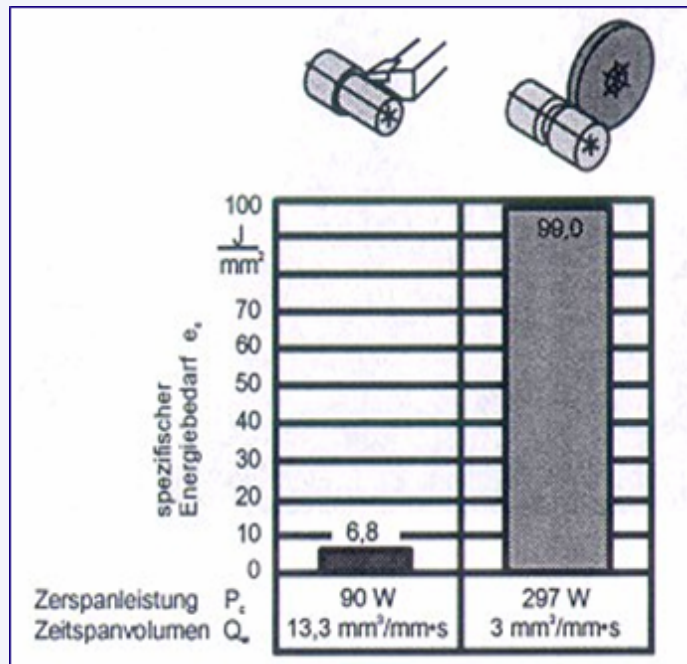
# Werkstoffspektrum erweitern: z.B. Hochpräzisions-Hartdrehen

*Vorteile des Hochpräzisions-Hartdrehen gegenüber dem Feinschleifen*

Verringerung des Energiebedarfs

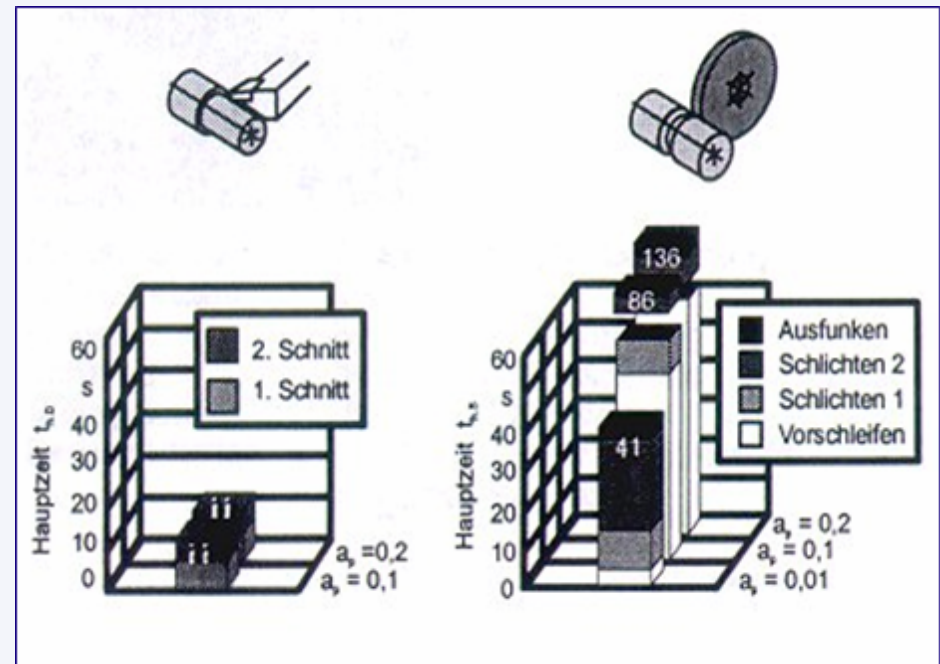
Verkürzung der Hauptzeit

Hochpräzisions-  
Hartdrehen      Feinschleifen mit  
Korundscheibe



Hochpräzisions-  
Hartdrehen

Feinschleifen mit  
Korundscheibe



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

### *Anwendungsbeispiele*



*Getriebebauteile  
(Wellen, Zahnräder)*



*Werkzeuge  
(Hülsen, Stempel,  
Preßformen)*



*Lagerbauteile  
(Wälzlagererringe)*



*Hydraulikbauteile  
(Kolben, Ventile)*

## Ressourcenverbrauch minimieren: Trockenbearbeitung

### *Trockenbearbeitung was ist das?*

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

### *Warum Trockenbearbeitung?*

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

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

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

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



*Zerspanprozeß mit  
Kühlschmierstoff (Quelle: IWU)*

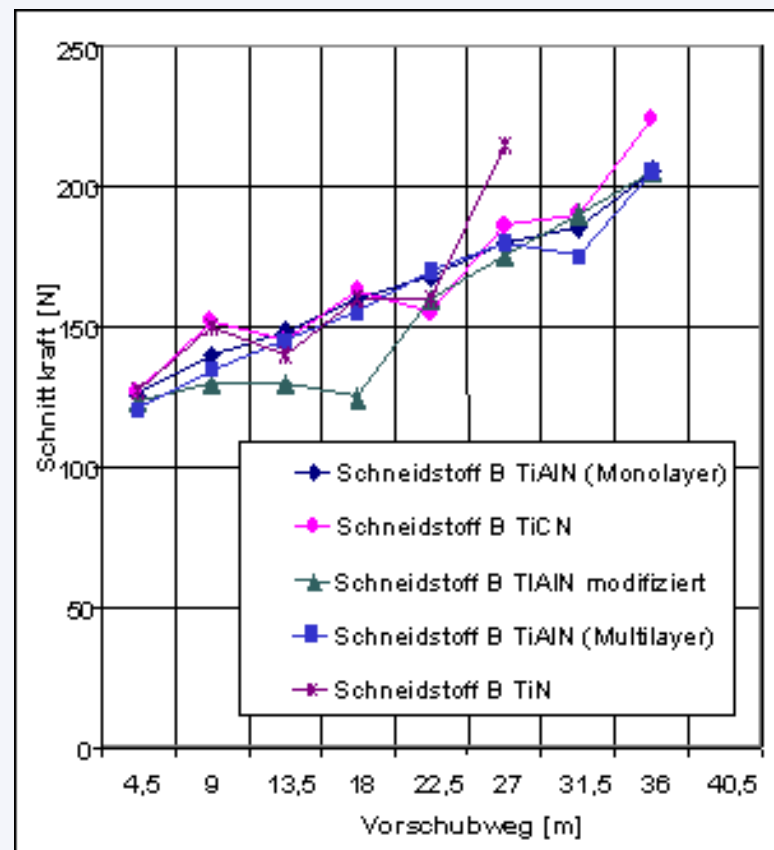


*Zerspanprozeß ohne  
Kühlschmierstoff (Quelle: IWU)*

## 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!*



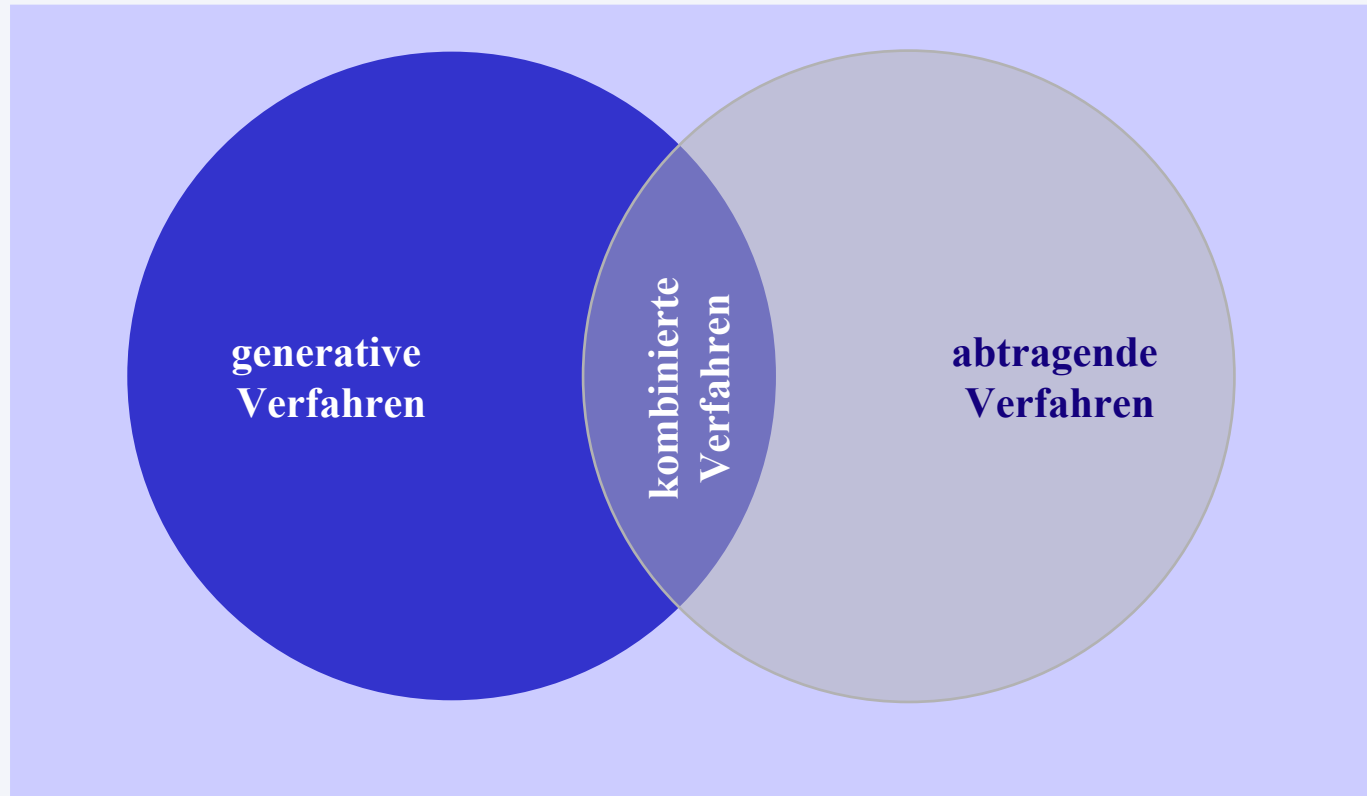
Quelle: IWU, Fraunhofer

# *Werkzeugmaschinen für generative Fertigungsverfahren*



## Verfahren: Einteilung

### Klassen von Rapid Prototyping - Verfahren

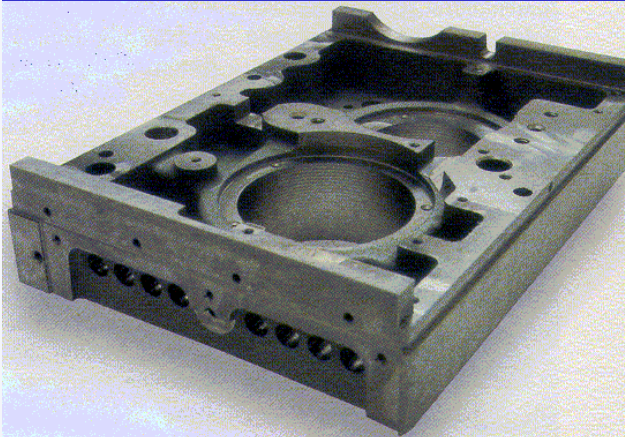


**Rapid Prototyping - Verfahren**

## Verfahren: Einteilung

### Abtragende und generative Verfahren

#### *abtragende Fertigungsverfahren*

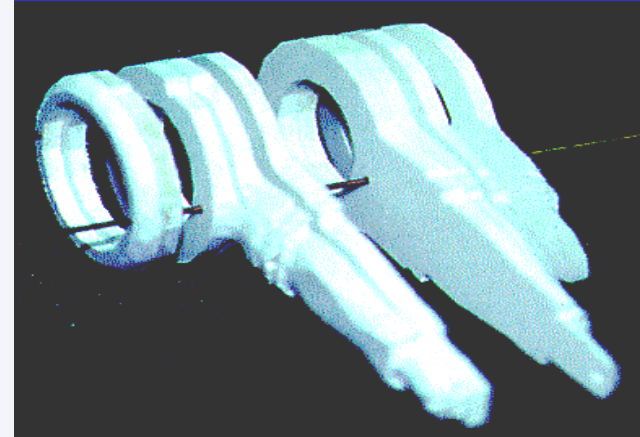


Quelle: Hermle AG

Formgebung durch Materialabtrag  
(konventionelle Verfahren)

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

#### *generative Fertigungsverfahren*

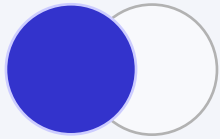


Quelle: Charlyrobot

Formgebung durch  
Aneinanderfügen bzw. Aufbau von  
Körperschichten

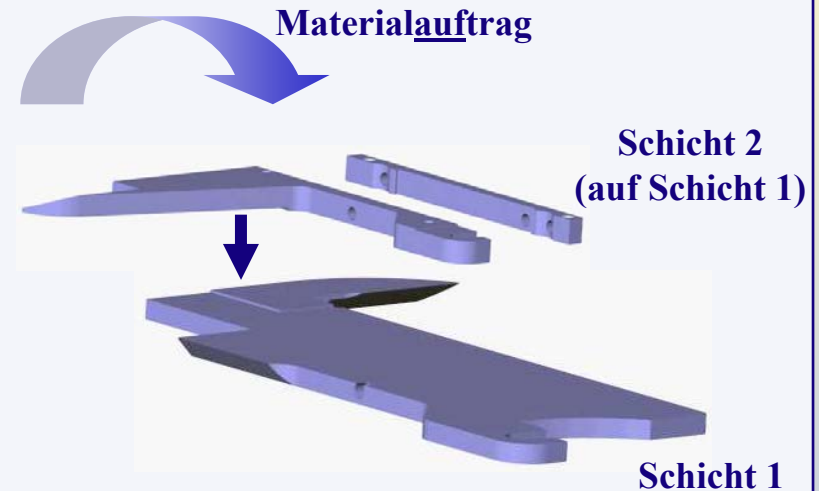
- Verfahren:
- Stereolithographie
  - Selektives Laser-Sintern
  - Laminated Object Manufacturing
  - Fused Deposition Modelling
  - Laser-Auftragsschweißen

## Verfahren: Einteilung



### Generative Rapid Prototyping - Verfahren

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

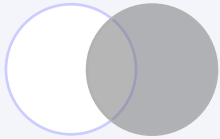


#### Beispiele:

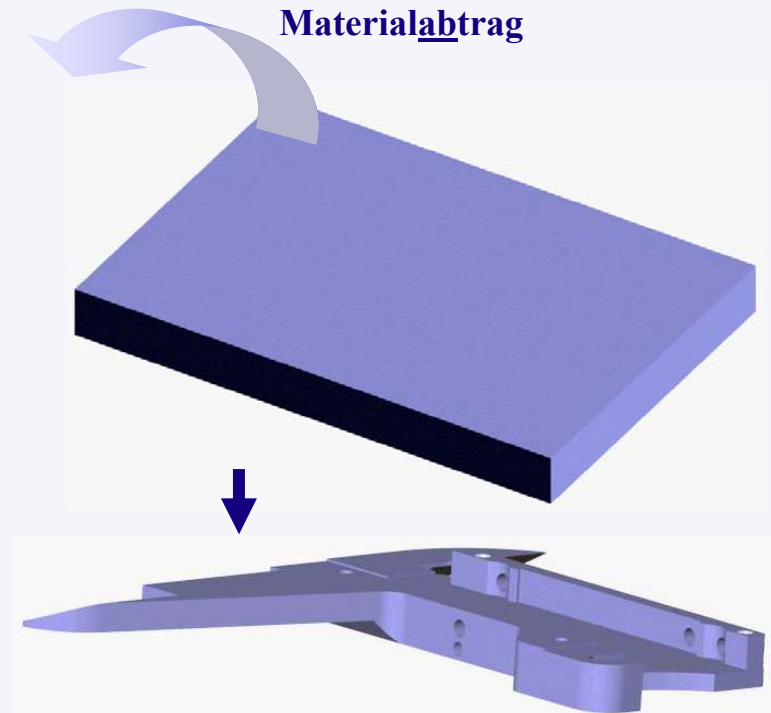
- Sintern
- Laminieren und Ausschneiden
- Aushärten flüssiger Werkstoffe
- ...

## Verfahren: Einteilung

### Abtragende Rapid Prototyping - Verfahren



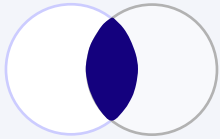
- **Materialabtrag:**  
Prototyp wird mittels Entfernen von Material hergestellt
- Schichtorientierung nicht zwingend



#### 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

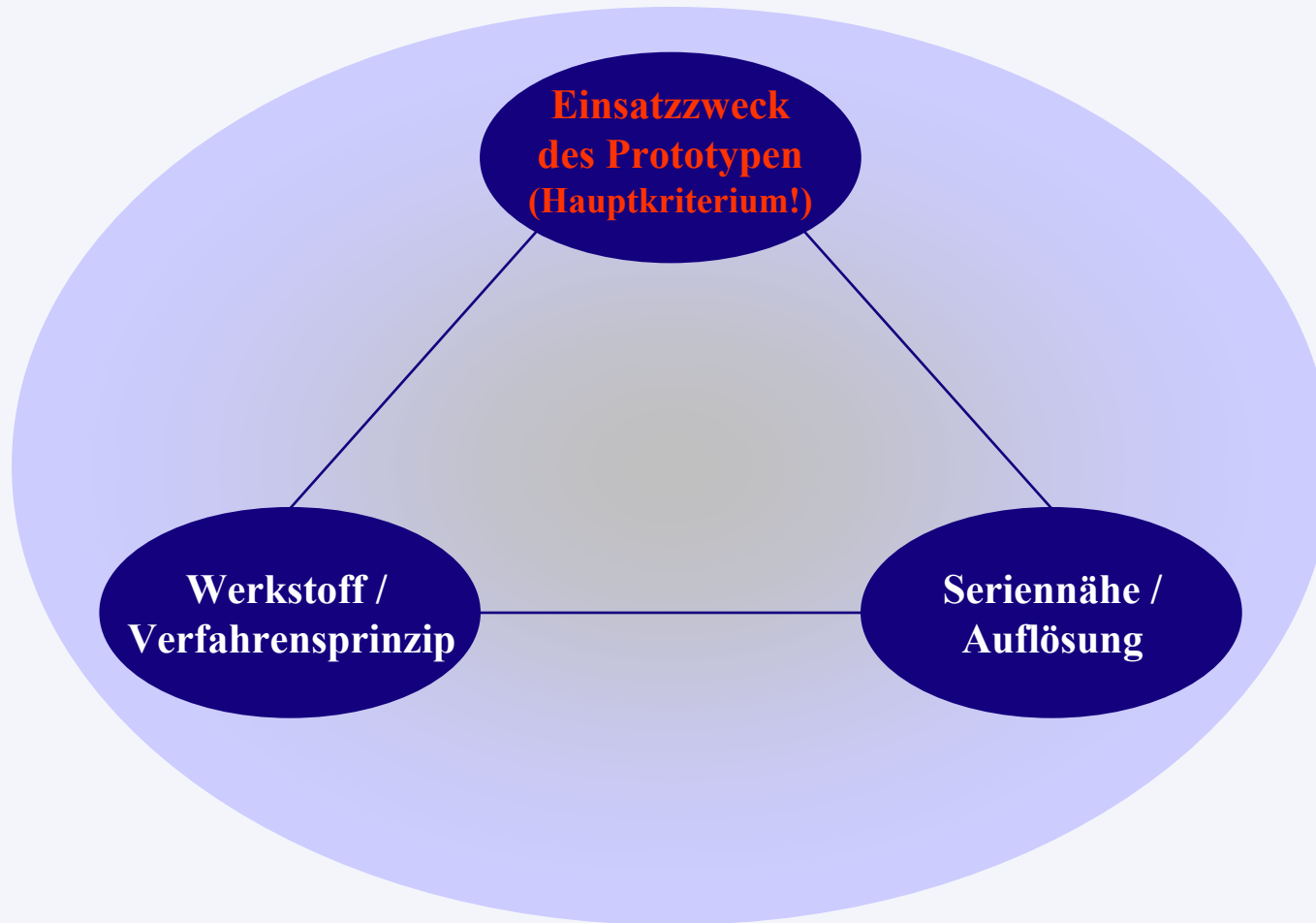


### Beispiele:

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

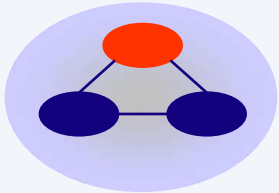
## Verfahren: Einteilung

### 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
- ...

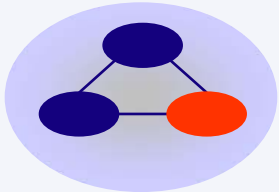
**interne Nutzung**

**externe Nutzung (Kunde / Messe etc.)**

**Folgeverfahren**

...

## Verfahren: Einteilung



### Seriennähe und Auflösung des Verfahrens

#### Seriennähe

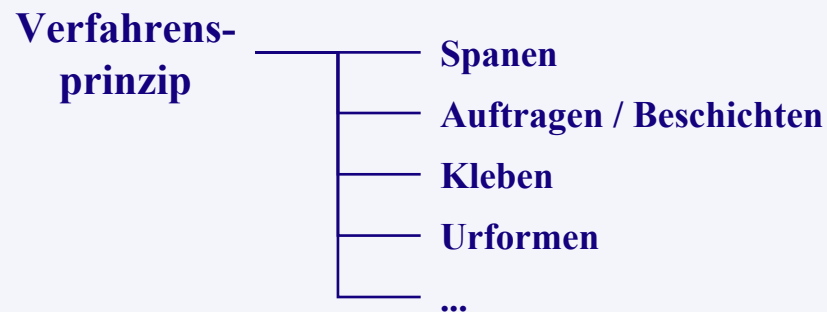
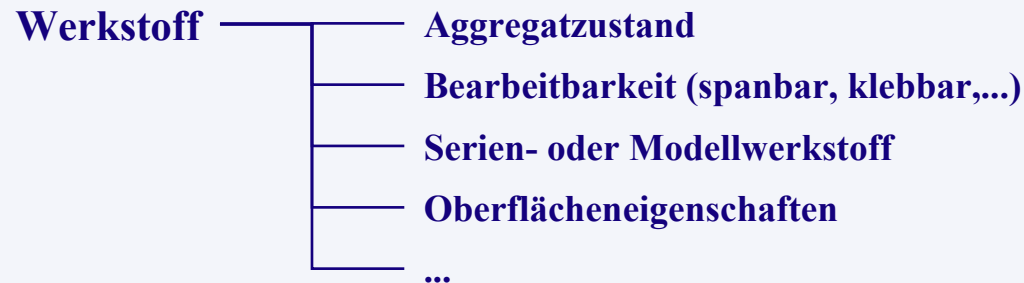
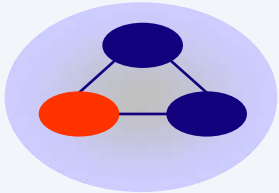
- eher Modellcharakter (noch weit von der Serie entfernt)
- z.T. nicht sehr weit ausgearbeitet, sondern eher Prinzipdarstellungen
- eher Prototypcharakter (seriennah)
- Ausarbeitungsgrad stark vorangeschritten

#### 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

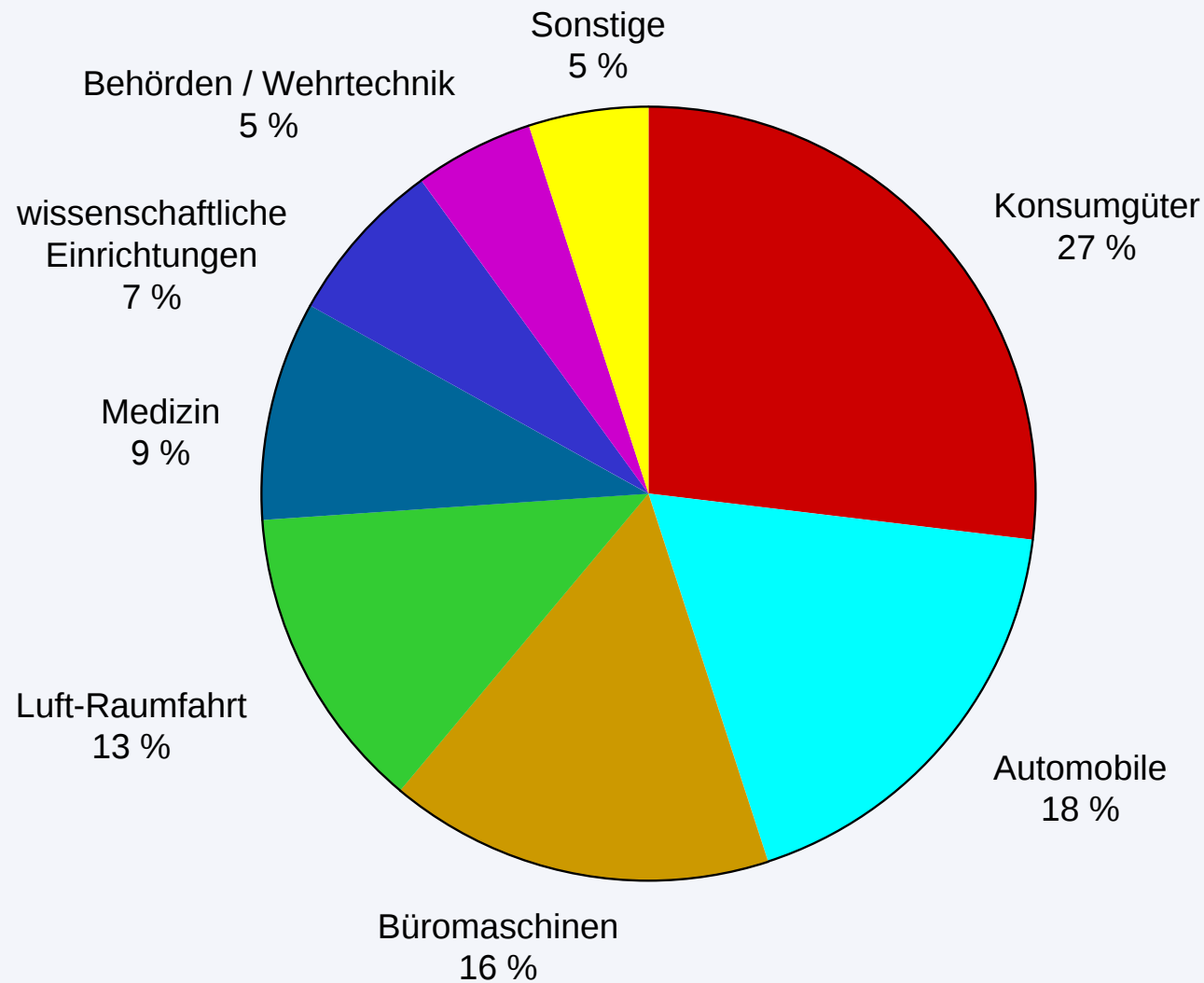
##### Metall- schweißen

#### Kombinierte Verfahren

##### Fräsen + Fügen

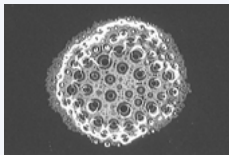
##### Fräsen + Laser- auftragsschweißen

## Generative Verfahren: Verteilung der Rapid Prototyping Verfahren



# Rapid Prototyping Verfahren

## Fluid

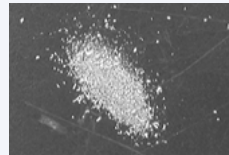


### Sterolitographie

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

### Solider-Verfahren

## Pulver

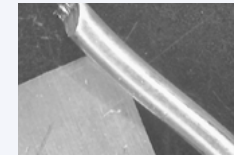


### Selective Laser Sintering

EOS - Verfahren  
DTM - Verfahren

### 3D-Printing

## Draht / Folie



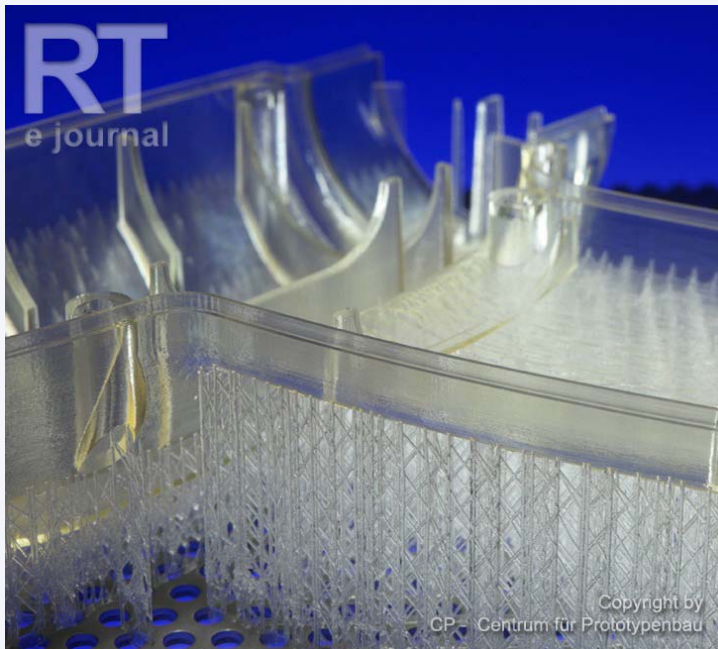
### Fused Deposition Molding

### Laminated Object Molding (Manufacturing)

### Multi Jet Modeling

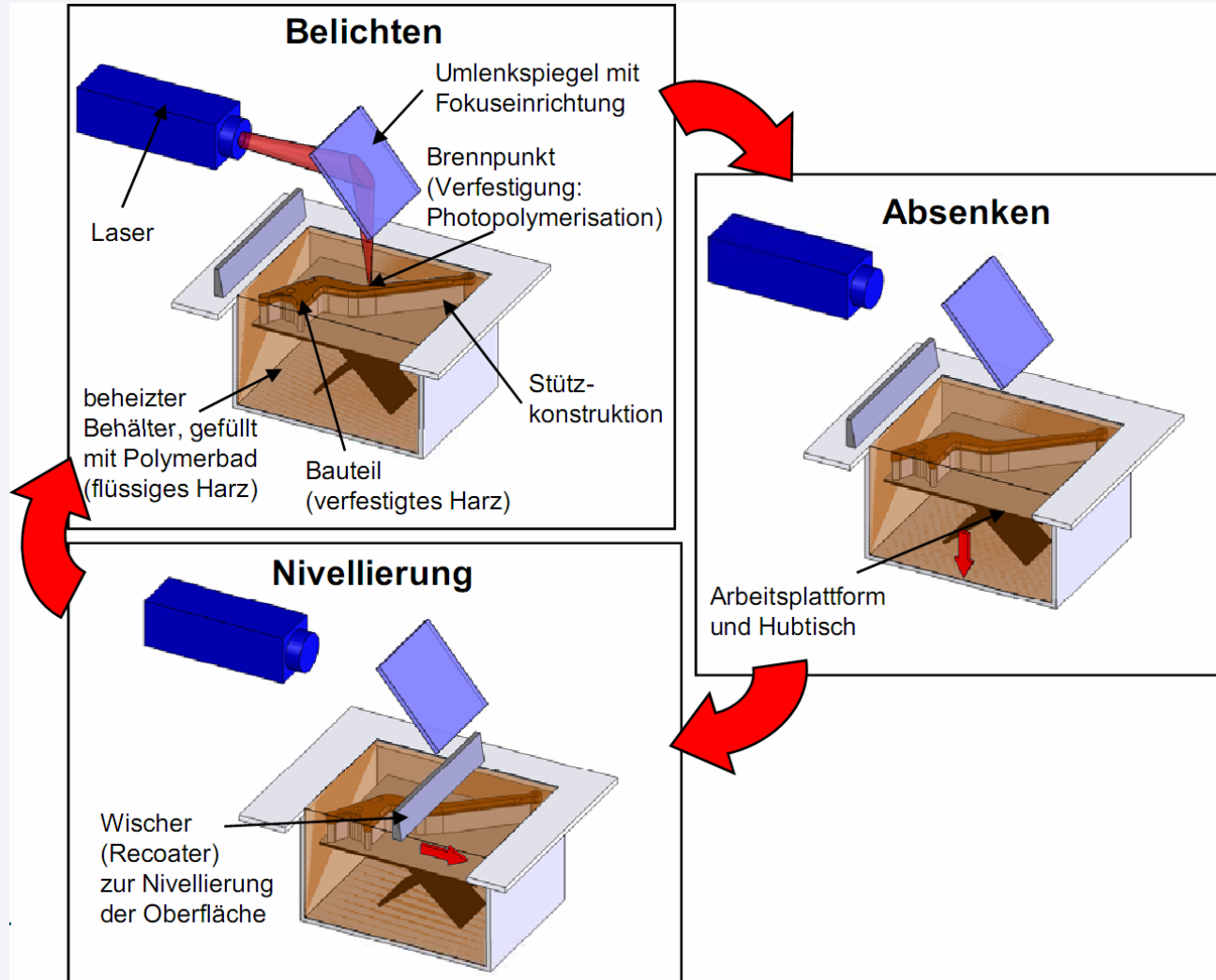
# Stereolithographie

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



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

# Stereolithographie



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

## Stereolithographie-Anlage der Firma 3D-Systems



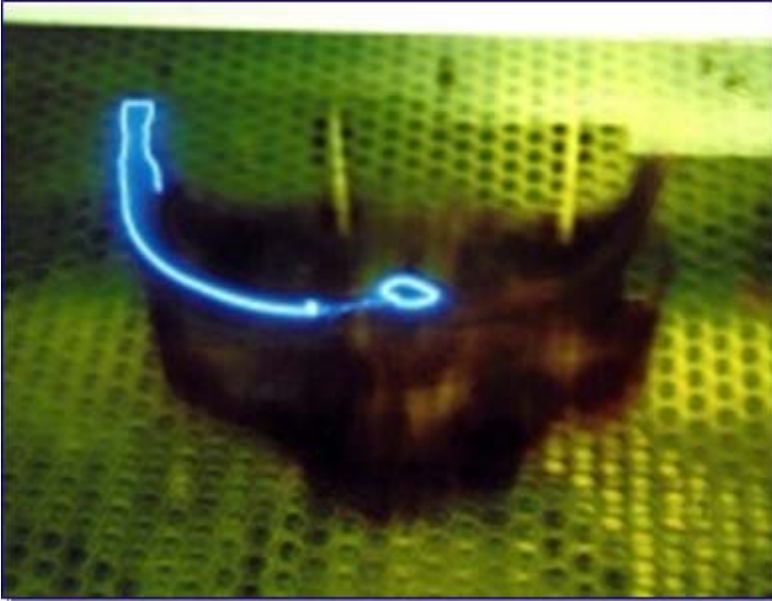
*SLA 3500 System*



*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



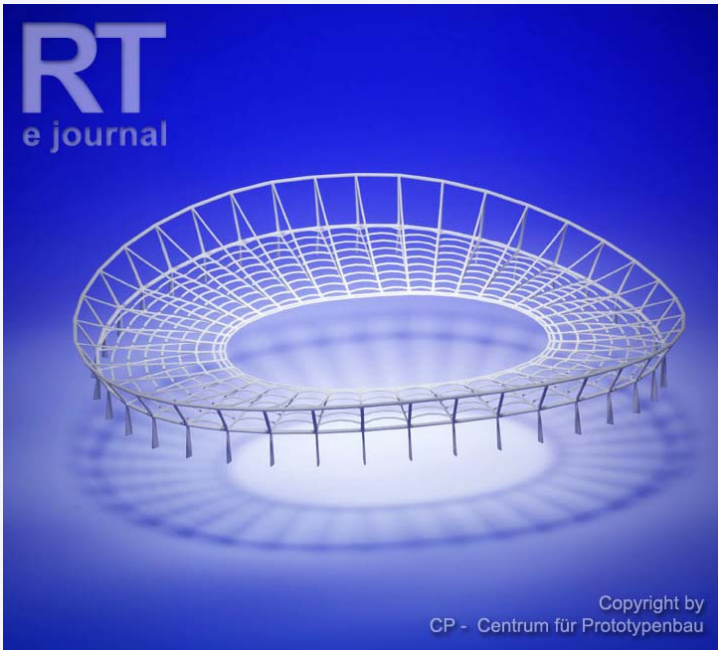
*Gebrauchsfertiges Stereolithographie-Modell:  
Gesichtsschädel*



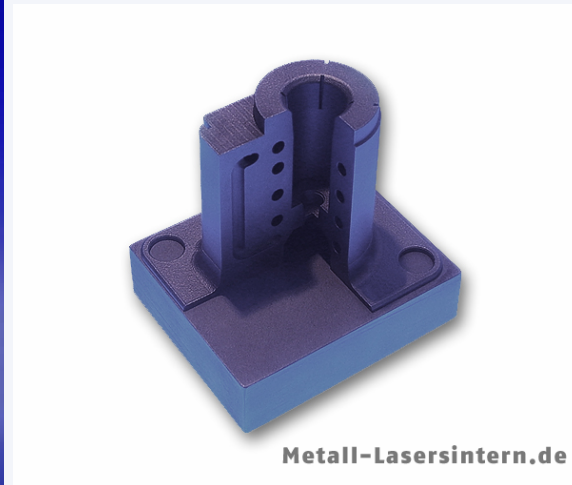
*(Quelle: FA. Weihbrecht)*

## Selective Laser-Sintering (Laser Sintern)

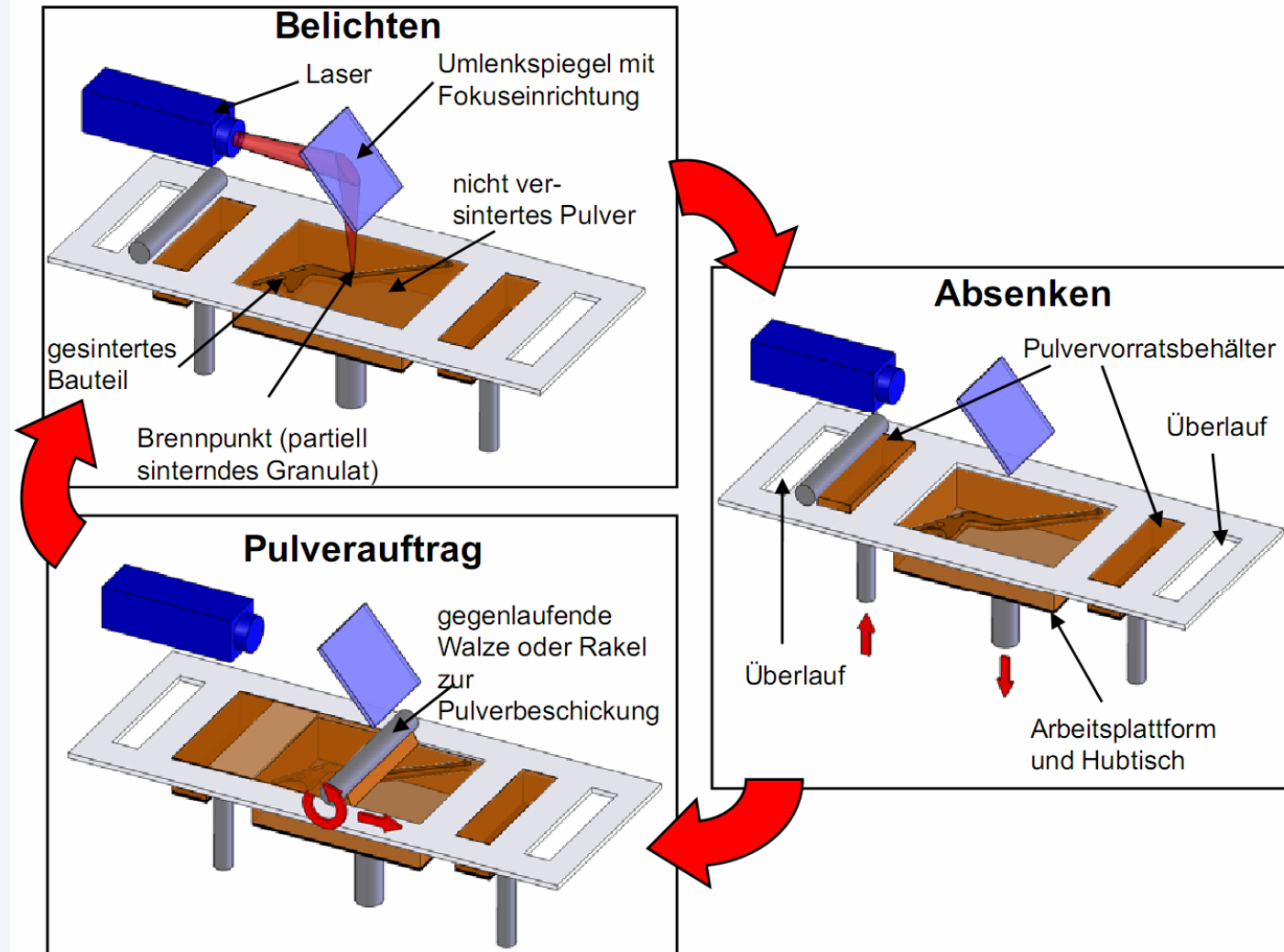
|                    |                                                                                                                                       |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|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



Quelle: RTejournal



# Selective Laser-Sintering (Laser Sintern)



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

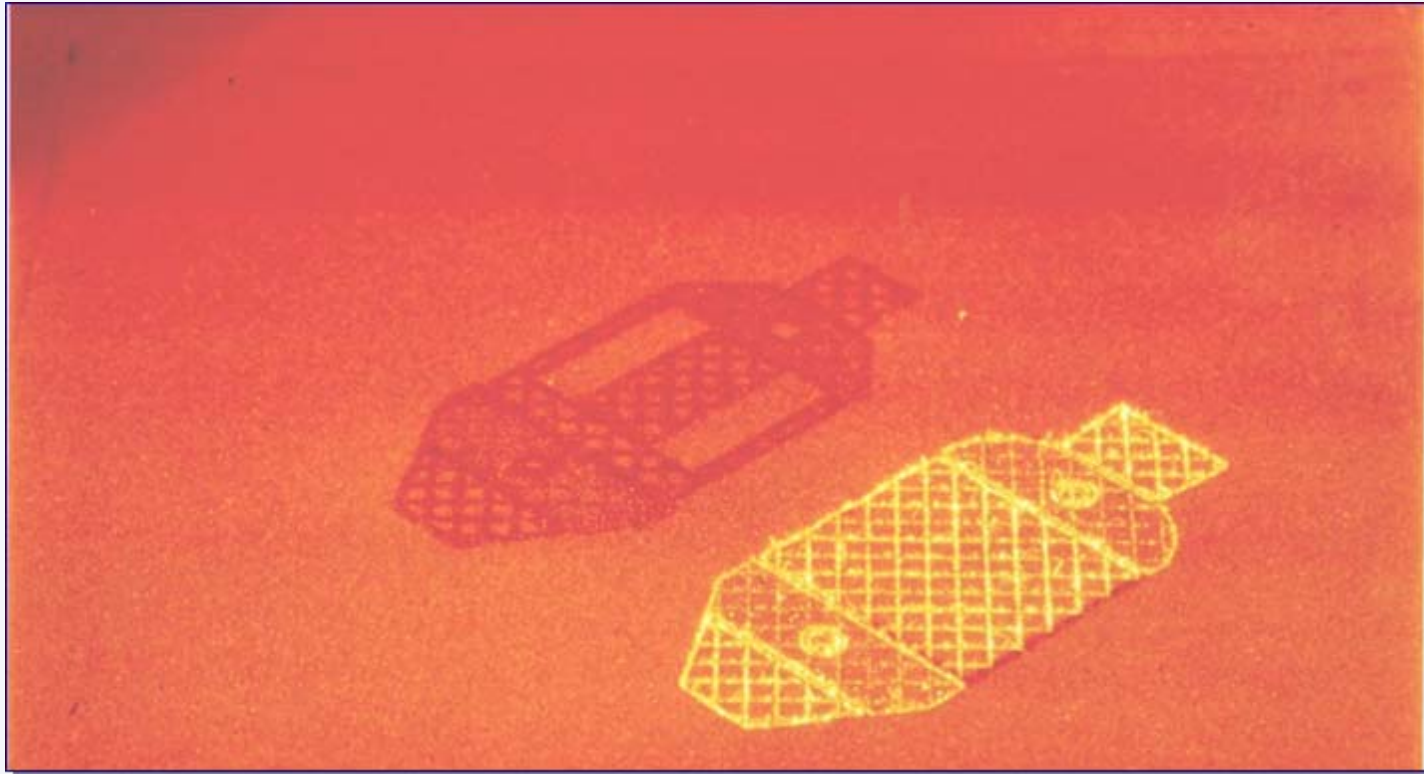
## Maschinenbeispiel: EOSINT S (Laser-Sinter-System für Sandformen und -kerne)



*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.*

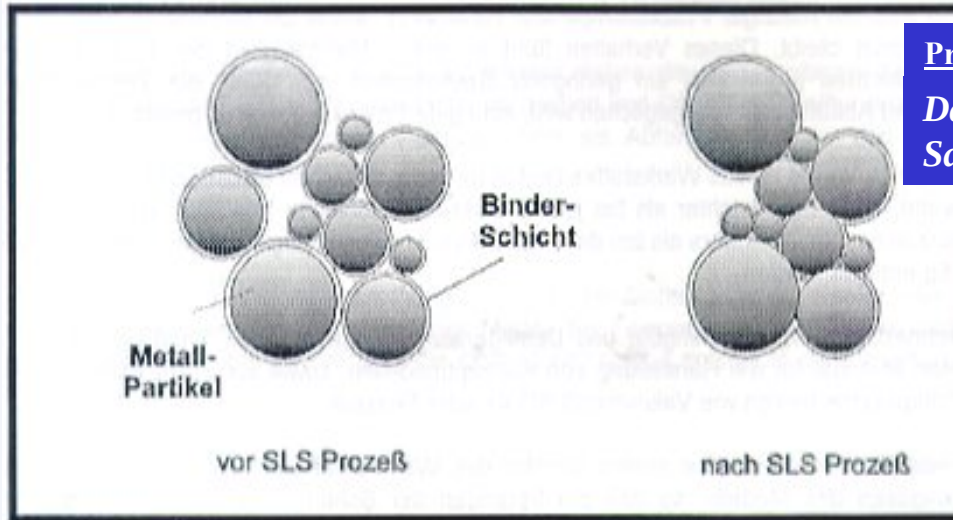


## Laser-Sinter-Vorgang (EOSINT S 350/40)

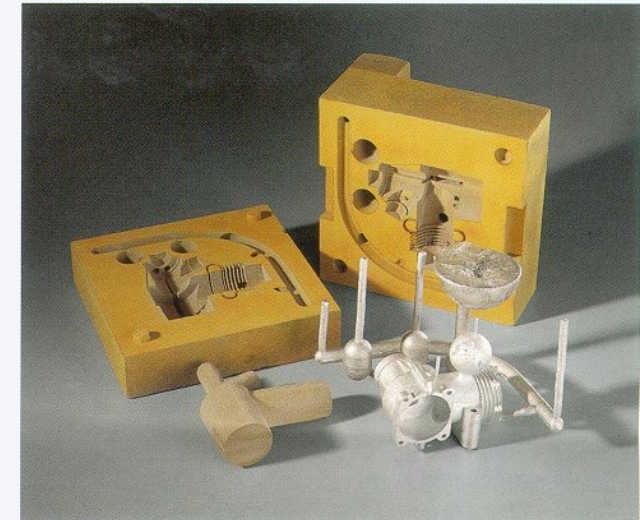


*EOSINT S 350/40: Fotoaufnahme eines Laser-Sinter-Vorganges mit langer Belichtungszeit. Gleichzeitige Herstellung von zwei Bauteilen erhöht die Wirtschaftlichkeit der Anlage.*

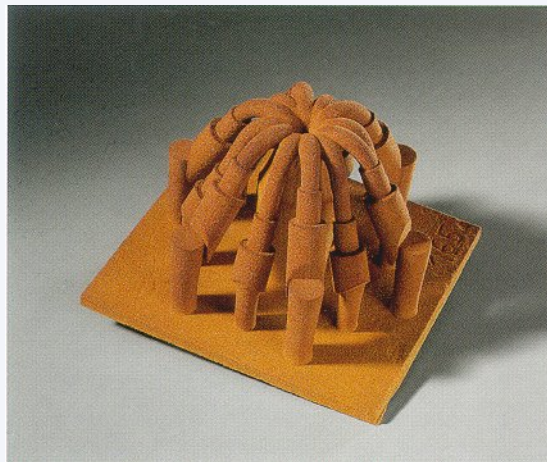
## Selective Laser-Sintering: Beispiele



Prinzip des RapidSteel Werkstoffes (DTM)  
*Das Prinzip des Aufschmelzen gilt für Sand und Kunststoff gleichermaßen!*



*Gegossenes Einzyylinder-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:

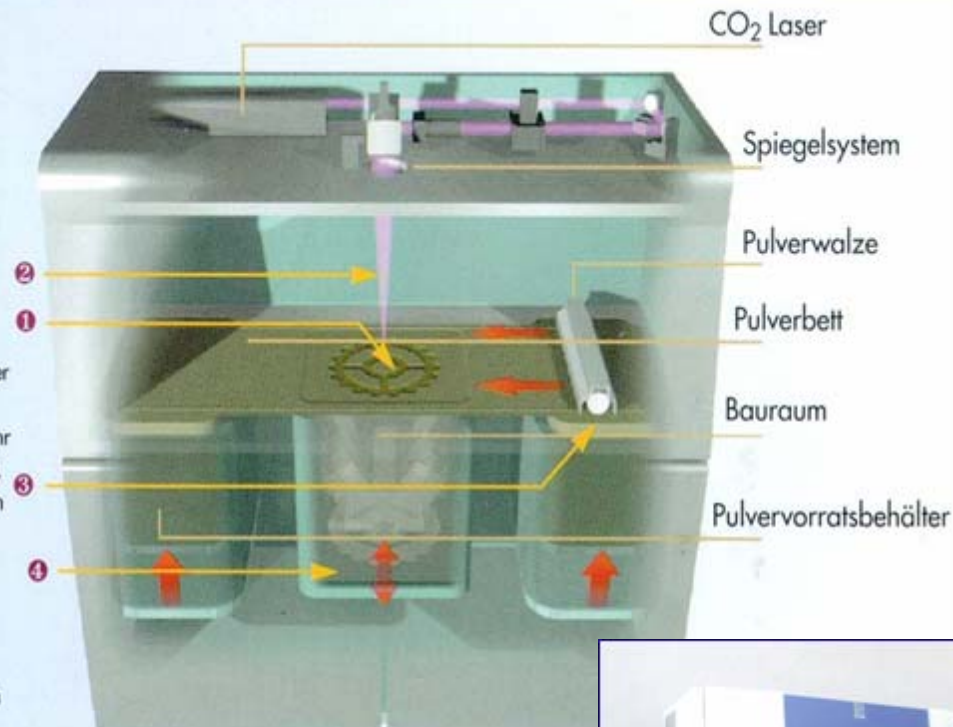
Erstellung eines dreidimensionalen CAD-Datensatzes im genormten STL-Format.

## 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*



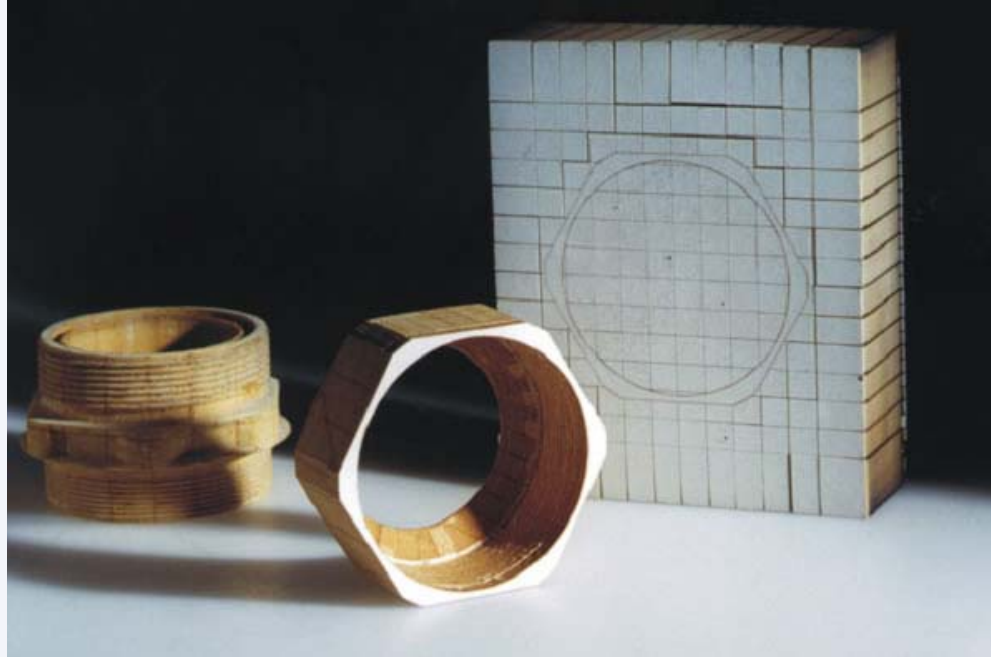
*Sandkern und Abguß in Aluminium für Turbinentriebwerk, Fa. Boeing, Abmessungen ca. 430 x 350 x 305 mm<sup>3</sup>*

## Selective Laser-Sintering: Rapid-Tooling



*Metallische Werkzeugeinsätze für die Herstellung von Bohrmaschinengehäusen  
im Kunststoffspritzguß, Abmessungen ca. 152 x 317 x 38 mm<sup>3</sup>*

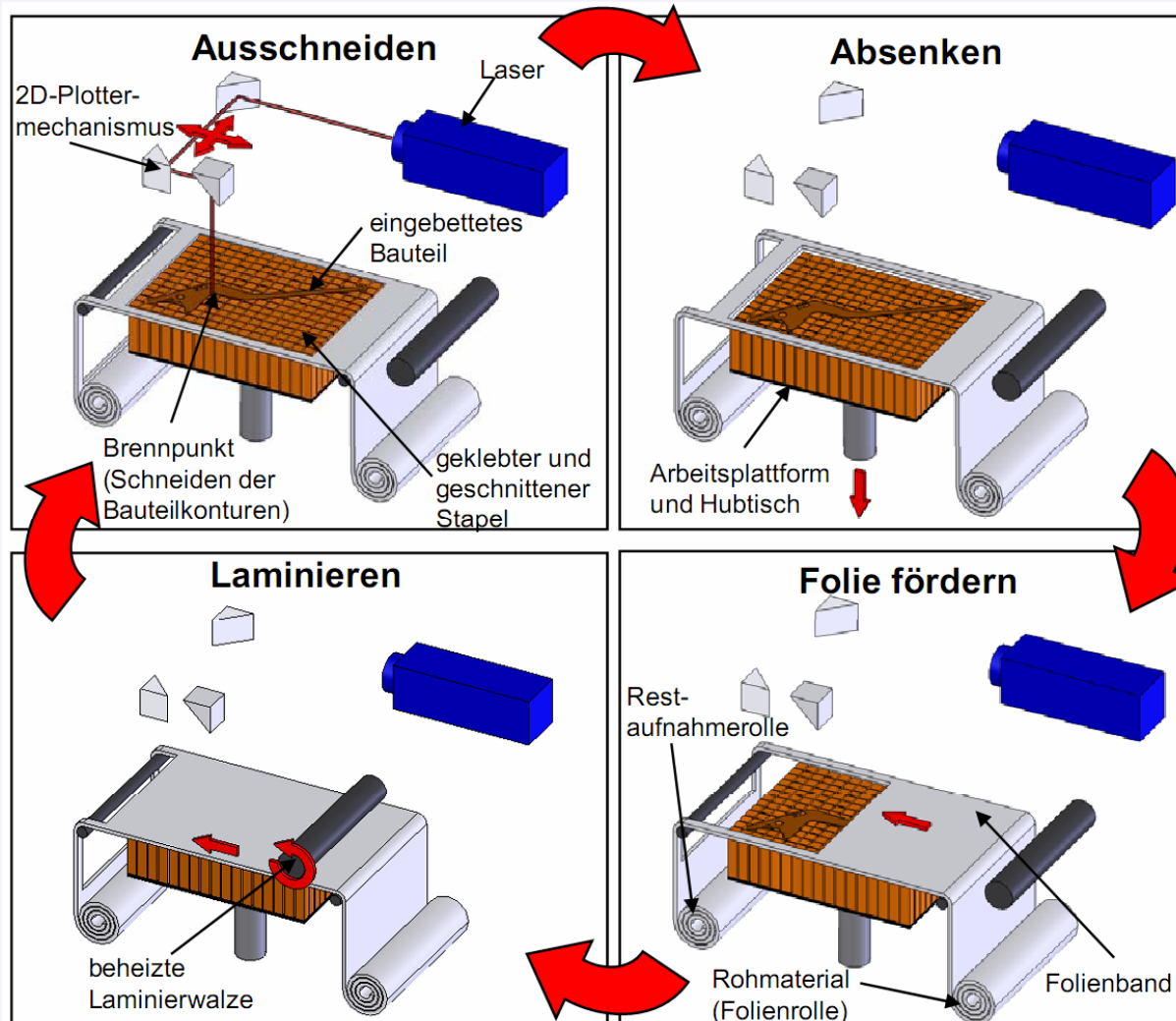
## Laminated Object Manufacturing (Layer Laminate Manufacturing)



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

Quelle: RTejournal

# Laminated Object Manufacturing (Layer Laminate Manufacturing)

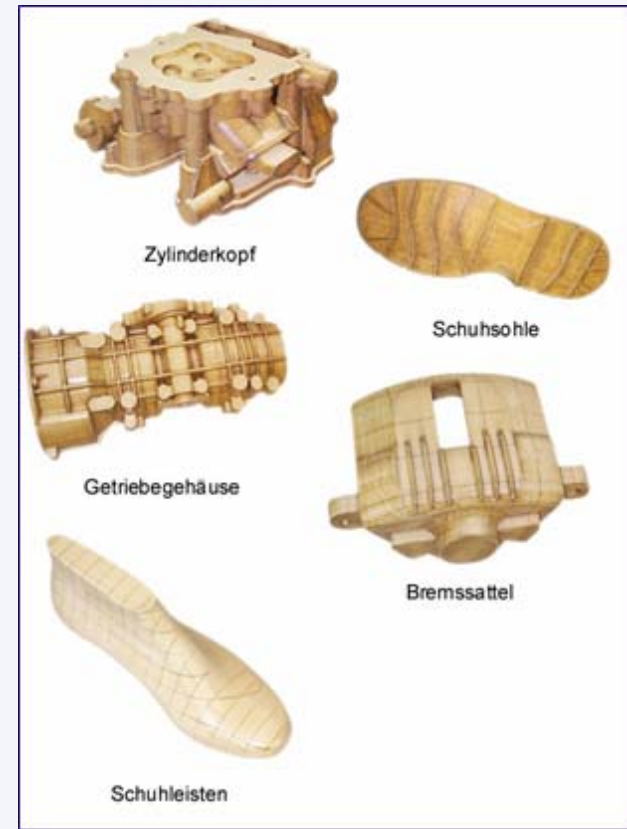


Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

## Maschinenbeispiel: LOM-Anlagen der Firma Invenio



### *LOM-Beispiele*



## LOM: Metallguß und Silikon-Werkzeuge



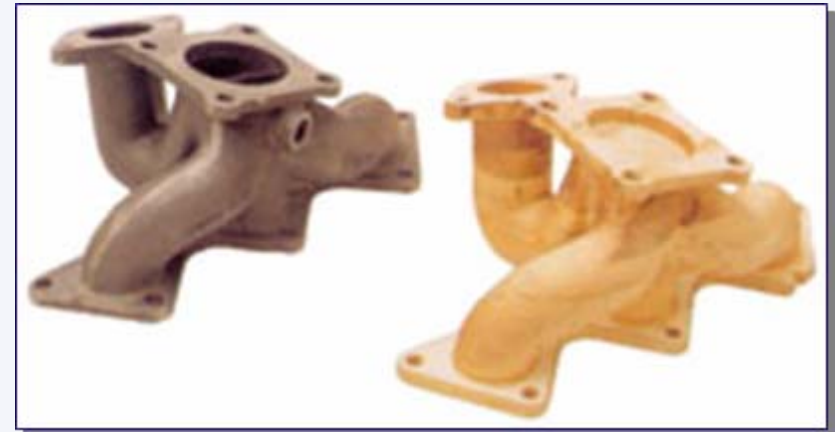
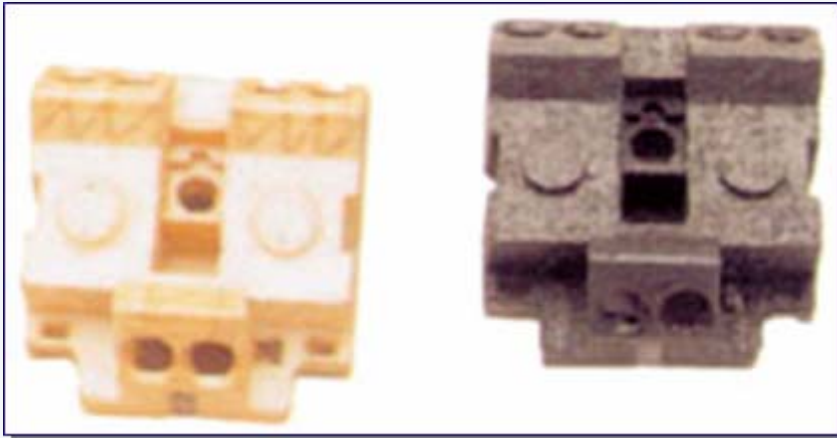
Schwindmaße können getrennt nach xyz-Richtung, aber auch als Faktor eingegeben werden. Weitere Konstruktions- oder Programmierarbeiten sind nicht nötig. LOM™ Modelle eignen sich für die Anwendung als verllorener Kern im Schalenfeinguß. Sie dehnen sich unter Wärmeeinwirkung nicht aus und sprengen somit 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.



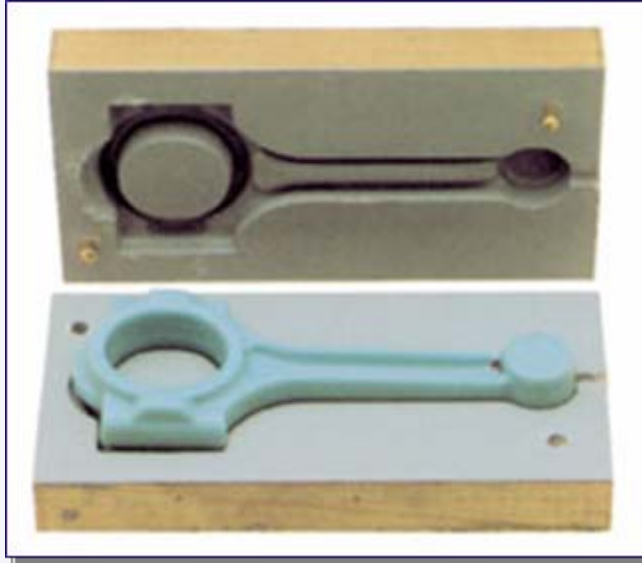
## LOM: Spritzgußform und Sandguß

*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.*

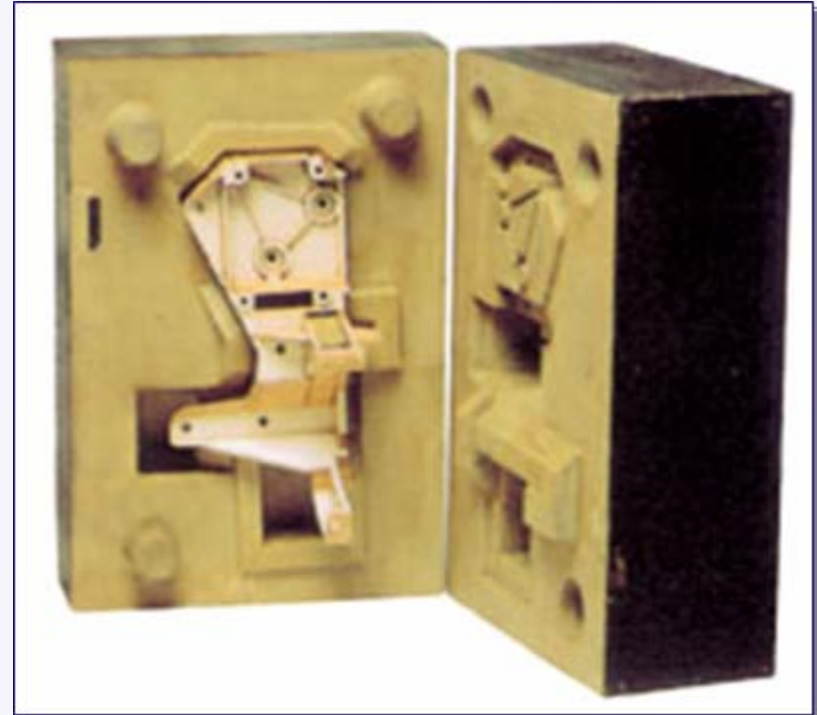


*Der LOM-Prozeß kann auch zur Produktion von Kernen oder Kernformen benutzt werden. Durch die Verwendung von preiswerten Materialien können selbst große Teile besonders schnell und kostengünstig hergestellt werden.*

## 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.

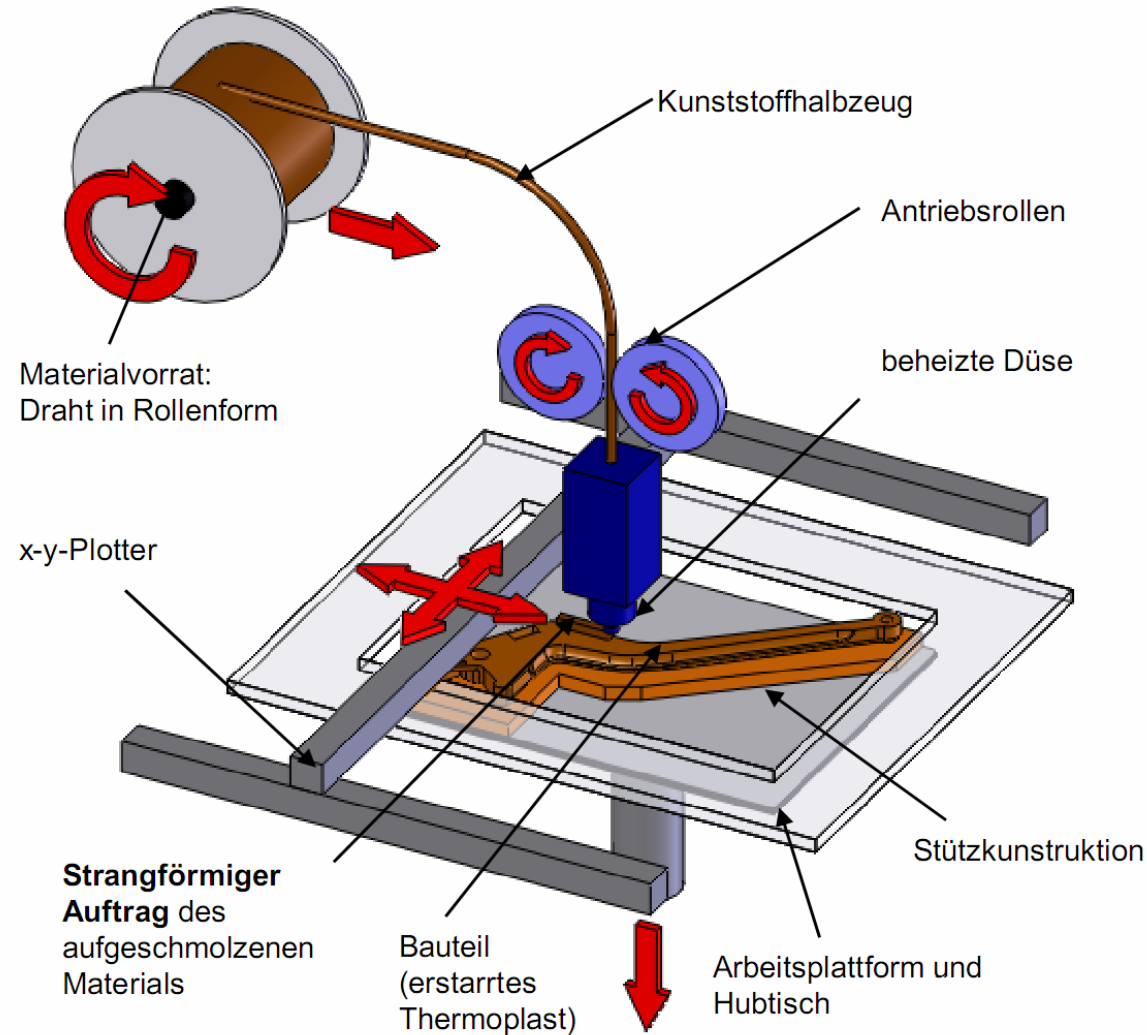
## Fused Deposition Modeling (Fused Layer Modeling / Manufacturing)

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



Quelle: RTejournal

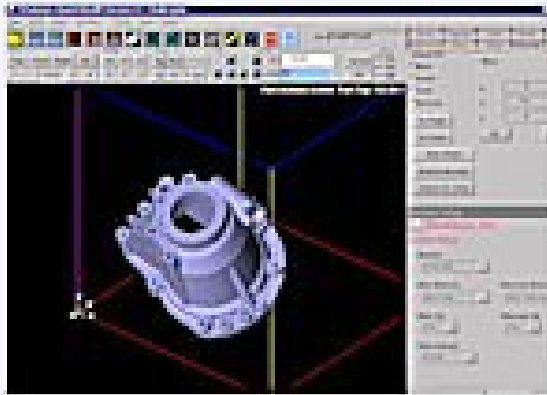
## Fused Deposition Modeling (Fused Layer Modeling / Manufacturing)



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

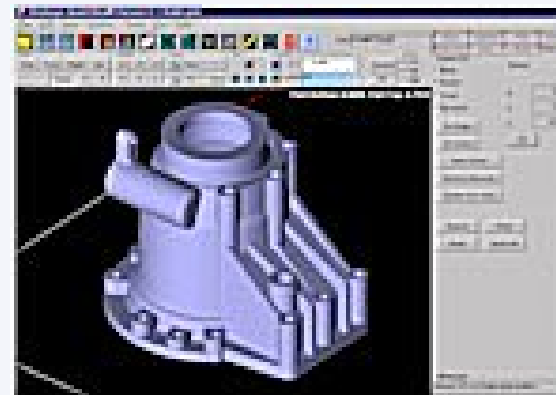
## FDM: Arbeitsvorbereitung

1



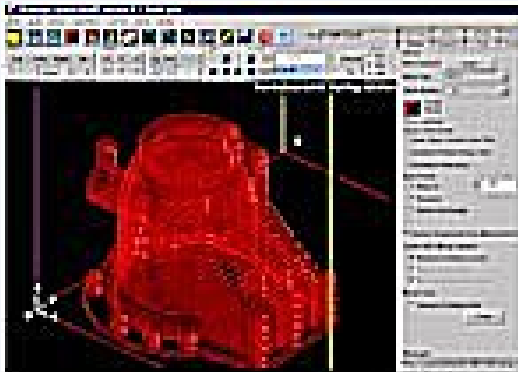
Einlesen der STL-Daten

2



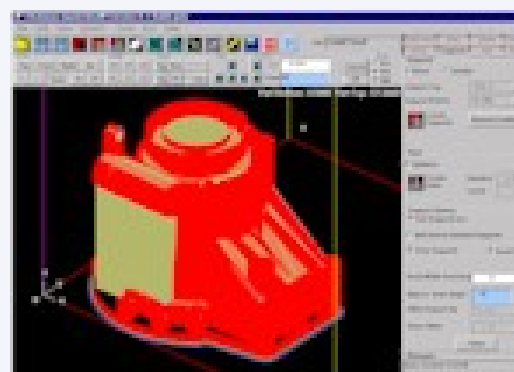
Festlegen der optimalen Baulage

3



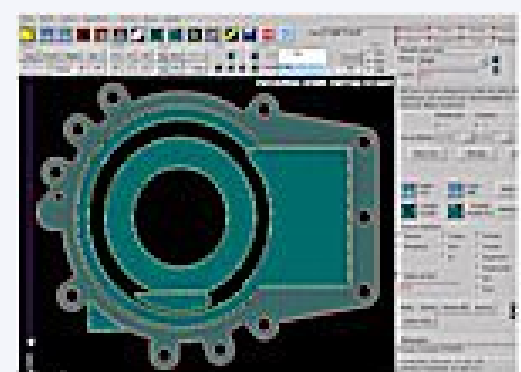
Schneiden des Modells in  
horizontale Ebenen (Slicen)

4



Automatisches Berechnen  
der Stützkonstruktionen

5



Berechnen der Verfah Wege

## FDM: Maschinenbeispiele und Funktionsmodelle



*FDM 8000*

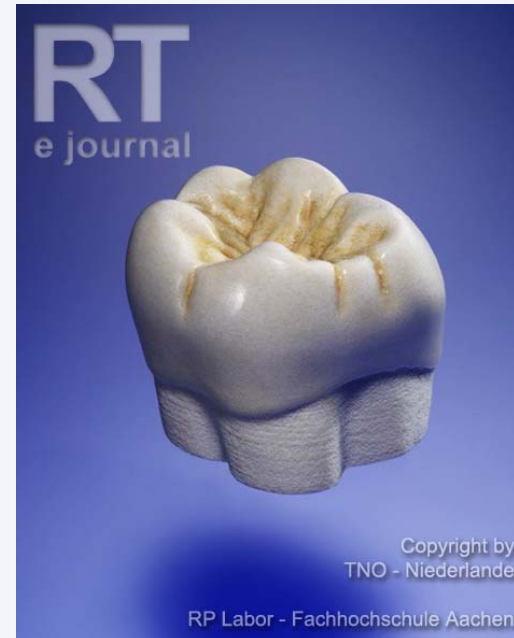


*Funktionsmodelle aus ABS.*



*Felge erstellt mit der FDM 8000*

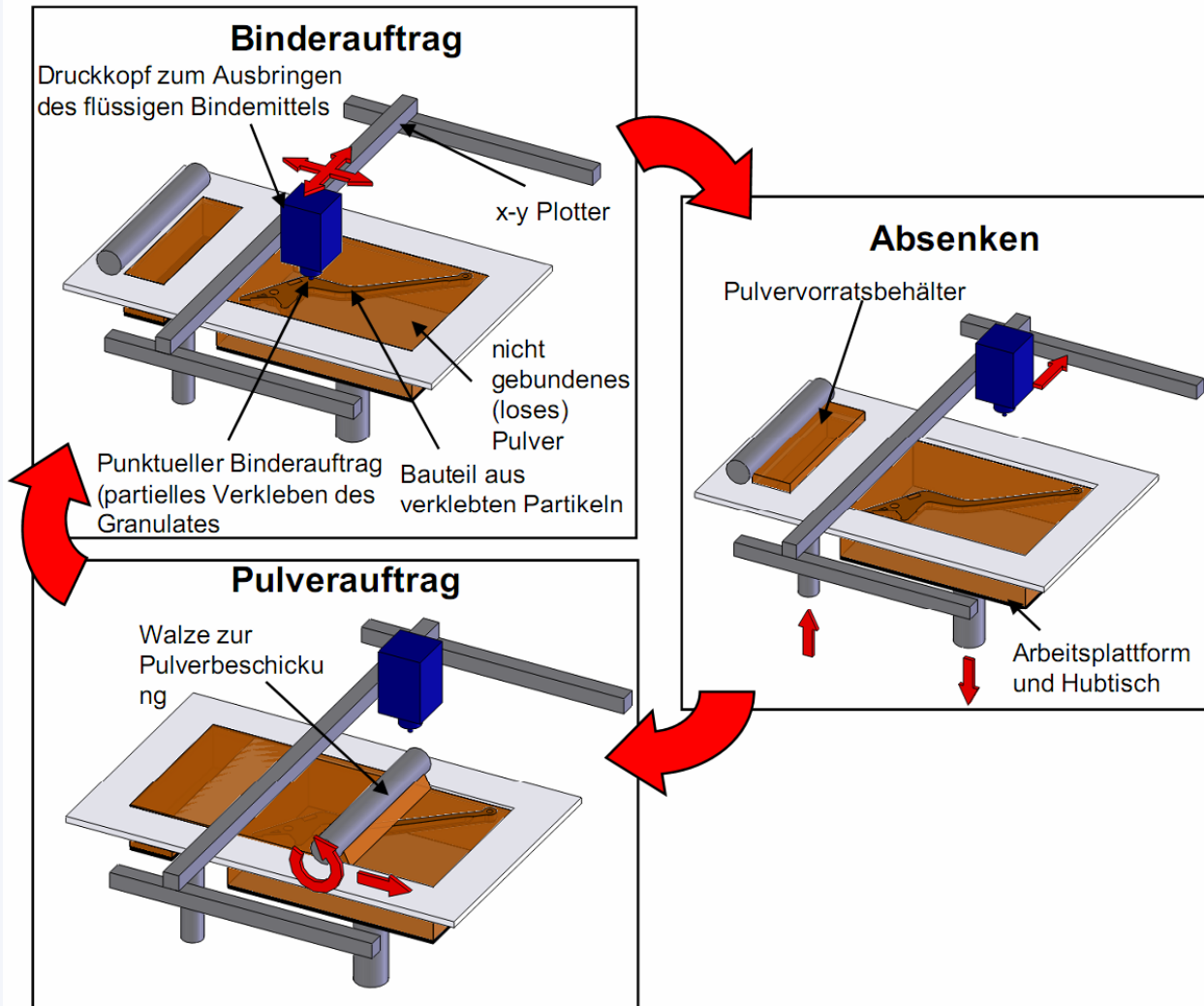
## 3D Printing



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

Quelle: RTejorunal

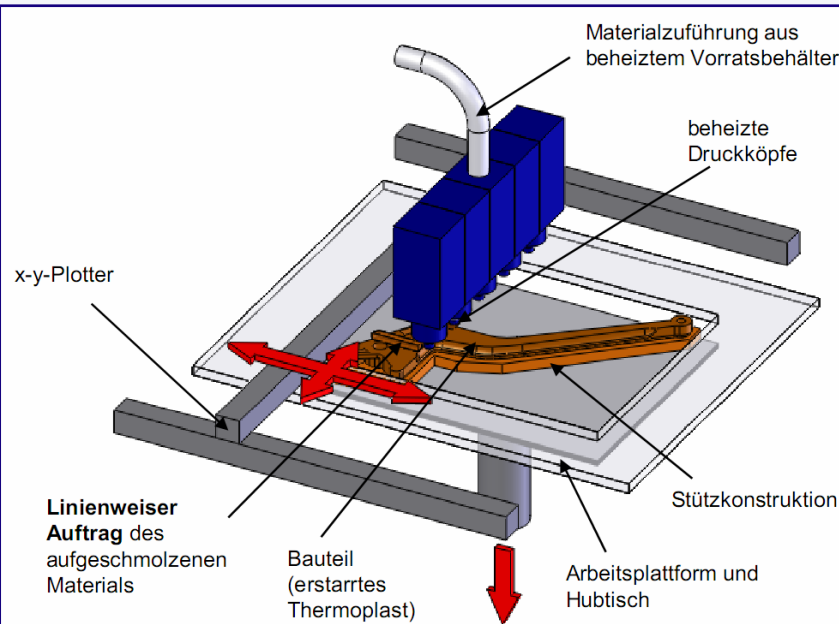
# 3D Printing



Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

# Multi Jet Modeling / Poly Jet Modeling

## Multi Jet Modeling

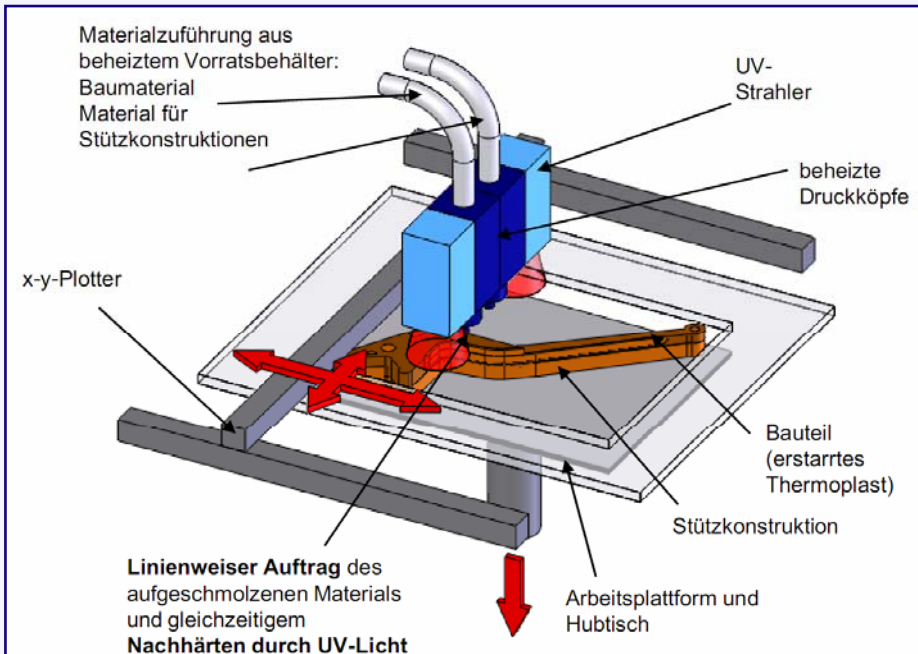


### Grundprinzip

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

Quelle: Witt, Moderne Produktionssysteme

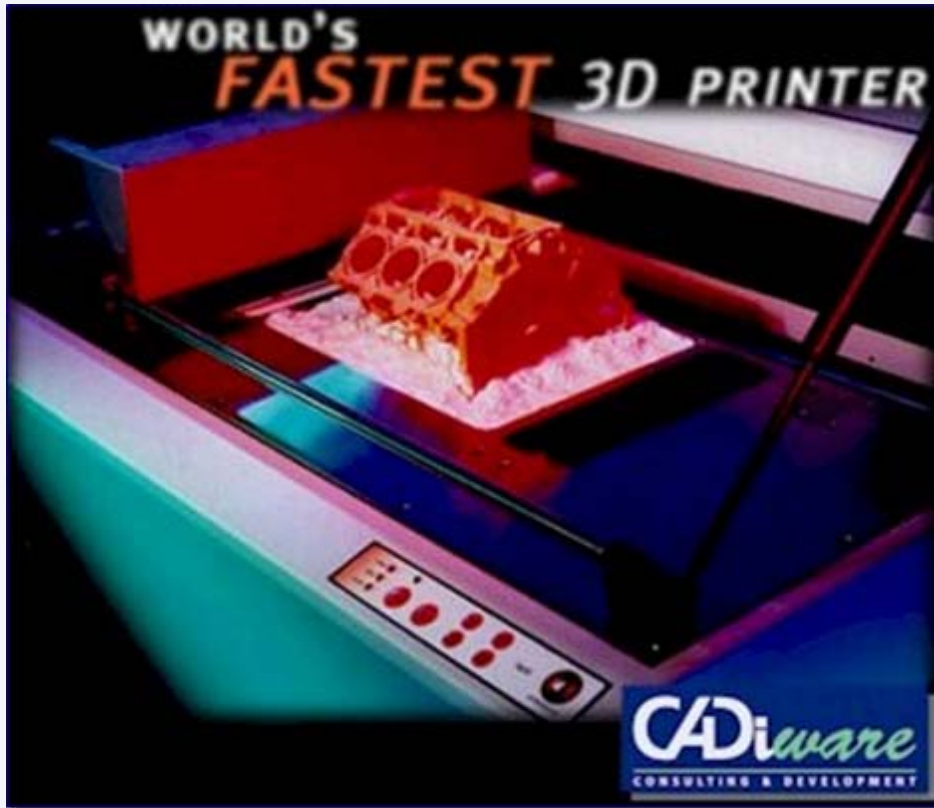
## Poly Jet Modeling



### 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

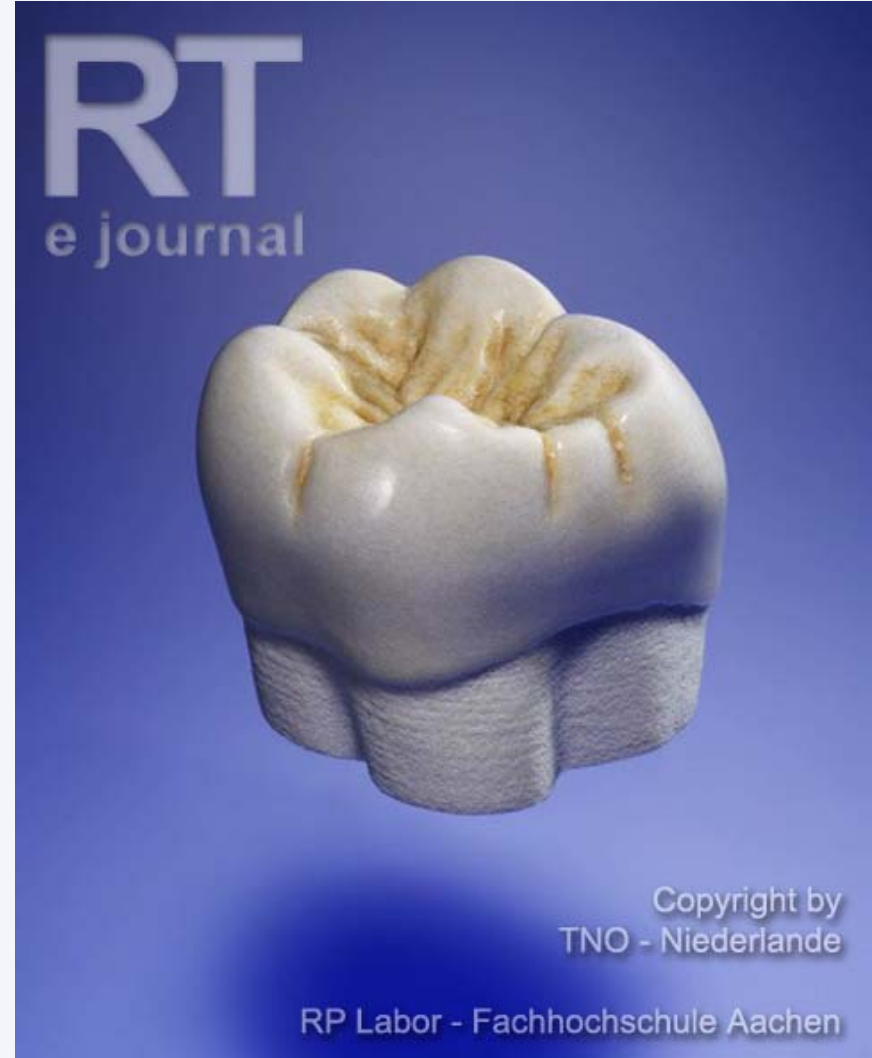


*CADiware: Z402 3D Printer*

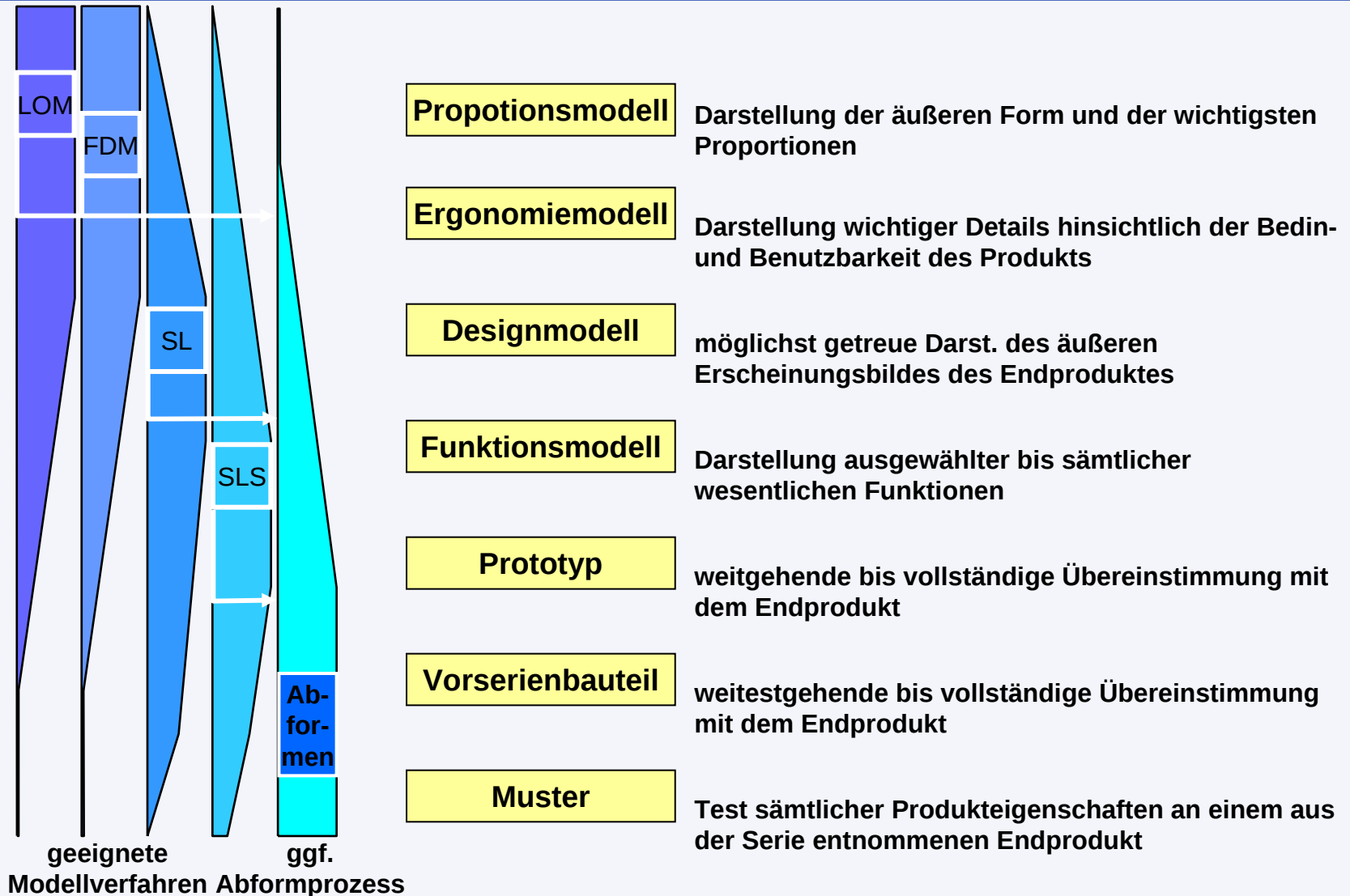
## 3D Printing: Beispiele (CADIware)



## 3D Printing: Beispiele



## Zuordnung von Rapid Prototyping Verfahren



# Entscheidungsmatrix

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

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