

# DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

**Maximilian Gaukler, Patrick Kanzler**

Lehrstuhl für Regelungstechnik, Lehrstuhl für Leistungselektronik

Sommersemester 2019



# DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Computerunterstützte Fertigung: Zerspanung

**Maximilian Gaukler, Patrick Kanzler**

Lehrstuhl für Regelungstechnik, Lehrstuhl für Leistungselektronik

Sommersemester 2019



- Ziel der heutigen Vorlesung ist ein *Grundverständnis*
  - des Ablaufs von der Skizze bis zum fertigen Werkstück
  - der zerspanenden Fertigung
- Hier: Sicht der Automatisierungs- bzw. Regelungstechnik
- Wir können damit kein Maschinenbaustudium und keine Lehre ersetzen.

## Beachte:

Die Wirklichkeit ist deutlich komplizierter als unsere einfachen Modelle.

*Essentially, all models are wrong, but some are useful. — G. Box*



- 1 Einleitung
- 2 Fertigungsverfahren: Übersicht**
- 3 Zerspanung
- 4 Computerunterstützte Fertigung
- 5 Zusammenfassung



## Definition

*Fertigung* ist die Herstellung eines Werkstücks nach einer vorgegebenen Konstruktionszeichnung.

- Gliederung der Verfahren nach DIN 8582
  - 1 Urformen (z. B. Gießen)
  - 2 Umformen (z. B. Biegen)
  - 3 **Trennen** (z. B. Zerschneiden)
  - 4 Fügen (z. B. Kleben, Schweißen, Nähen)
  - 5 Beschichten (z. B. Lackieren)
  - 6 Stoffeigenschaft ändern (z. B. Wärmebehandlung zum Härten)
- Andere Gliederungen z. B. : Subtraktiv versus Additiv



- 1 Zerteilen (z. B. Schere, Wasserstrahlschneiden)
- 2 Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide (z. B. Bohrer)
- 3 Zerspanen mit geometrisch unbestimmter Schneide (z. B. Schleifpapier)
- 4 Abtragen (z. B. Laserstrahl- und Brennschneiden)
- 5 Zerlegen
- 6 Reinigen



- 1 Einleitung
- 2 Fertigungsverfahren: Übersicht
- 3 Zerspanung**
- 4 Computerunterstützte Fertigung
- 5 Zusammenfassung



- weicheres Material wird durch härteres abgetragen
- Material bildet Späne aus
- genauer Vorgang komplex



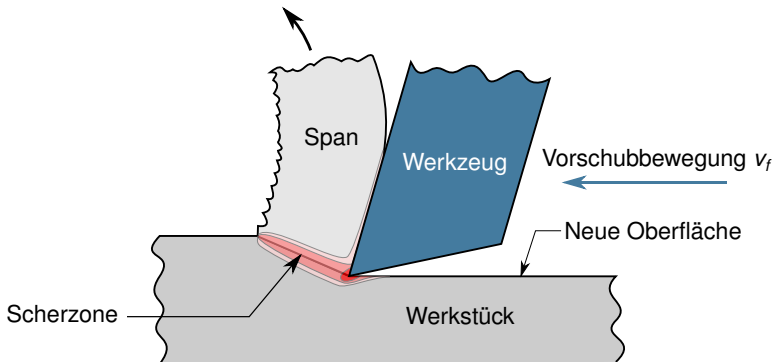
[http://www.ktm-gmbh.de/images/top/start\\_zerspanung.jpg](http://www.ktm-gmbh.de/images/top/start_zerspanung.jpg)

- im Weiteren: Spanen mit geometrisch **bestimmter** Schneide (insbesondere: Bohren, Drehen, Fräsen)



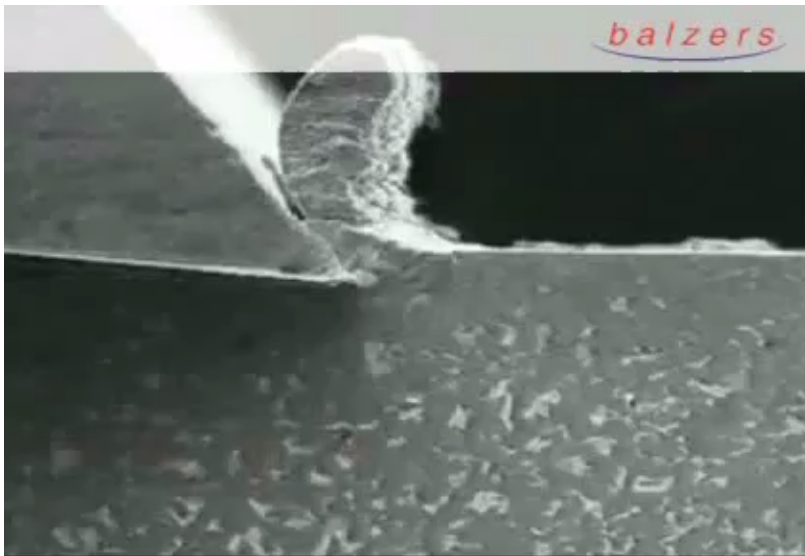
# Spanbildung: einfaches Modell

- Relativbewegung Werkzeug – Werkstück (Schnittgeschwindigkeit  $v_f$ )
- Hartes Werkzeug mit scharfer Kante wirkt als „Spaltkeil“
- Hohe mechanische Spannung in der Scherzone
- Trennung des Spans durch Abscheren, Fließen oder Abreißen



abgeändert von [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AMetal\\_Cut\\_diag.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AMetal_Cut_diag.svg),  
CC-BY-SA 3.0, Autoren: Sumanch und Swisstack auf Wikimedia Commons

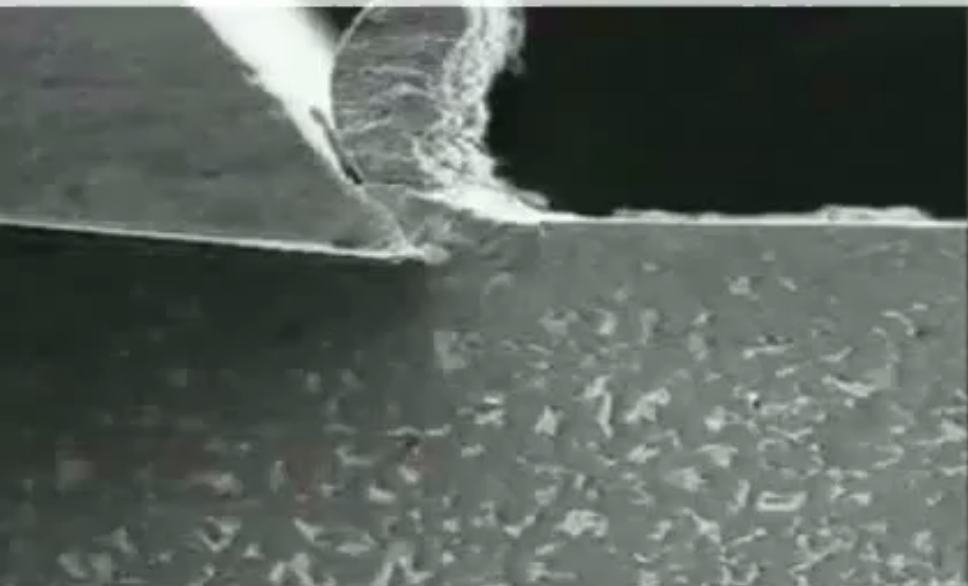




<https://www.youtube.com/watch?v=DBBBKS7haMw>



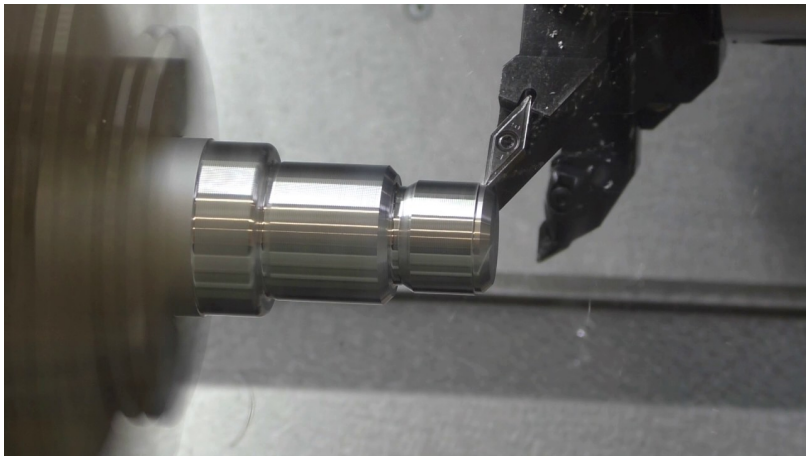
balzers





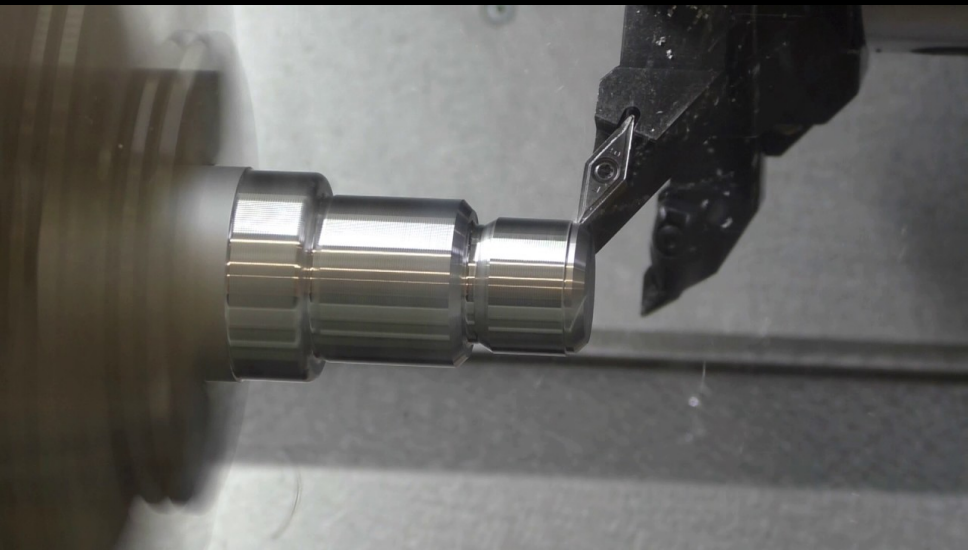
Drehmaschine: Proxxon, <http://www.proxxon.com/de/micromot/24400.php>; Werkstück: eigenes Bild

- Prinzip: Werkstück dreht schnell um Drehachse (Z)
- Werkzeug (Drehmeißel) bewegt sich in dazu senkrechter Ebene (X-Y)
- Herstellung **rotationssymmetrischer Teile** (Sonderfunktion: Gewinde)



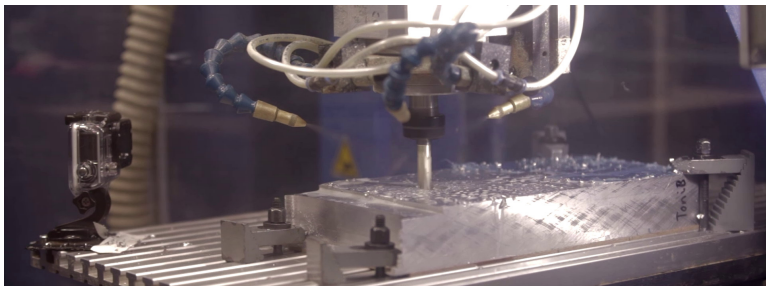
<https://www.youtube.com/watch?v=zjk7yxzr738>





## Fräsen (3-achsig)

- Prinzip: Werkstück steht still, liegt in X-Y-Ebene
- Werkzeug (Fräser) dreht sich um Z-Achse und wird in X, Y, Z bewegt
- Mögliche Geometrie:
  - Sehr gut für „2,5D“ (mehrere Ebenen mit Z konstant)
  - Mit speziellen Fräsern: Rundungen, Fasen (45-Grad-Kanten)
  - Alles andere nur durch „Abzeilen“ mit Kugelfräser in feinen Schritten
  - Keine Hinterschnitte möglich
- → Video: Fräse im FAU FabLab



<https://www.youtube.com/watch?v=UMpQ2M7ntvM>



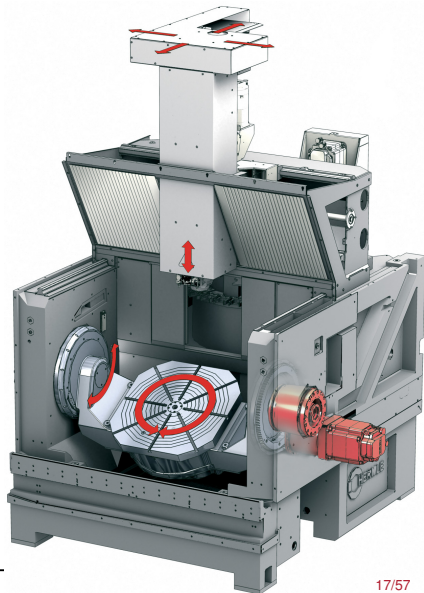




# Fräsen (5-achsig)

- Zwei zusätzliche Drehachsen
- Ausrichtung des Fräasers zum Werkstück frei einstellbar

Bild: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Bearbeitungszentrum\\_Schnittmodell\\_Hermle\\_01.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Bearbeitungszentrum_Schnittmodell_Hermle_01.jpg),  
Berthold Hermle AG, CC-BY-SA 3.0

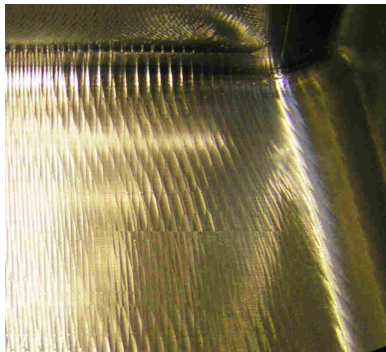


# Parameter beim Fräsen (bzw. Drehen)

- Abhängig von Werkzeug und Material des Werkstücks
- Konstanten:
  - **Schneidenzahl** ( $z$ ) des Fräasers (Drehen:  $z = 1$ )
  - **Fräserdurchmesser** ( $D$ ) (Drehen: Werkstückdurchmesser)
- Angaben in Tabellenbuch bzw. Datenblatt:
  - **Schnittgeschwindigkeit** ( $v_c$ ) zwischen Schneide und Werkstück  
→ Drehzahl  $n = \frac{v_c}{\pi D}$
  - **spezifischer Vorschub** ( $f_z$ ) pro Schneide und Umdrehung  
→ Vorschubgeschwindigkeit  $v_f = z n f_z$
  - **Zustellung** ( $a_p$ ), d. h. Schnitttiefe pro Durchlauf
  - **Eingriffsbreite** ( $a_e$ ) (nur beim Fräsen)
- Anpassung je nach Maschine, Aufspannung, ...



- Problem: „Instabilität“ des Zerspanungsprozesses (Rattern)
- Ursache: Elastizität
  - der Maschine (Gerüst, Antriebe)
  - des Werkzeugs (Länge-Durchmesser-Verhältnis)
  - des Werkstücks (Aufspannung, Dicke)
- Gegenmaßnahmen:
  - Anregungsamplitude: Eingriffstiefe, -breite oder Vorschub verringern
  - Anregungsfrequenz: Drehzahl langsamer oder ggf. **schneller**
  - Steifigkeit erhöhen: Material besser einspannen (kürzer, mehr Punkte), stabilere Maschine verwenden



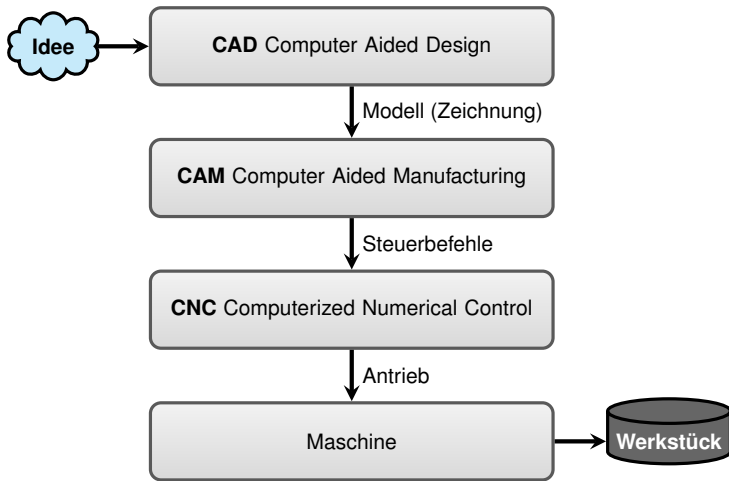
[www.wzl.rwth-aachen.de/de/468fc71f212b56ccc12570ae0050f6d7/Rattermarken3.jpg](http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/468fc71f212b56ccc12570ae0050f6d7/Rattermarken3.jpg)

- 1 Einleitung
- 2 Fertigungsverfahren: Übersicht
- 3 Zerspanung
- 4 Computerunterstützte Fertigung**
- 5 Zusammenfassung



# Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)

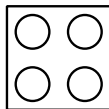


- Idee  $\rightsquigarrow$  Konzept  $\rightsquigarrow$  gewünschte Form
- Wesentliche Kriterien:
  - **Funktionsgerecht:** *Erfüllt es seinen Zweck?*
  - **Fertigungsgerecht:** *Ist es leicht herzustellen?*  
→ Machbarkeit, Genauigkeit, Dauer, Kosten, ...
- Mögliches Entwurfsvorgehen (vereinfacht):
  - 1 Ungefähre Form
  - 2 Funktionsflächen: Welche Flächen sind tatsächlich wichtig und wofür?
  - 3 Maße und Toleranzen festlegen
  - 4 Absprache mit Fertigung, ggf. Überarbeitung
- Thema sehr weitläufig → Literatur (Maschinenbau)



## ■ 2D

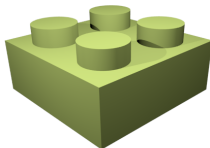
- **Vektorgrafik:** Inkscape, Corel Draw, Illustrator  
Eigentlich zur Illustration gedacht
- **Konstruktion:** in größeren 3D-Programmen enthalten  
Eingabe auch implizit (Lösen geometrischer Vorgaben)



## ■ 3D-Rendering (Flächenmodelle): Blender, Rhino

## ■ 3D-Konstruktion (Volumenmodelle):

- **Direkte Modellierung:** Designspark Mechanical, SketchUp (keine echten Volumenkörper; auch online),
- **Skriptsprache:** OpenSCAD
- **Parametrische Modellierung** (Profi-Programme): Autodesk Inventor, NX, CATIA, SolidWorks, Creo, Solid Edge, Onshape (online), ..., FreeCAD (eingeschränkt)

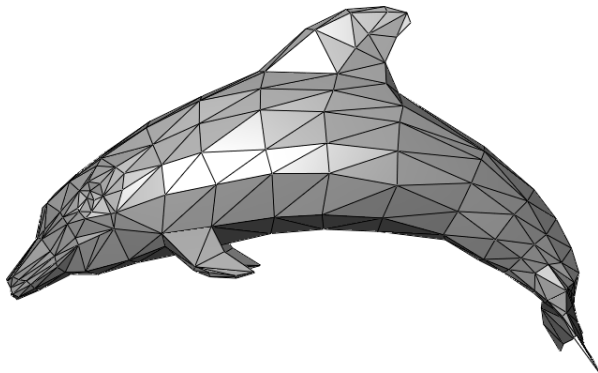


- Ein 3D-Objekt ist eine Menge  $M \subset \mathbb{R}^3$  mit unendlich vielen Elementen. Der Rechner benötigt eine Darstellung in **endlichem Speicherplatz**.
- Anforderungen für die Konstruktion:
  - Darstellung am Bildschirm  $\rightsquigarrow$  Mantelfläche
  - Weiterbearbeitung (z. B. Schnittmenge, Vereinigung)
- Anforderungen für die Fertigung:
  - Volumenkörper: Eindeutige Darstellung von innen und außen
  - Berechnung von 2D-Schnittkurven
- Lösungsansätze:
  - Flächenmodell: Mantelfläche
  - Volumenmodell: Innenraum
  - Hybride Modelle: Kombinationen (doppelte Datenstruktur)





Einfachstes Flächenmodell: Netz (engl. *mesh*) aus Dreiecksflächen



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADolphin\\_triangle\\_mesh.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADolphin_triangle_mesh.svg),  
Public Domain, Autor: Chrschn, via Wikimedia Commons

Einfachstes Flächenmodell: Netz (engl. *mesh*) aus Dreiecksflächen

- in Computergrafik üblich
- Standard-Dateiformat: STL („Stereolithographie“, oft für additive Fertigung)
- Gekrümmte Flächen nicht exakt möglich
- Problem: Konsistenzforderungen für Volumenkörper
  - mannigfaltig (engl. *manifold*): Jede Kante grenzt an genau 2 Flächen
  - wasserdicht: keine Löcher in der Außenfläche
  - nicht selbst schneidend (engl. *non self-intersecting*)
  - orientierbar: innen und außen eindeutig

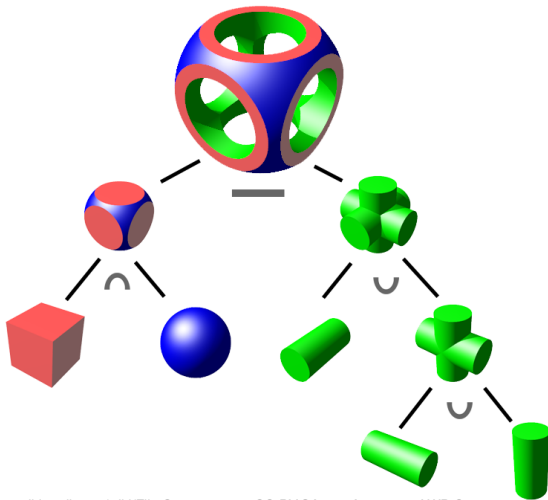
Bei manueller Bearbeitung leicht zu verletzen!

~> unsinnige, „kaputte“ Modelle (engl. *bad mesh*)



# Volumenmodell: Computational Solid Geometry (CSG)

Mengenmäßige (boolsche) Verknüpfung von Grundkörpern

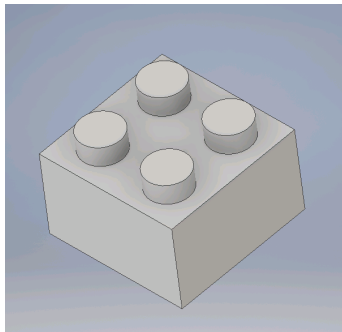
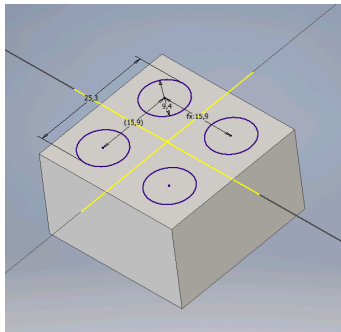


[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Csg\\_tree.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Csg_tree.png), CC-BY-SA 3.0, Autoren auf WP Commons: Zottie, Hawky.diddiz



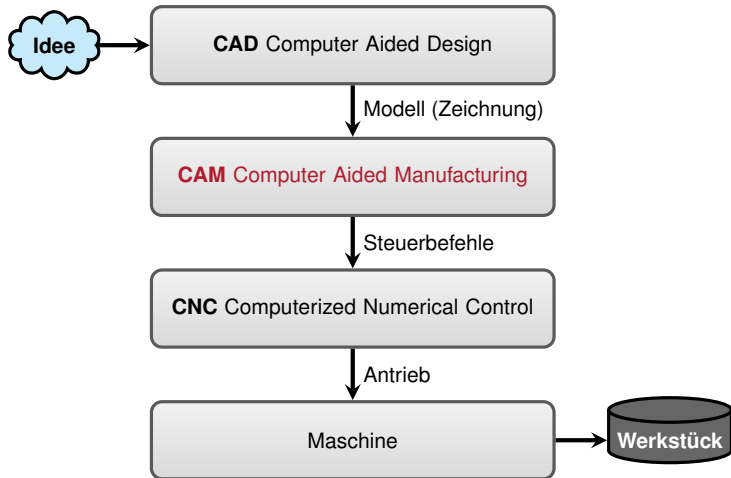
## ■ Klassischer Arbeitsablauf:

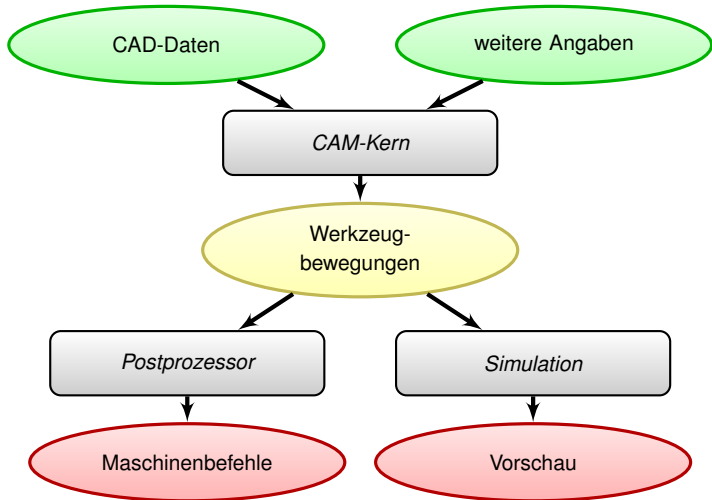
- 1 2D-Zeichnung
- 2 Extrusion (linear oder rotatorisch)
- 3 mehrmals wiederholt,  
Verknüpfen mit bisheriger 3D-Geometrie (Addition, Subtraktion)



- Bedienung der Programme analog zu CSG-Operationen
- typisch: Liste von „Operationen“ (Features)
  
- Rückbezug auf vorherige Geometrie möglich  
z. B. „2cm links vom vorherigen Loch“
- **Parametrische Konstruktion:** Nachträgliche Änderungen möglich, ohne alles neu zu konstruieren (↪ Produktvarianten)
- weitere Funktionen: Rundungen, Freiformflächen, Baugruppen, ...







in Anlehnung an: Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 236, Springer-Verlag 2006 und Russwurm: Die WZM als mech. Sys. Teil 3, Folie 12.



CAD-Zeichnung ist noch keine eindeutige Beschreibung der Fertigung!

- Konstruktion an Fertigung anpassen (Stützstrukturen, Stege)
- Festlegen der Bearbeitungsgänge (Features)
  - Welcher Teil der Zeichnung?
  - Wie bearbeiten? z.B. Innen/Außen fräsen
  - Welches Werkzeug?
  - Parameter wie Drehzahl, Vorschub, Zustellung
  - (bei 2D-CAD für 3D-Werkstück: Tiefenangabe)
- Bei Profi-Programmen: Teilweise „automatische“ Verarbeitung (eingeschränkt)





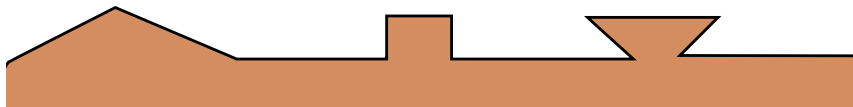
- gewünschte Form soll übrigbleiben
  - Werkzeugform berücksichtigen
  - nicht zuviel wegfräsen, notfalls etwas weniger
- Werkzeugdaten einhalten (Zustellung, Vorschub)
- Maschine nicht beschädigen (Kollisionen)
  - Algorithmus je nach Maschine (Fräsen/Drehen/...) und Bearbeitungstyp
  - unterschiedlichste Strategien möglich



## Werkzeugwege beim 2D-Fräsen: Radiuskorrektur

- Fräser ist kreisrund → „Abrolllinie“ entlang Außenkontur
- stumpfe Ecken sind nicht möglich

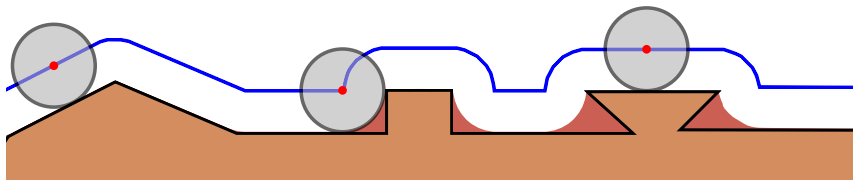
von oben gesehen:



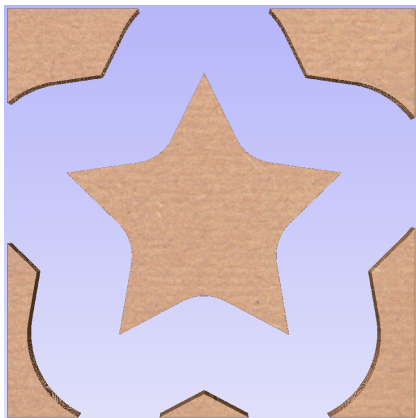
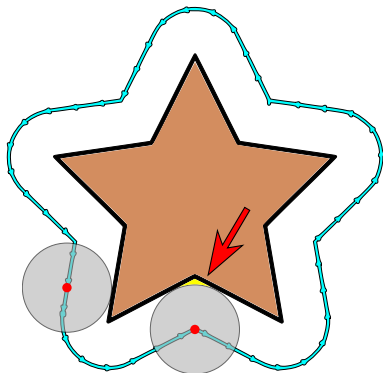
# Werkzeugwege beim 2D-Fräsen: Radiuskorrektur

- Fräser ist kreisrund → „Abrolllinie“ entlang Außenkontur
- stumpfe Ecken sind nicht möglich

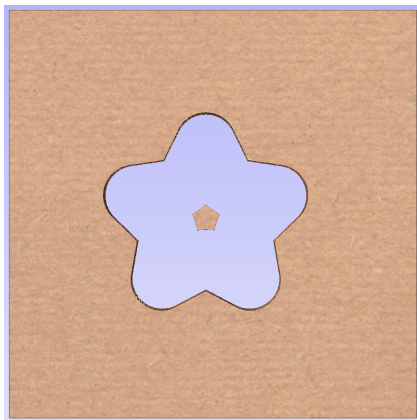
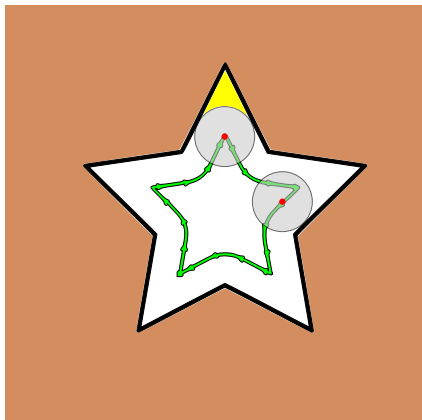
von oben gesehen:



## Beispiel: Ausfräsen eines Sterns



## Beispiel: Einfräsen eines sternförmigen Lochs

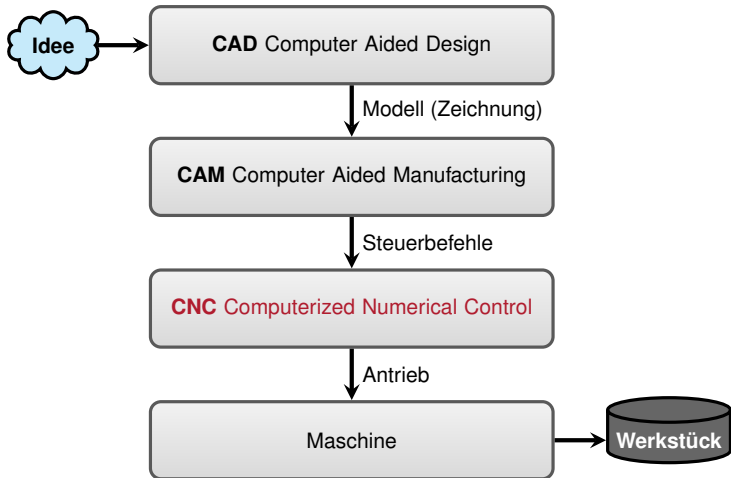


- 2D-Fräsen (feste Tiefe)
  - Kontur fräsen: Radiuskorrektur, wie eben gezeigt
  - Taschenfräsen: zusätzliche Bahnen für Innenfläche
- 3D-Fräsen
  - „Abzeilen“ (*drop-cutter*): vorgegebene X-Y-Bahnen abfahren, Z variabel
  - Schnittebenen (*waterline*): Höhenstufen, wie 2D
  - oft weiterführende Ansätze, Kombinationen



- im FabLab
  - Laserschneiden: VisiCut
  - 3D-Druck: Cura
  - 2D-Fräsen: VCarve
  - Fräsen, Drehen: Autodesk Inventor HSM (Profi-Software)
  - nahezu universell: Skeinforge (sehr kompliziert, nicht mehr in Benutzung)
  
- Besondere Arten
  - mitgeliefert („Treiber“, „Steuersoftware“)
  - in naher Zukunft™: eingebaut (Web-Interface)
  - CAD-CAM-Kombinationen bzw. CAM-Plugins







# Funktionsweise einer CNC-Steuerung

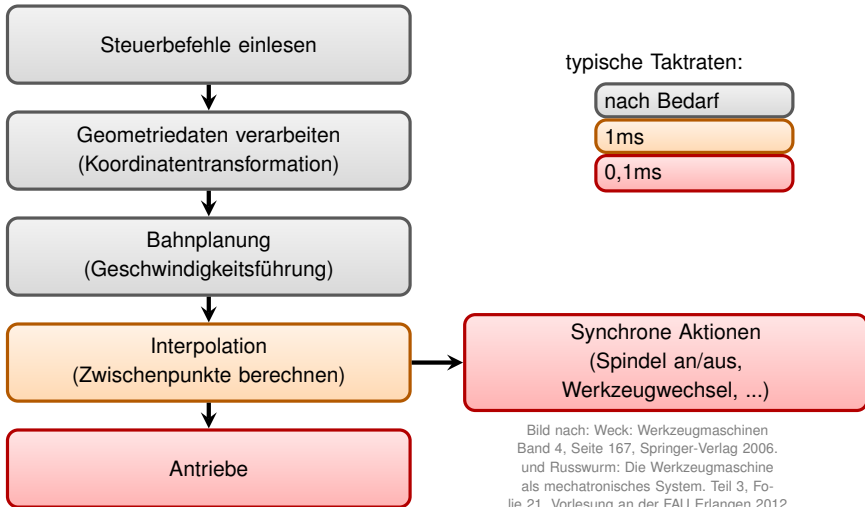
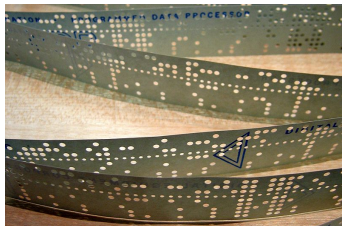


Bild nach: Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 167, Springer-Verlag 2006. und Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 21. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012



- genormt (DIN 66025) + „Dialekt“
- uralt (Lochstreifen-Zeitalter!)
- Klartext (ASCII)
- zeilenweise Ausführung
- fast alle Anweisungen *modal*,  
d.h. solange gültig bis man sie überschreibt




<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Papertape3.jpg>



Ausschnitt aus Video zu einer Abschiedsfeier bei Siemens Stuttgart, 1989



A black and white photograph of an industrial facility, possibly a power plant or refinery. The scene is dominated by a large, complex metal structure on the left, which appears to be a distillation column or a similar piece of heavy machinery. To its right, there are two tall, dark smokestacks. One of the smokestacks is emitting a plume of white smoke that rises into the sky. In the foreground, there is a dark, curved structure that could be a road or a bridge. The overall atmosphere is hazy, suggesting a cloudy day or some form of air pollution. The year '1964' is overlaid in large, bold, blue text with a white outline at the bottom center of the image.

**1964**

- Programm → Sätze (Zeilen) → Wörter
- Zeile (Satz) aus Wörtern, z. B.: N06 G01 X50
- Wort = Buchstabe + Zahlenwert, z.B. X50
- Befehle:
  - G Fahrbefehle / Geometrie
  - M sonstige Befehle
- Argumente:
  - N Zeilennummer (ignoriert)
  - X,Y,Z, (A,B,C,E,...) Koordinaten
  - F Geschwindigkeit
  - ...



## Beispielprogramm: Schlitz fräsen (leicht vereinfacht)

% Beispielprogramm	Programmname
N01 <b>M06</b> T3	Wechsle auf Werkzeug 3
N02 <b>M03</b> S1500	Frässpindel anschalten, 1500 U/min
N03 <b>G00</b> Z40	Fahre im Eilgang nach Z=40 mm
N04 <b>G00</b> X100 Y100	Fahre im Eilgang nach X=100 mm, Y=100 mm
N05 <b>G01</b> F500 Z17	Fahre Gerade mit 500 mm/min nach Z=17 mm
N06    X75	Fahre Gerade mit 500 mm/min nach X=75 mm <i>Beachte: Befehl G01 bleibt bestehen (Lochstreifen sparen!)</i>
N07 <b>G00</b> Z40	Fahre im Eilgang nach Z=40 mm
N08 <b>M02</b>	Spindel aus
N09 <b>M30</b>	Programmende und Zurückspulen



Kann man mit 100 km/h um eine scharfe Kurve fahren? Nein!

## Prinzip aus der Regelungstechnik:

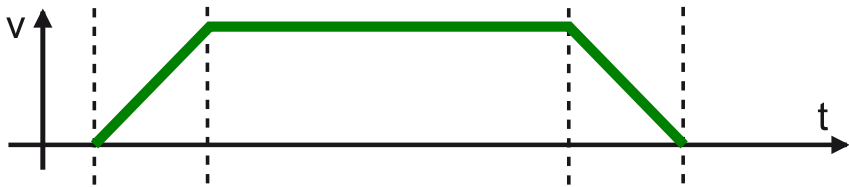
*Der vorgegebene Sollverlauf muss realisierbar sein!*

- Geschwindigkeit → kinetische Energie
  - Beschleunigung → Motorleistung für Energieänderung (begrenzt!)
- ⇒ **Beschleunigung muss begrenzt werden!**



## Lösung: Beschleunigungsrampe

- Geschwindigkeit linear hoch- und runterfahren
- recht einfach programmierbar



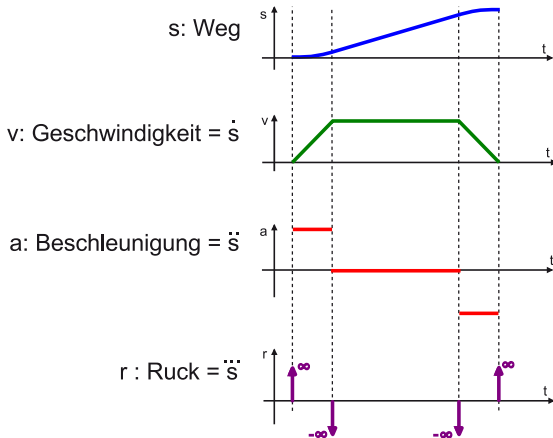
Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 297, Springer-Verlag 2006.

- Problem: Ruck  $\rightarrow$  mechanische Schwingungen
- noch besser: ruckbegrenzt (Beschleunigung linear ändern)





# Beschleunigungsrampe ohne Ruckbegrenzung

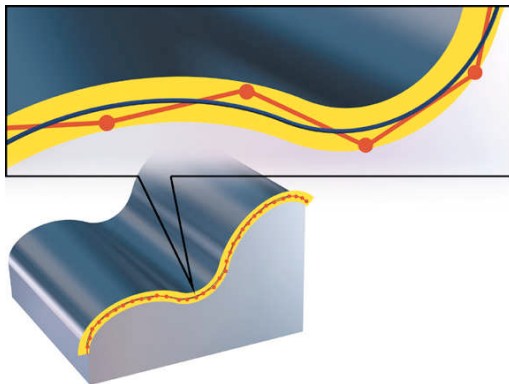


Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 297, Springer-Verlag 2006.



Bisher muss an jedem Eckpunkt ganz angehalten werden!

## 1 Verrunden von Ecken (erlaubte Toleranz)

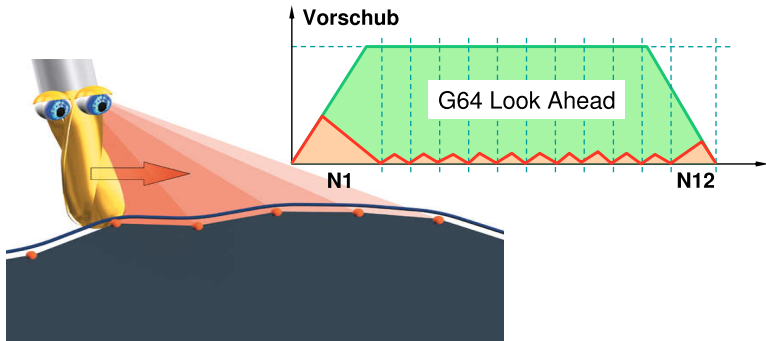


Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 63. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012

# Bahnplanung: Look Ahead

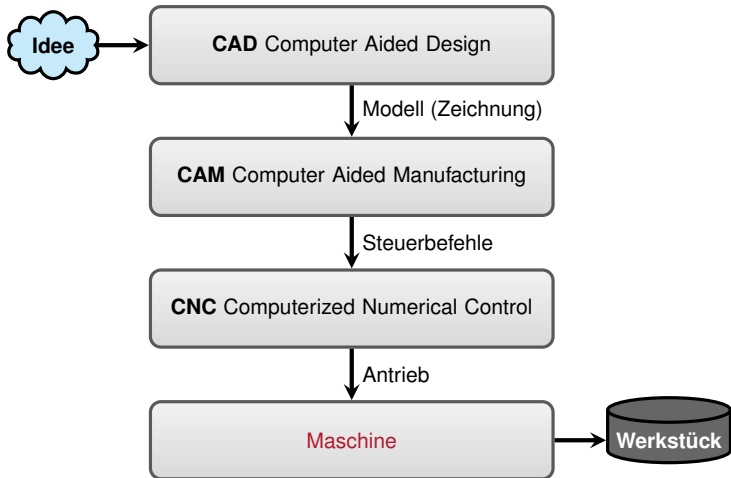
Bisher muss an jedem Eckpunkt ganz angehalten werden!

- 1 Verrunden von Ecken (erlaubte Toleranz)
- 2 Look Ahead: „vorausschauendes Fahren“



Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 67. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012

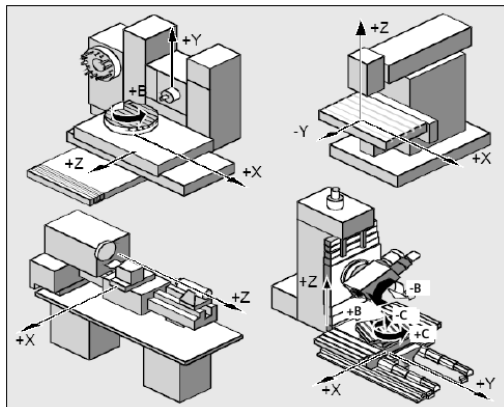




# Werkzeugmaschine

## Definition (Tönshoff, 1995)

Eine Werkzeugmaschine ist eine Arbeitsmaschine, die ein Werkzeug am Werkstück unter gegenseitiger bestimmter Führung zur Wirkung bringt.



Russwurm: Die WZM als mech. Sys. Teil 1, Seite 41



## Definition (Tönshoff, 1995)

Eine Werkzeugmaschine ist eine Arbeitsmaschine, die ein Werkzeug am Werkstück unter gegenseitiger bestimmter Führung zur Wirkung bringt.

- Werkzeug wird definiert (automatisch) bewegt
- Bewegungspfad und Werkzeugform bestimmen das Ergebnis
- Wesentliche Bestandteile: Gestell, Führungen, Antrieb, Steuerung
- Beispiele:
  - Drehmaschine (auch Mehrspindelmaschine)
  - Fräsmaschine (3-Achsig / 5-Achsig)
  - FDM-„3D-Drucker“, Laserschneider, Stanzmaschine, ...
  - Kombinationen (Fräsen + Additive Fertigung, ...)
  - hohe Automatisierung möglich: Werkzeug- und Werkstückwechsel, Spanabfuhr



- 1 Einleitung
- 2 Fertigungsverfahren: Übersicht
- 3 Zerspanung
- 4 Computerunterstützte Fertigung
- 5 Zusammenfassung**



- 1 In Achsen verschiebbare Anordnung
- 2 Zerspanung: Abtrag von Spänen
- 3 Problem: Rattern
- 4 Parameter müssen korrekt in Abhängigkeit von Werkzeug, Material und Durchmesser gewählt werden



<http://www.hsckling.de/files/zerspanung3.jpg>



- 1 Idee
- 2 CAD: Entwurf
- 3 CAM: Fertigungsdaten
- 4 CNC: Maschinensteuerung
- 5 (Werkzeug-)Maschine
- 6 fertiges Werkstück



[http://egg-bot.com/uploads/images/3\\_600.jpg](http://egg-bot.com/uploads/images/3_600.jpg)

- Zerspanung und Fertigungsverfahren
  - Hoffmann Group: Zerspanungshandbuch (im FabLab vorrätig, enthält Tabellen)
  - Guerrilla guide to CNC machining, mold making, and resin casting  
<http://lcamtuf.coredump.cx/gcnc/>
  - (Wallroth: Drehen und Fräsen im Modellbau. vth 2004) (bei Max ausleihbar)
  - Fritz/Schulze: Fertigungstechnik. Springer, 2010 (auch als ebook)
  - Dubbel: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau
  
- Werkzeugmaschinen und CAD-CAM-Kette
  - Hehenberger: Computerunterstützte Fertigung. Springer, 2011
  - Weck: Werkzeugmaschinen, Band 4. Springer, 2006
  - Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System  
→ Vorlesung im Wintersemester



Zwei Übungsblätter:

- 1 CAD
- 2 CNC-Fertigung



42



Dankeschön an

- Patrick für die Grundlage einiger Folien
- Emanuel und Co für das Fräsenvideo
- eine große Erlanger Firma für die Bereitstellung von Frästeilen



## 6 Bonusmaterial



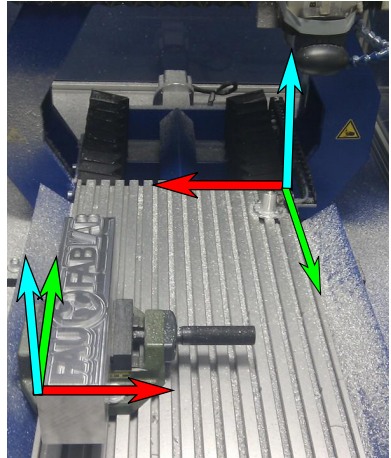
# Koordinatensysteme und Transformationen

Maschinen-KS (fest)



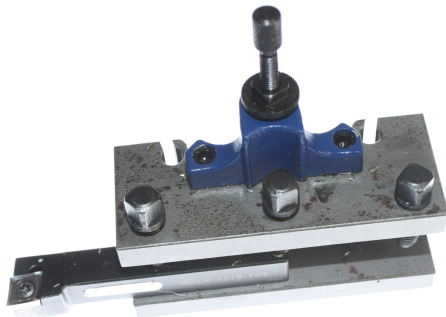
Werkzeuglänge  
Verschiebung  
Drehung

Werkstück-KS



[https://fablab.fau.de/sites/fablab.fau.de/files/images/2013-01-20\\_03.38.17.jpg](https://fablab.fau.de/sites/fablab.fau.de/files/images/2013-01-20_03.38.17.jpg)





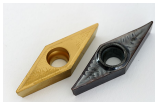
- Wichtigstes Werkzeug
- Nimmt Wendeschneidplatte auf
- An Aufgaben angepasste Formen verfügbar



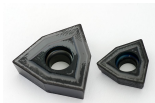
- allgemeine Bezeichnung: Drehmeißel
- Verwendung von Wendeschneidplatten
- Einteilung in Drehverfahren (Auswahl):
  - Längsdrehen - Plandrehen - Stehdrehen
  - Schruppen - Schlichten
  - Rändeln



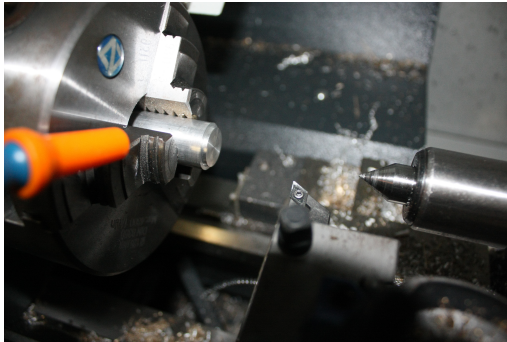
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wendeschneidp>



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wendeschneidp>



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wendeschneidp>



- Absolute Fertigungsgenauigkeit: ca. 0,1 mm
- Bearbeitbarer Materialdurchmesser: 100 mm
- Leistung der Hauptspindel: 2 kW



## Schrittmotor

- + hält Position bauartbedingt
- Schrittverlust, wenn Haltemoment überschritten! (dauerhafter Positionsfehler)

## Servomotor

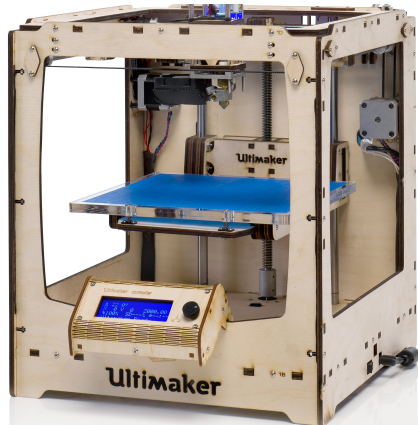
- normaler DC-Motor + Positionsmessung
- Positionsregelung
- + kein Schrittverlust
- + schneller
- i.d.R. teurer



# Realisierung im Hobby-Bereich: einfachste Hardware

- Einfacher Mikrocontroller (20€)
- Firmware oft: grbl, Marlin
- z.B. Arduino + Aufsteckplatine
- Beispiel: 3D-Drucker Ultimaker

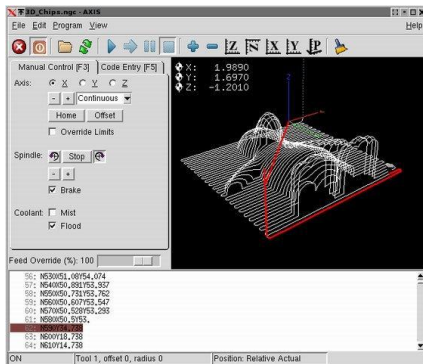
Preis zuzüglich Motoren und  
Ansteuerung (50-500€)



<https://www.ultimaker.com/3d-printers/49/Original-Ultimaker-Original-Press-kit.zip>



- **Embedded-Linux-System (45€)**
    - Basis: Beaglebone, Raspberry Pi
    - meist nur zusammen mit einem Mikrocontroller
  - **Standard-PC (0€)**
    - Pentium 4 vom Sperrmüll
    - LinuxCNC (Linux + RTAI Echtzeiterweiterung)
    - LPT-Port oder spezielle IO-Karte
- Preise zuzüglich Motoren und Ansteuerung (50-500€)



<http://a.fsdn.com/con/app/proj/emc/screenshots/44896.jpg>



- Mikrocontroller (grbl, Marlin und Verwandte)
  - 3D-Drucker Ultimaker
  - 3D-Drucker Makerbot Replicator (basierend auf grbl)
- Mikrocontroller (sonstige Firmware)
  - CNC-Fräse BZT
  - CNC-Drehbank Wabeco
  - Lasercutter Epilog Zing (MC + FPGA)
  - Stickmaschine, ...
  - eggbot



- **PC mit LinuxCNC**
  - Lasercutter Lasersaur
  - Wabeco-Drehbank im FAU FabLab
  - fliegendes Halloween-Gespentst für den Garten
  - ALLES vorstellbare ...
- **Embedded-Linux-Systeme**
  - günstige Hardware existiert, aber keine nennenswerten Projekte
  - weniger leistungsfähig als echter PC
- **Profi-Steuerungen (sehr schnelle eingebettete Systeme)**
  - „richtige“ Fräsmaschinen
  - Roboter mit Kettensäge (youtube: 7Xstool)

