

DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Maximilian Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2017



DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Computerunterstützte Fertigung: Zerspanung

Maximilian Gaukler

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Sommersemester 2017



Vorwort

- 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



Gliederung

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



Fertigungsverfahren

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



Fertigungsverfahren: Trennen

- 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



Gliederung

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



Zerspanung

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



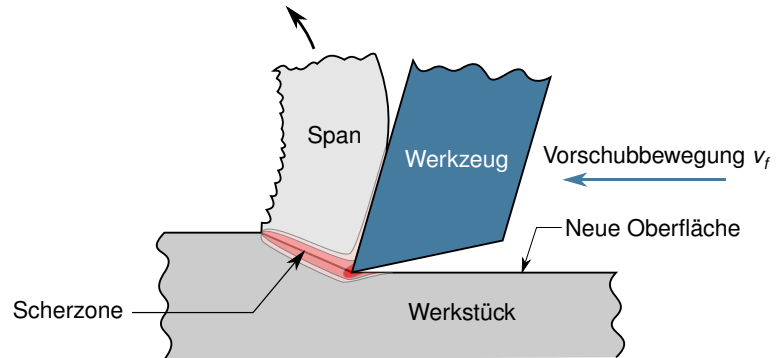
http://www.ktm-gmbh.de/images/top/start_zerspanung.jpg

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



Spanbildung: einfaches Modell

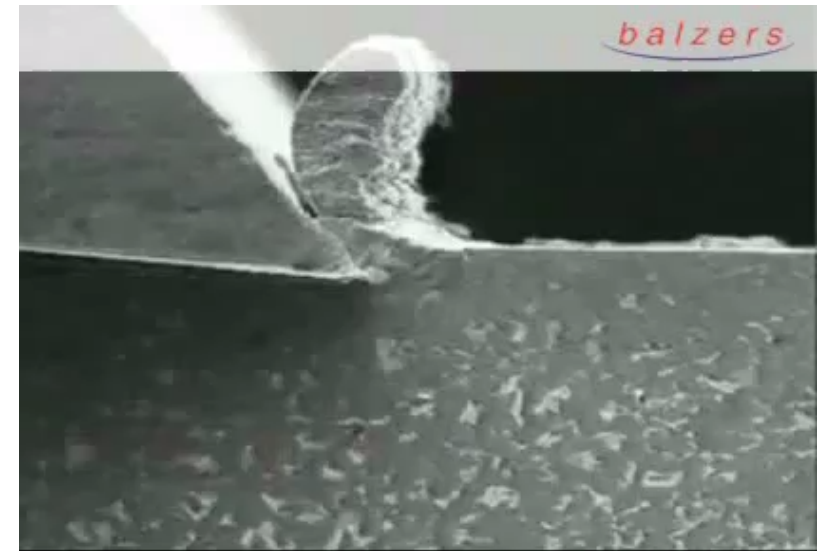
- Relativbewegung Werkzeug – Werkstück (Schnittgeschwindigkeit v_f)
- Hartes Werkzeug mit scharfer Kante wirkt als „Spaltkeil“
- Hohe mechanische Spannung in der Scherzone
- Trennung des Spans durch Abscheren, Fließen oder Abreißen



abgeändert von https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3AMetal_Cut_diag.svg,
CC-BY-SA 3.0, Autoren: Sumanch und Swisstack auf Wikimedia Commons



Spanbildung: Video



<https://www.youtube.com/watch?v=DBBBK57haMw>



Drehen

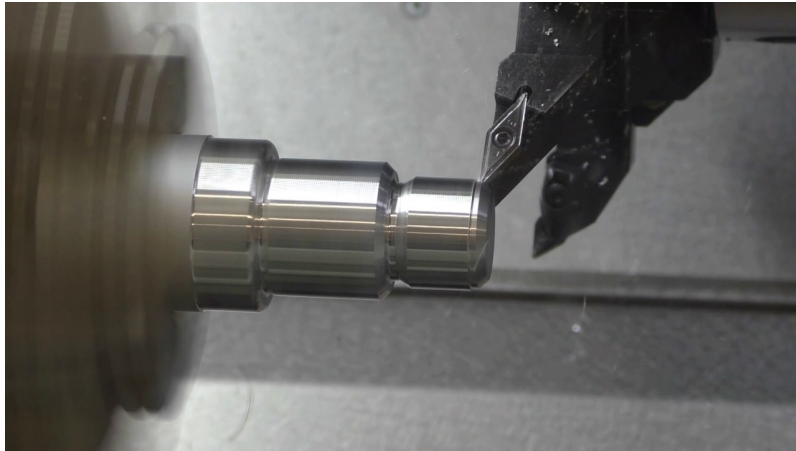


Drehmaschine: Proxxon, <http://www.proxxon.com/de/micromot/24400.php>; Werkstück: eigenes Bild

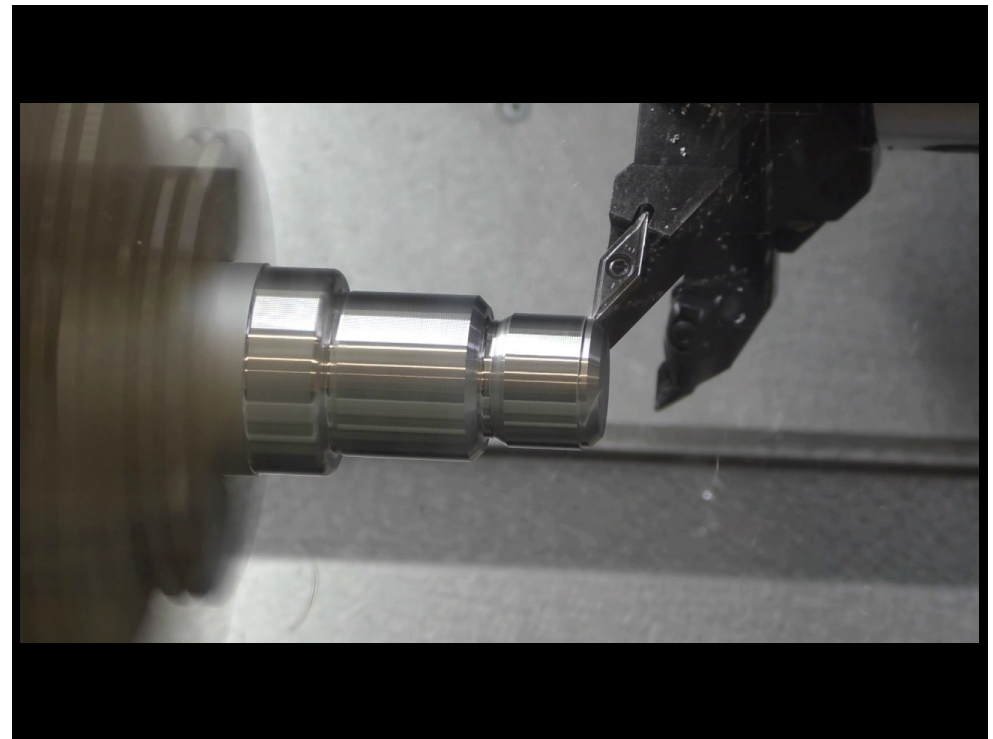
- Prinzip: Werkstück dreht schnell um Drehachse (Z)
- Werkzeug (Drehmeißel) bewegt sich in dazu senkrechter Ebene (X-Y)
- Herstellung **rotationssymmetrischer Teile** (Sonderfunktion: Gewinde)



Drehen: Video

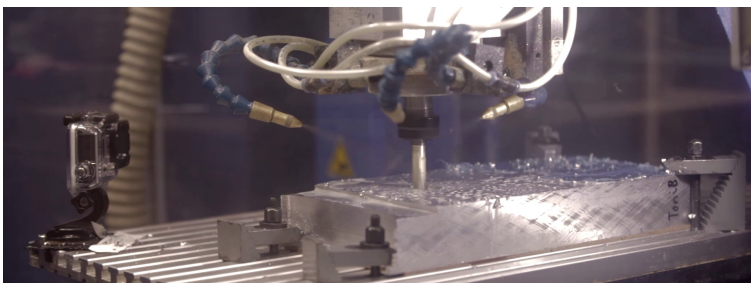


<https://www.youtube.com/watch?v=zjk7yxzr738>

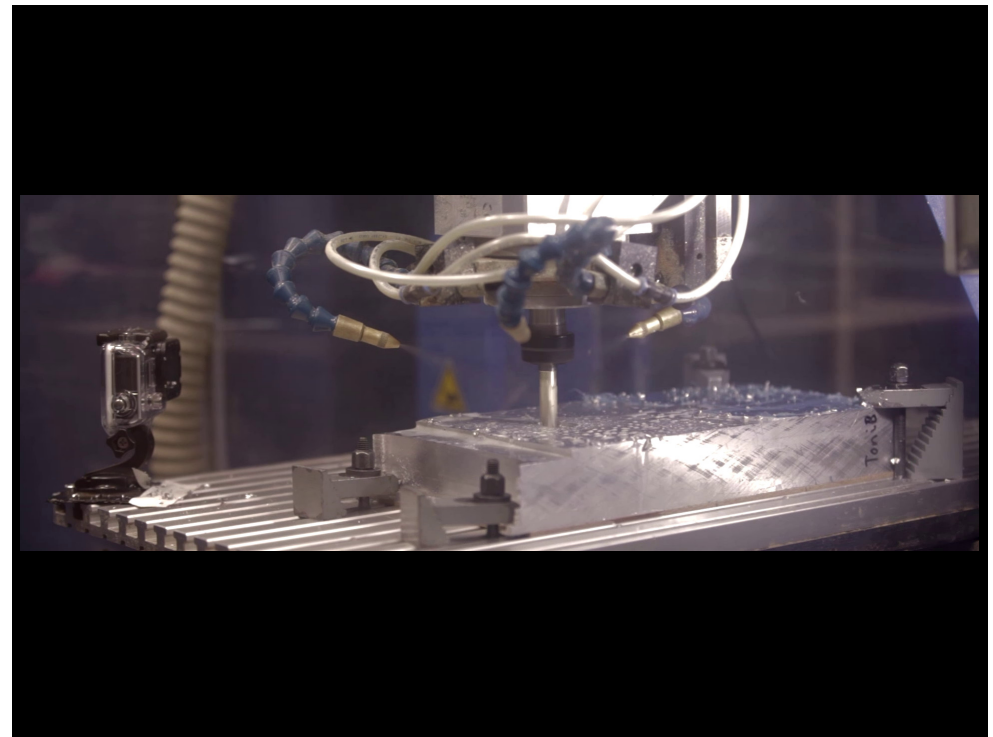


Fräsen (3-achsig)

- 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



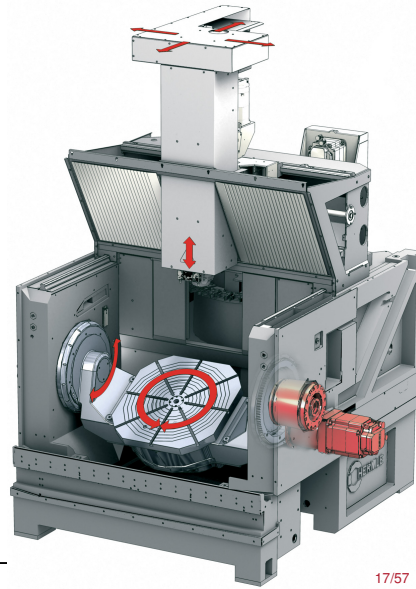
<https://www.youtube.com/watch?v=Ump02M7ntvM>



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



17/57



Parameter beim Fräsen (bzw. Drehen)

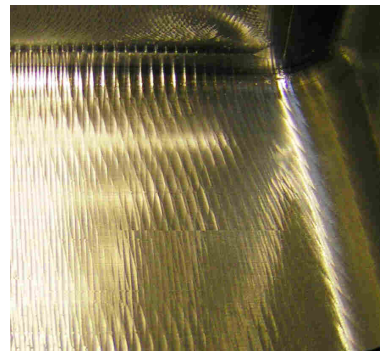
- Abhängig von Werkzeug und Material des Werkstücks
- Konstanten:
 - **Schneidenzahl** (z) des Fräasers (Drehen: $z = 1$)
 - **Fräserdurchmesser** (D) (Drehen: Werkstückdurchmesser)
- Angaben in Tabellenbuch bzw. Datenblatt:
 - **Schnittgeschwindigkeit** (v_c) zwischen Schneide und Werkstück
→ Drehzahl $n = \frac{v_c}{\pi D}$
 - **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, ...



18/57

Oberflächengüte und Maßhaltigkeit

- 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

19/57



Gliederung

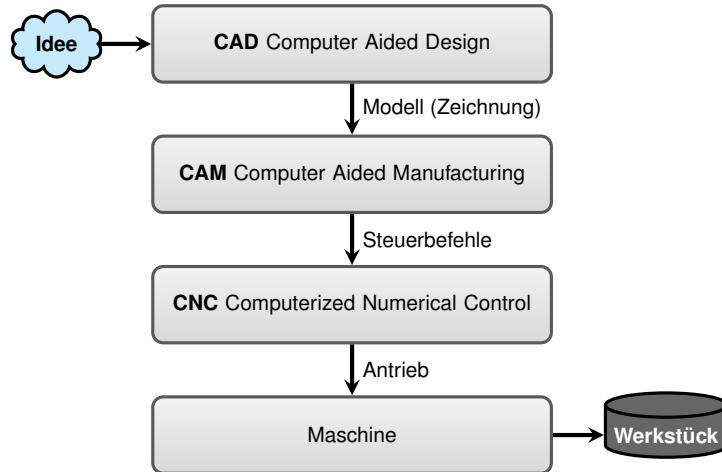
- 1 Einleitung
- 2 Fertigungsverfahren: Übersicht
- 3 Zerspantung
- 4 Computerunterstützte Fertigung
- 5 Zusammenfassung



20/57

Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)



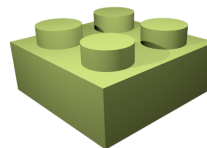
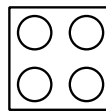
Konstruktion: Festlegen der Geometrie

- Idee \leadsto Konzept \leadsto 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)



CAD: Computer-Aided Design

- **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),
 - **Skriptsprache:** OpenSCAD
 - **Parametrische Modellierung** (Profi-Programme):
Autodesk Inventor, NX, CATIA, SolidWorks, Creo, Solid Edge, ..., FreeCAD (eingeschränkt)



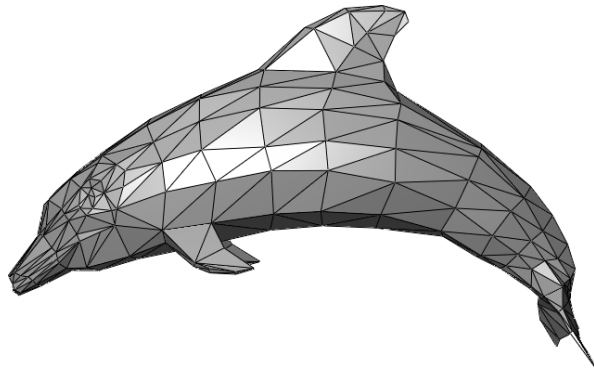
Repräsentation von 3D-Objekten

- 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 \leadsto 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)



Flächenmodell: Polygonnetze

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



https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADolphin_triangle_mesh.svg,
Public Domain, Autor: Chrschn, via Wikimedia Commons



Flächenmodell: Polygonnetze

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

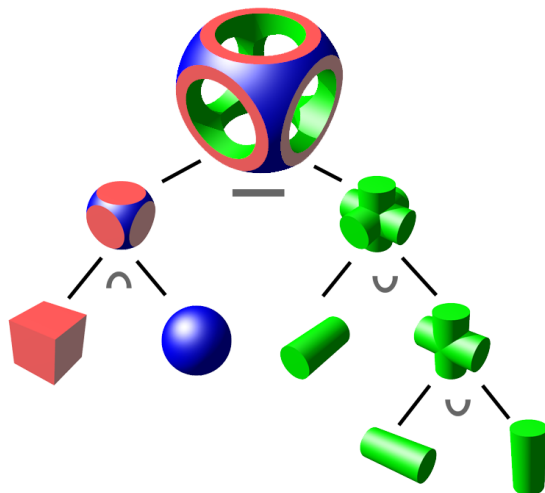
Bei manueller Bearbeitung leicht zu verletzen!

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



Volumenmodell: Computational Solid Geometry (CSG)

Mengenmäßige (boolsche) Verknüpfung von Grundkörpern

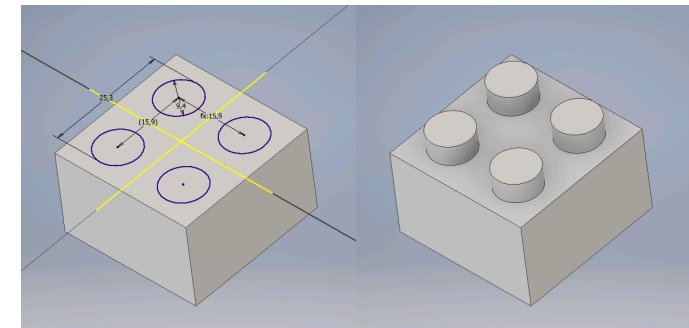


http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Csg_tree.png, CC-BY-SA 3.0, Autoren auf WP Commons: Zottie, Hawky,diddiz



Erstellung von 3D-Volumenmodellen

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

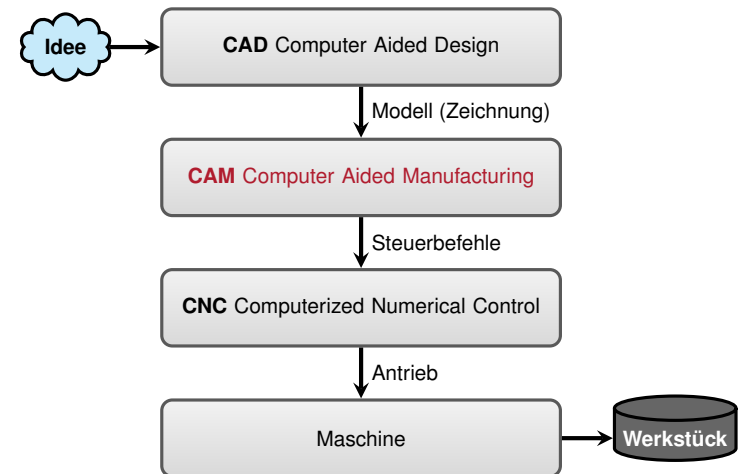


Erstellung von 3D-Volumenmodellen

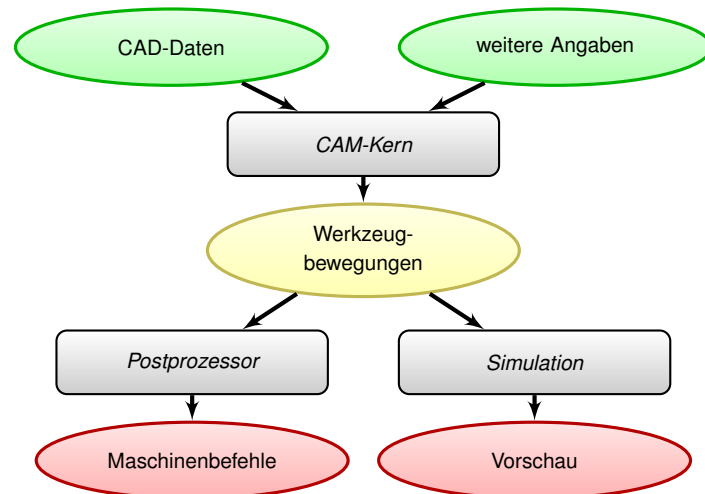
- Bedienung der Programme analog zu CSG-Operationen
- typisch: Liste von „Operationen“ (Features)
- Rückbezug auf vorherige Geometrie möglich
z. B. „2cm links vom vorherigen Loch“
- **Parametrische Konstruktion:** Nachträgliche Änderungen möglich, ohne alles neu zu konstruieren (↔ Produktvarianten)
-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



Gliederung



CAM: Computer Aided Manufacturing



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



Zusatzinformationen

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)



Berechnung der Werkzeugwege

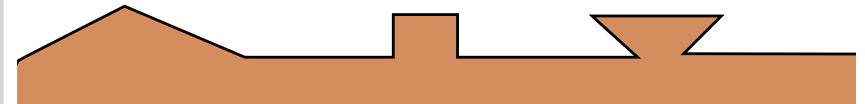
- gewünschte Form soll übrigbleiben
→ Werkzeugform berücksichtigen
→ nicht zuviel wegfräsen, notfalls etwas weniger
 - Werkzeugdaten einhalten (Zustellung, Vorschub)
 - Maschine nicht beschädigen (Kollisionen)
- Algorithmus je nach Maschine (Fräsen/Drehen/...) und Bearbeitungstyp
→ unterschiedlichste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



Werkzeugwege beim 2D-Fräsen: Radiuskorrektur

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

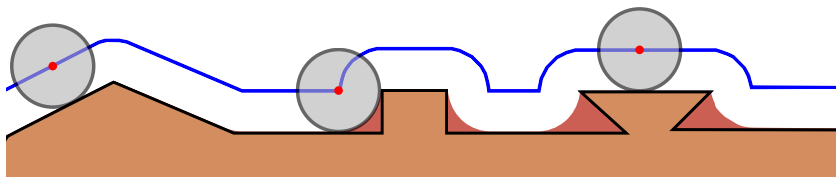
von oben gesehen:



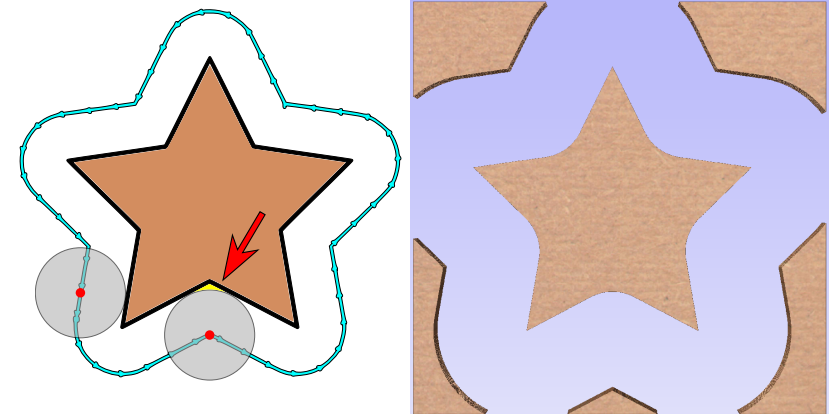
Werkzeugwege beim 2D-Fräsen: Radiuskorrektur

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

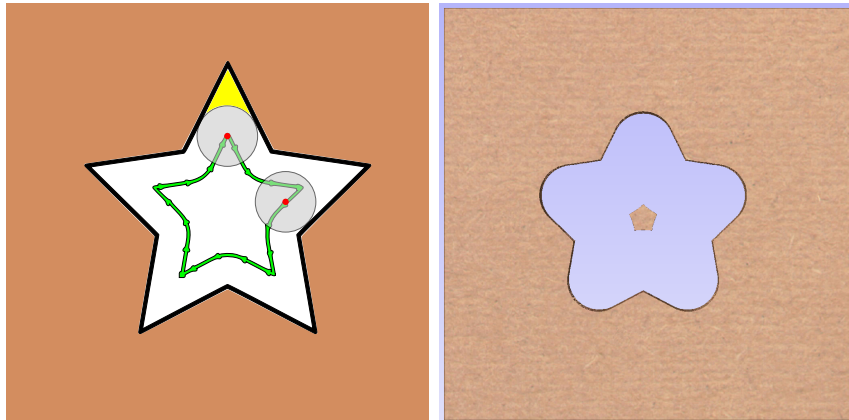
von oben gesehen:



Beispiel: Ausfräsen eines Sterns



Beispiel: Einfräsen eines sternförmigen Lochs



Werkzeugwege beim Fräsen

- 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

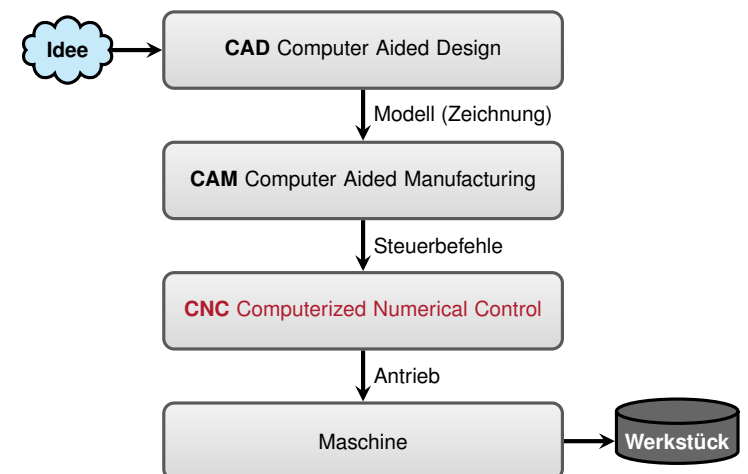


CAM-Programme

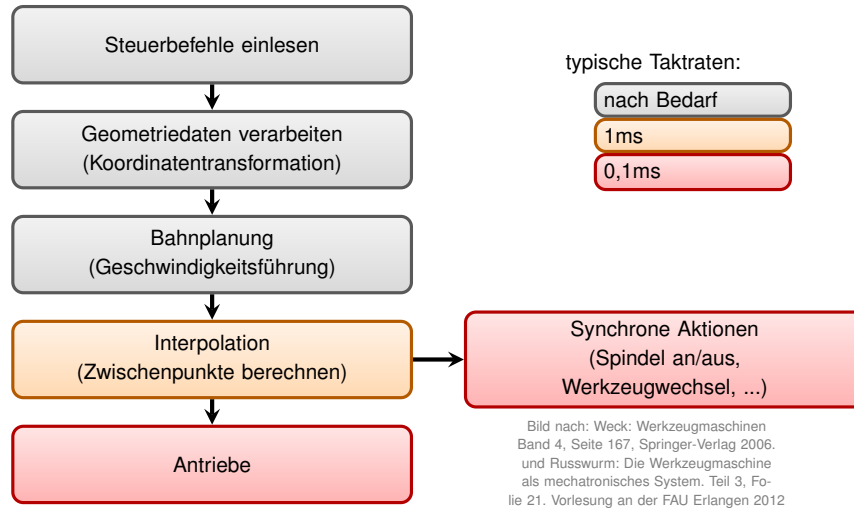
- im FabLab
 - Laserschneiden: VisiCut
 - 3D-Druck: Cura
 - 2D-Fräsen: VCarve
 - Fräsen, Drehen: Autodesk Inventor HSM (Profi-Software)
 - nahezu universell: Skeinforge (sehr kompliziert, nicht mehr in Benutzung)
- Besondere Arten
 - mitgeliefert („Treiber“, „Steuersoftware“)
 - in naher Zukunft™: eingebaut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



Gliederung



Funktionsweise einer CNC-Steuerung



Steuerbefehle: G-Code

- 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>



Video: Anfänge der computerunterstützten Fertigung



Ausschnitt aus Video zu einer Abschiedsfeier bei Siemens Stuttgart, 1989



Steuerbefehle: G-Code

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



Problem: Geschwindigkeitsführung

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

Prinzip aus der Regelungstechnik:

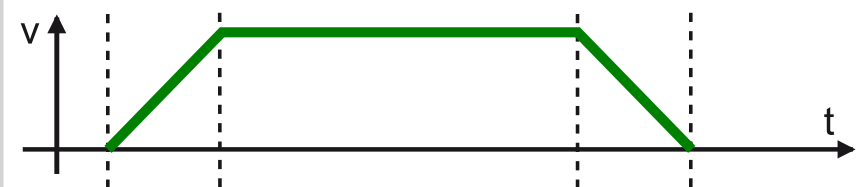
Der vorgegebene Sollverlauf muss realisierbar sein!

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



Lösung: Beschleunigungsrampe

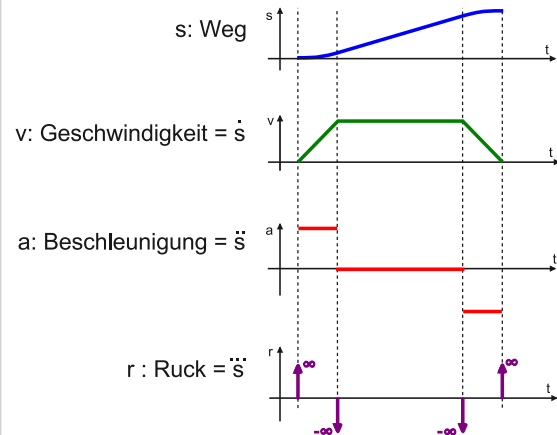
- Geschwindigkeit linear hoch- und runterfahren
- recht einfach programmierbar



- Problem: Ruck → mechanische Schwingungen
- noch besser: ruckbegrenzt (Beschleunigung linear ändern)



Beschleunigungsrampe ohne Ruckbegrenzung



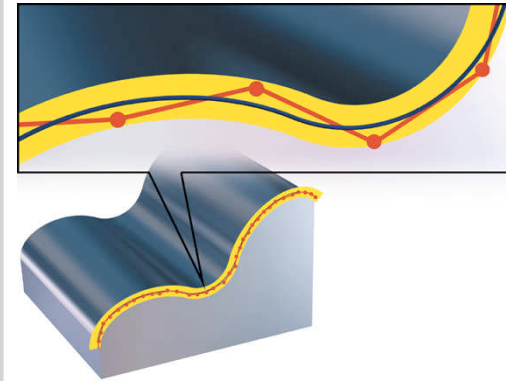
Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 297, Springer-Verlag 2006.



Bahnplanung: Look Ahead

Bisher muss an jedem Eckpunkt ganz angehalten werden!

- 1 Verrunden von Ecken (erlaubte Toleranz)



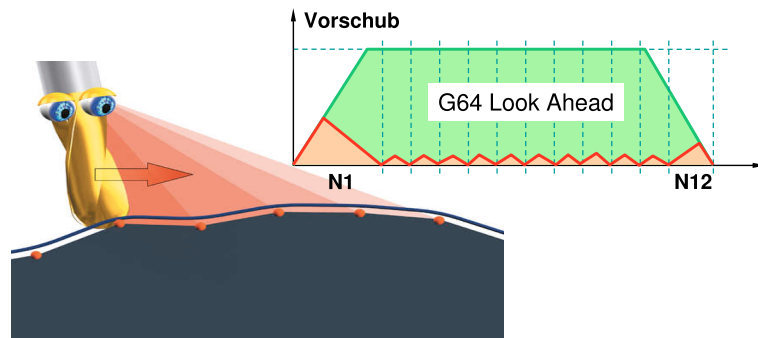
Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 63. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012



Bahnplanung: Look Ahead

Bisher muss an jedem Eckpunkt ganz angehalten werden!

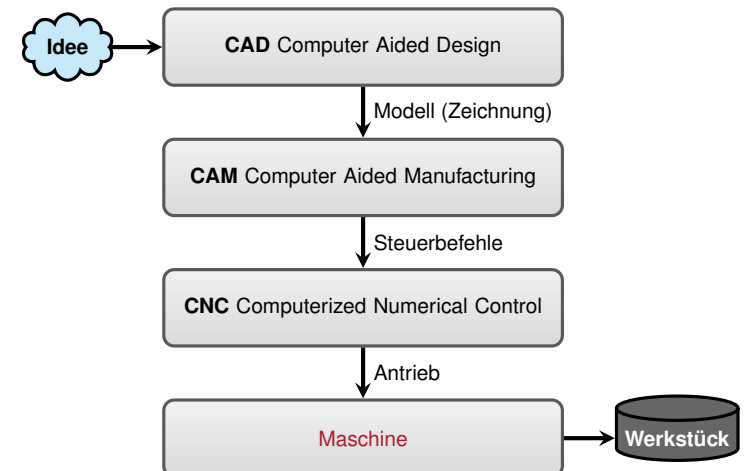
- 1 Verrunden von Ecken (erlaubte Toleranz)
- 2 Look Ahead: „vorausschauendes Fahren“



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



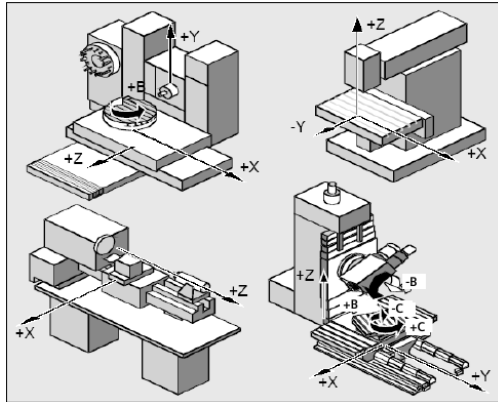
Gliederung



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



Werkzeugmaschine

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



Gliederung

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



Rückblick: Zerspanung

- 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.hsckicking.de/files/zerspanung3.jpg>



Rückblick: computerunterstützte Fertigung

- 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



Literatur

- 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



Übungsaufgabe: CAD

- Mache dich mit 3D-Modellierung vertraut, um den Inhalt der Vorlesung zu wiederholen und zu vertiefen.
- Dokumentiere deine Ergebnisse und Erkenntnisse in einem Dokument (Webseite oder PDF) mit Screenshots und aussagekräftigen Sätzen.
- Bearbeitung in Gruppen, Kurzvorstellung am Mi 28.6. (Losverfahren), Einsendung am Tag vorher an diy-orga@fablab.fau.de
- Vorschlag für Umfang und Inhalt:
 - Konstruktion interessanter Teile für euer Projekt oder aus dem Alltag
 - Probieren und Vergleichen:
 - Skriptsprache (OpenSCAD o. ä.), direkte Modellierung, parametrische Modellierung (2D-Skizzen als Grundlage, nachträglich Parameter ändern, Baugruppen)
 - Programme, die in der Vorlesung nicht genannt wurden. (z. B. online im Browser)
 - Umgang mit Dreiecksnetzen (STL): Erstellen, bearbeiten und kaputtmachen — Was passiert dabei in der Vorschau für den 3D-Druck (z. B. Cura)? Inwiefern kann man fertige STLs aus dem Internet nachbearbeiten? Womit (nicht)? Wieso?
 - Welche Erkenntnisse habt ihr gewonnen?



Fragen...

42



Danksagung

Dankeschön an

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



Gliederung

6 Bonusmaterial

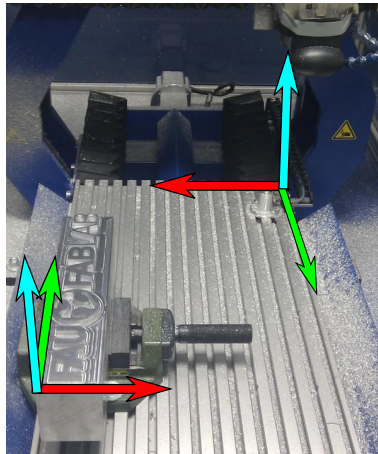


Koordinatensysteme und Transformationen

Maschinen-KS (fest)

Werkzeu-
länge
Verschiebung
Drehung

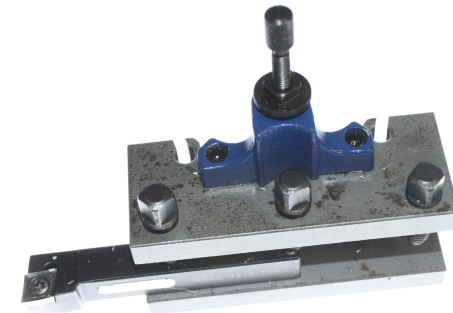
Werkstück-KS



https://fablab.fau.de/sites/fablab.fau.de/files/images/2013-01-20_03.38.17.jpg



Der Drehmeißel



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

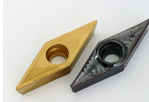


Drehwerkzeuge

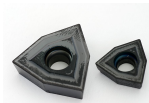
- allgemeine Bezeichnung: Drehmeißel
- Verwendung von Wendeschneidplatten
- Einteilung in Drehverfahren (Auswahl):
 - Längsdrehen - Plandrehen - Stechdrehen
 - Schruppen - Schlichten
 - Rändeln



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WendeschneidplatteStech.jpg>



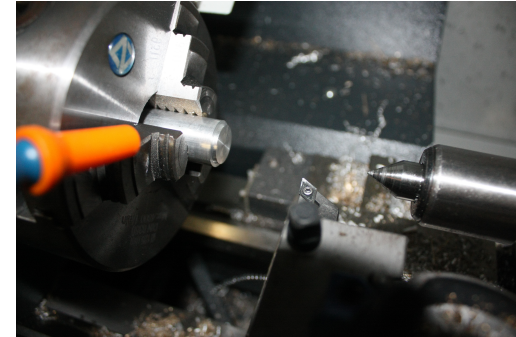
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WendeschneidplatteSchlicht.jpg>



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WendeschneidplatteSchrupp.jpg>



Die Drehmaschine des FAU FabLab



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



Typische Antriebe

Schrittmotor

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

Servomotor

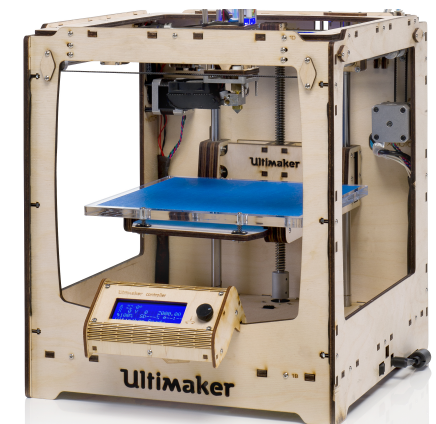
- normaler DC-Motor + Positionsmessung
- Positionsregelung
- kein Schrittverlust
- schneller
- ➖ i.d.R. teurer



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€)

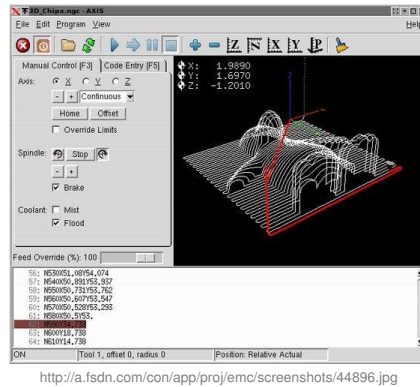


<https://www.ultimaker.com/original-price-quiz>



Realisierung im Hobby-Bereich: bessere Hardware

- **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€)



Maschinen (Beispiele)

- **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



Maschinen (Beispiele)

- **PC mit LinuxCNC**
 - Lasercutter Lasersaur
 - Wabeco-Drehbank im FAU FabLab
 - fliegendes Halloween-Gespent 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)

