

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



- Ziel der heutigen Vorlesung ist ein *Grundverständnis*
 - des Ablaufs von der Skizze bis zum fertigen Werkstück
 - der zerspanenden Fertigung



- 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.



- 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.



- 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



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



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

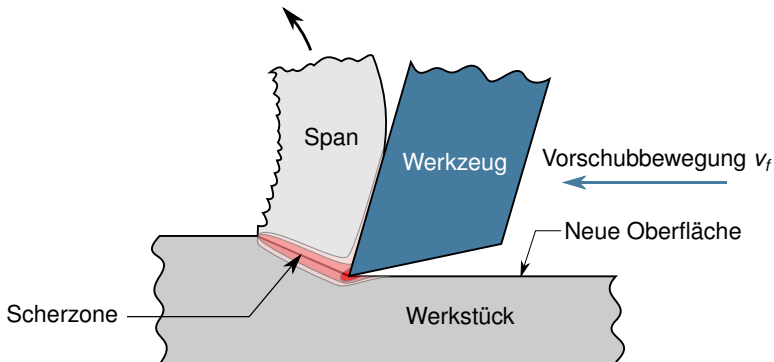


http://www.ktm-gmbh.de/images/top/start_zerspanung.jpg

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

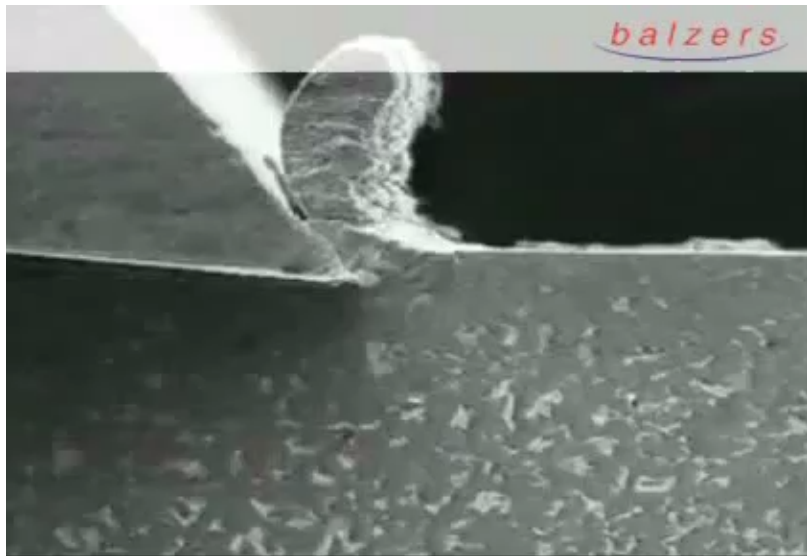
Spanbildung: einfaches Modell

- 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

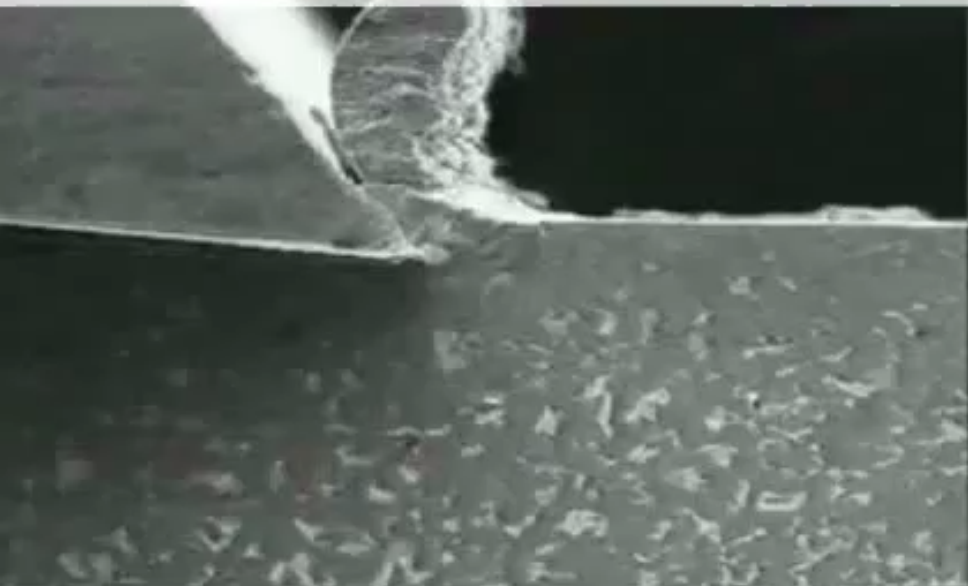




<https://www.youtube.com/watch?v=DBBBKS7haMw>



balzers





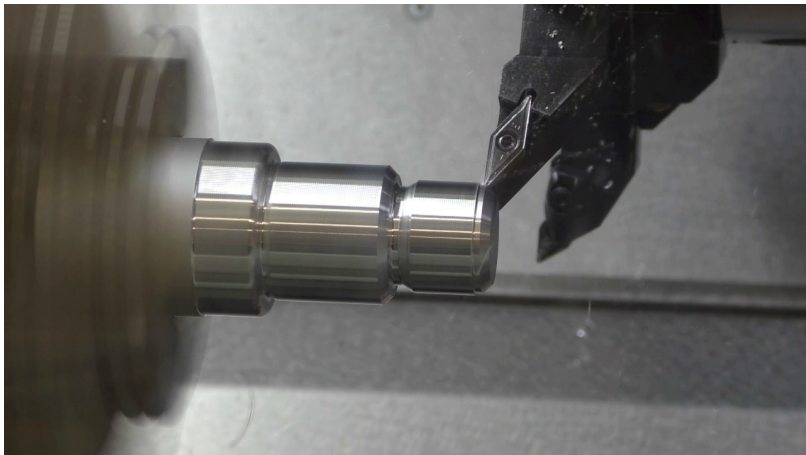
Drehmaschine: Proxxon, <http://www.proxxon.com/de/micromot/24400.php>; Werkstück: eigenes Bild

- Prinzip: Werkstück dreht schnell um Drehachse (Z)
- Werkzeug (Drehmeißel) bewegt sich in dazu senkrechter Ebene (X-Y)



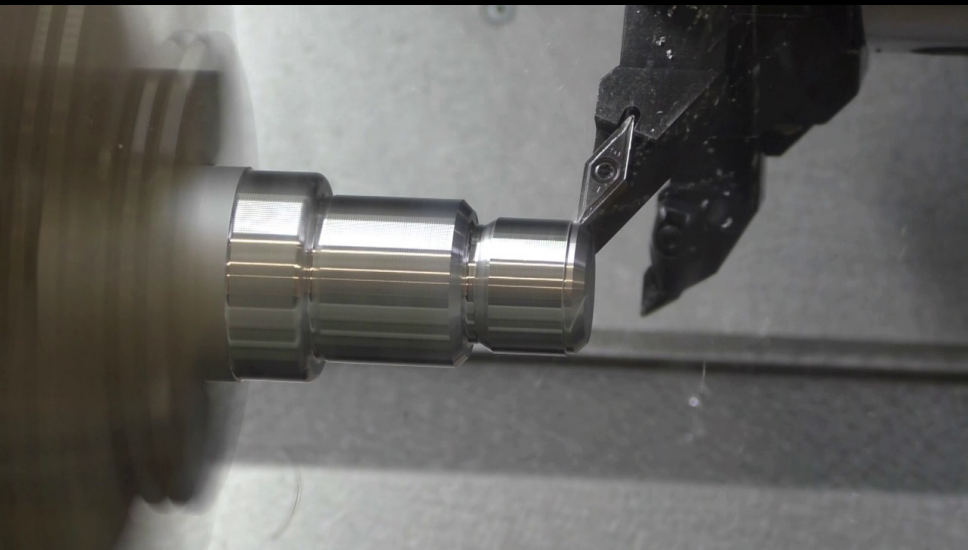
Drehmaschine: Proxxon, <http://www.proxxon.com/de/micromot/24400.php>; Werkstück: eigenes Bild

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



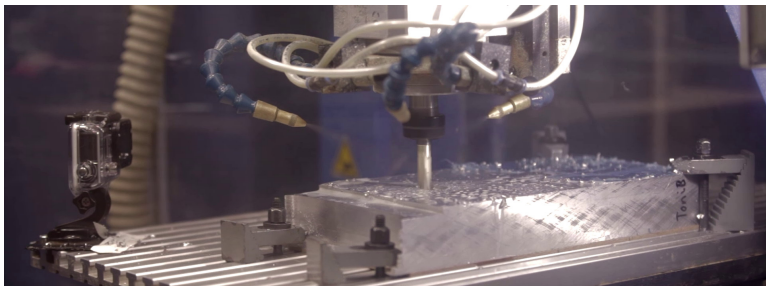
<https://www.youtube.com/watch?v=zjk7yxzr738>





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

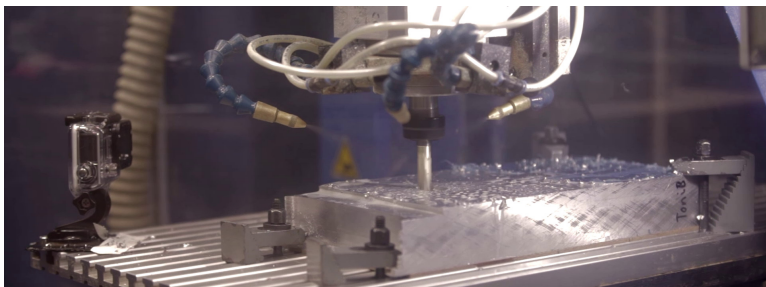


<https://www.youtube.com/watch?v=UMpQ2M7ntvM>



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

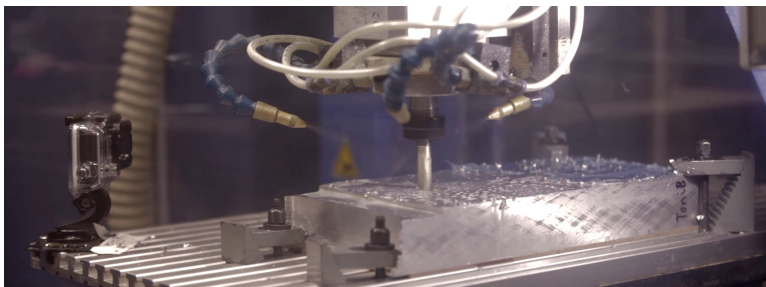


<https://www.youtube.com/watch?v=UMpQ2M7ntvM>



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



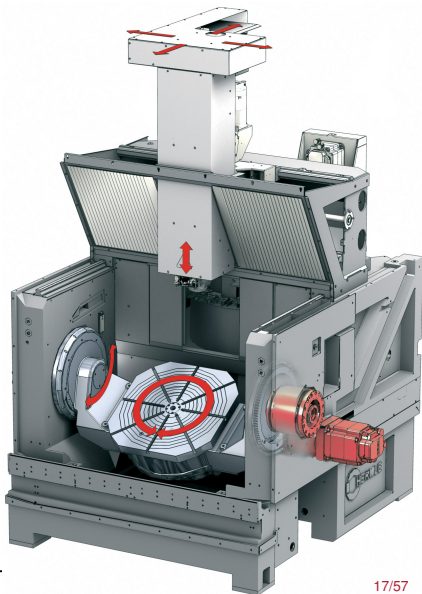
<https://www.youtube.com/watch?v=UMpQ2M7ntvM>



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,
Berthold Hermle AG, CC-BY-SA 3.0



Parameter beim Fräsen (bzw. Drehen)

- Abhängig von Werkzeug und Material des Werkstücks
- Konstanten:
 - **Schneidenzahl** (z) des Fräsers (Drehen: $z = 1$)
 - **Fräserdurchmesser** (D) (Drehen: Werkstückdurchmesser)



Parameter beim Fräsen (bzw. Drehen)

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



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 $v_f = z n f_z$

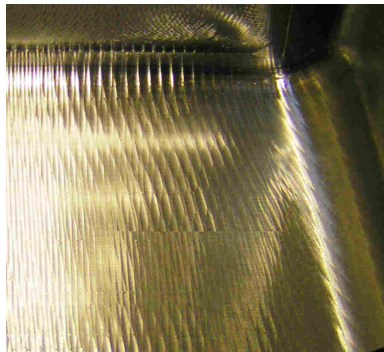


Parameter beim Fräsen (bzw. Drehen)

- 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, ...

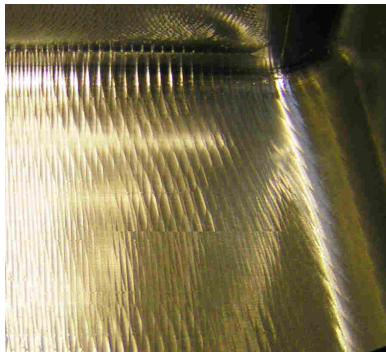


- Problem: „Instabilität“ des Zerspanungsprozesses (Rattern)



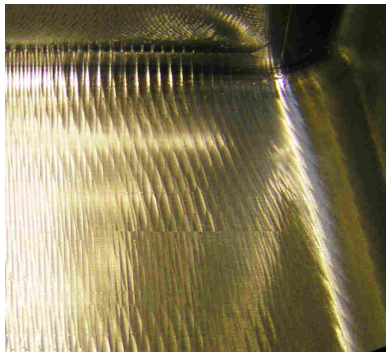
www.wzl.rwth-aachen.de/de/468fc71f212b56ccc12570ae0050f6d7/Rattermarken3.jpg

- Problem: „Instabilität“ des Zerspanungsprozesses (Rattern)
- Ursache: Elastizität
 - der Maschine (Gerüst, Antriebe)
 - des Werkzeugs (Länge-Durchmesser-Verhältnis)
 - des Werkstücks (Aufspannung, Dicke)



www.wzl.rwth-aachen.de/de/468fc71f212b56ccc12570ae0050f6d7/Rattermarken3.jpg

- 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

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



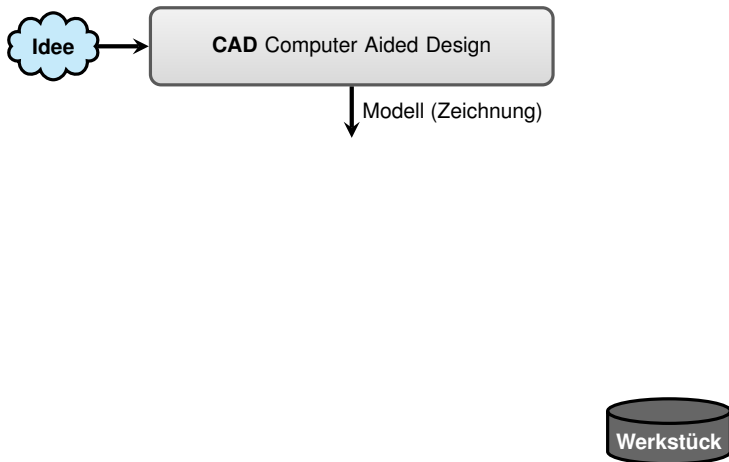
Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)



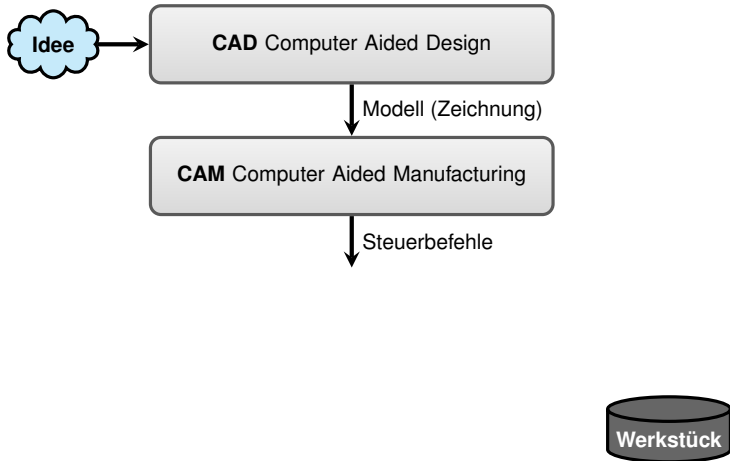
Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)



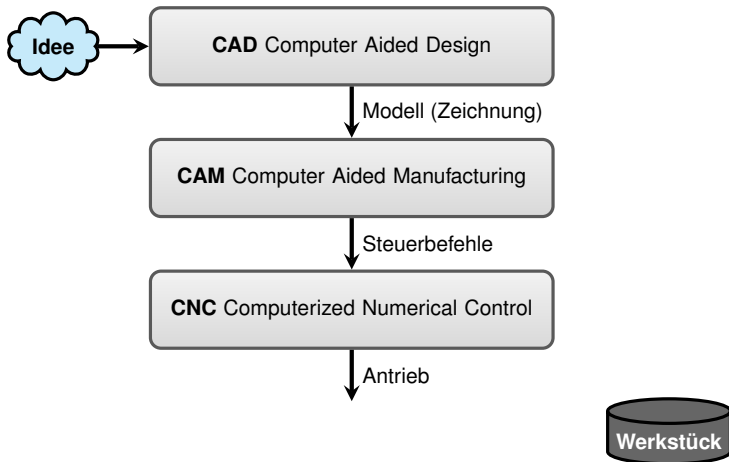
Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)



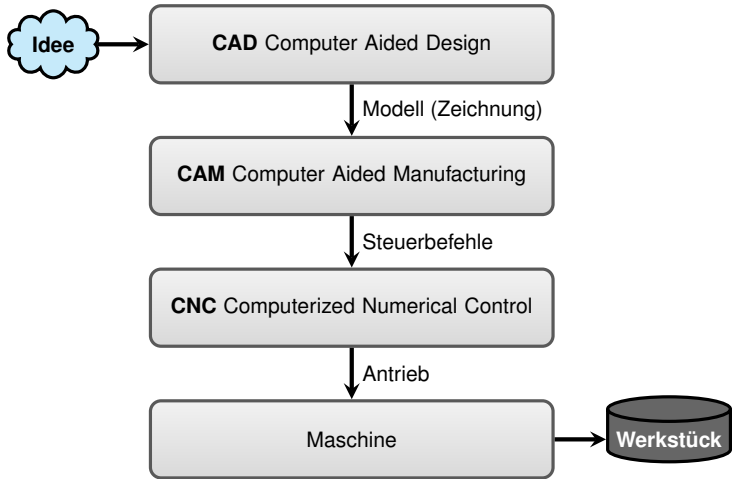
Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)



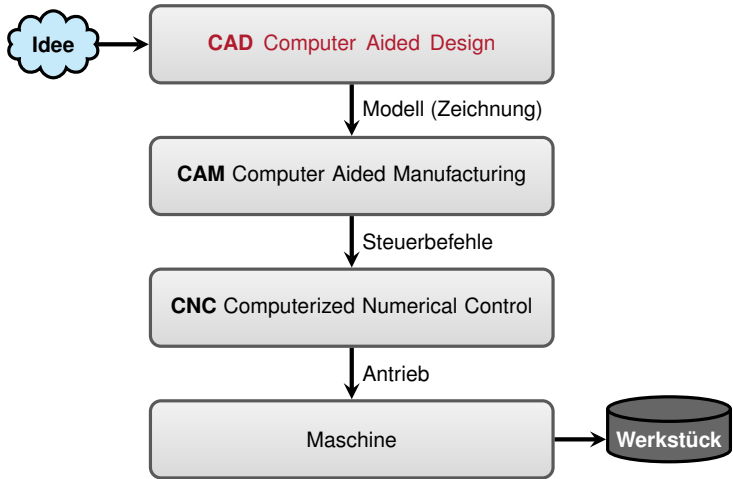
Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)

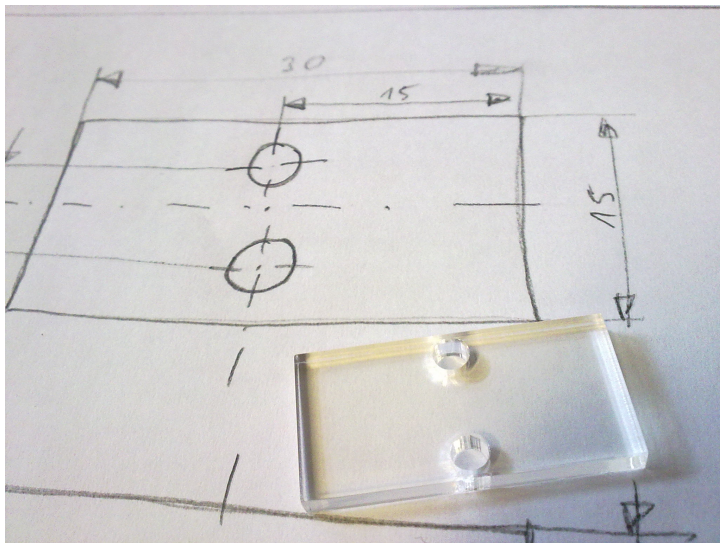


Arbeitsablauf bei computergestützter Fertigung

Werkzeugkette (engl. *toolchain*)



Konstruktion: Festlegen der Geometrie



<https://fablab.fau.de/sites/fablab.fau.de/files/images/06112012973.jpg>, Max Gaukler



- Idee \rightsquigarrow Konzept \rightsquigarrow gewünschte Form



- Idee \rightsquigarrow Konzept \rightsquigarrow gewünschte Form
- Wesentliche Kriterien:
 - **Funktionsgerecht:** *Erfüllt es seinen Zweck?*
 - **Fertigungsgerecht:** *Ist es leicht herzustellen?*
→ Machbarkeit, Genauigkeit, Dauer, Kosten, ...



- 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

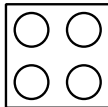


- Idee \rightsquigarrow Konzept \rightsquigarrow gewünschte Form
- Wesentliche Kriterien:
 - **Funktionsgerecht:** *Erfüllt es seinen Zweck?*
 - **Fertigungsgerecht:** *Ist es leicht herzustellen?*
→ Machbarkeit, Genauigkeit, Dauer, Kosten, ...
- Mögliches Entwurfsvorgehen (vereinfacht):
 - 1 Ungefähre 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)



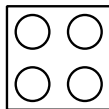
■ 2D

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



■ 2D

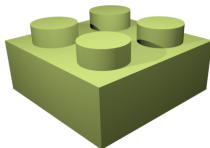
- **Vektorgrafik:** Inkscape, Corel Draw, Illustrator
Eigentlich zur Illustration gedacht
- **Konstruktion:** in größeren 3D-Programmen enthalten
Eingabe auch implizit (Lösen geometrischer Vorgaben)



■ 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)



- Ein 3D-Objekt ist eine Menge $M \subset \mathbb{R}^3$ mit unendlich vielen Elementen. Der Rechner benötigt eine Darstellung in **endlichem Speicherplatz**.



- 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)



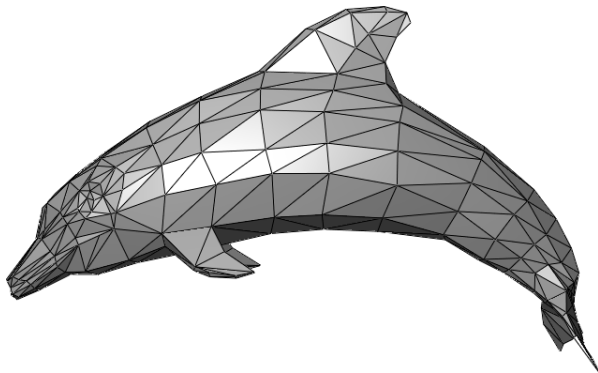
- Ein 3D-Objekt ist eine Menge $M \subset \mathbb{R}^3$ mit unendlich vielen Elementen. Der Rechner benötigt eine Darstellung in endlichem Speicherplatz.
- Anforderungen für die Konstruktion:
 - Darstellung am Bildschirm \rightsquigarrow Mantelfläche
 - Weiterbearbeitung (z. B. Schnittmenge, Vereinigung)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



- 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,
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



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

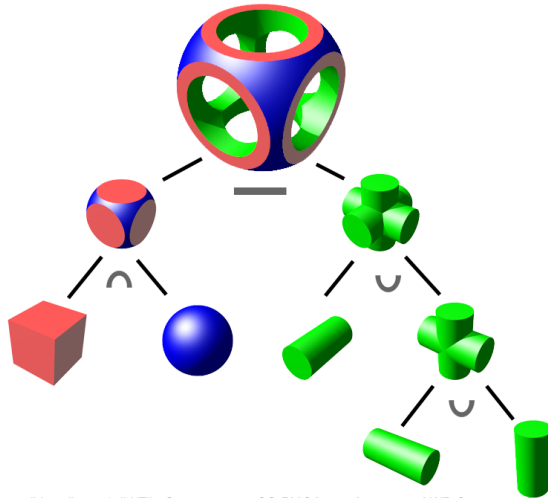
Bei manueller Bearbeitung leicht zu verletzen!

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



Volumenmodell: Computational Solid Geometry (CSG)

Mengenmäßige (boolsche) Verknüpfung von Grundkörpern

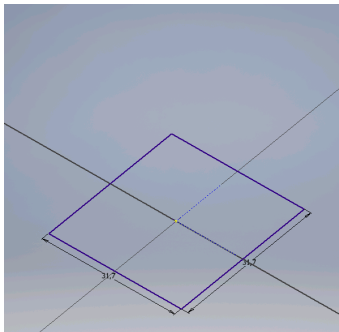


http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Csg_tree.png, CC-BY-SA 3.0, Autoren auf WP Commons: Zottie, Hawky.diddiz



- Klassischer Arbeitsablauf:

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



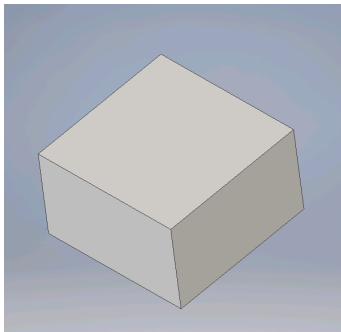
- Klassischer Arbeitsablauf:

- 1 2D-Zeichnung

- 2 Extrusion (linear oder rotatorisch)

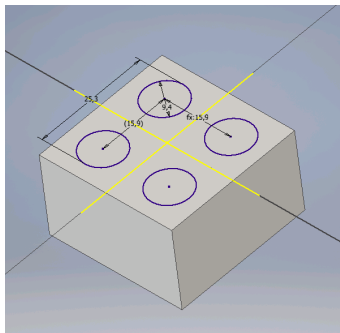
- 3 mehrmals wiederholt,

Verknüpfen mit bisheriger 3D-Geometrie (Addition, Subtraktion)



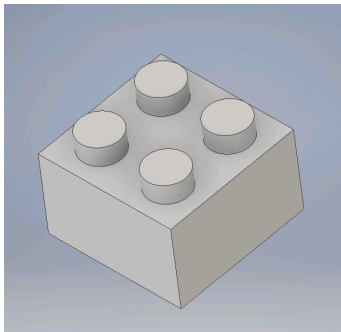
■ Klassischer Arbeitsablauf:

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



- Klassischer Arbeitsablauf:

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



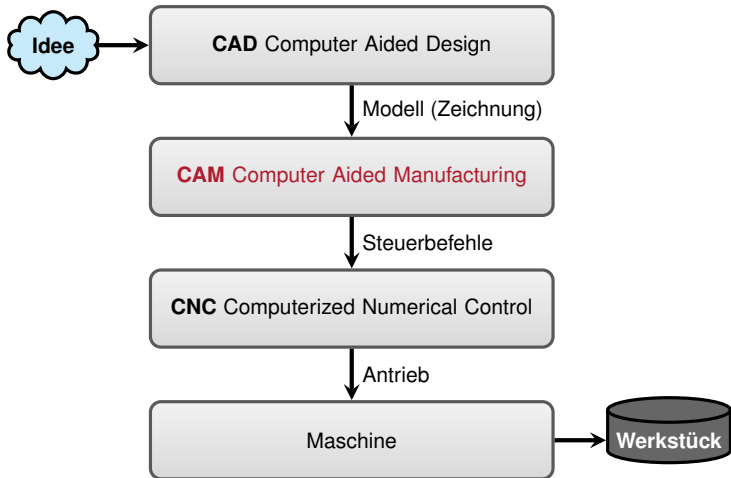
- Bedienung der Programme analog zu CSG-Operationen
- typisch: Liste von „Operationen“ (Features)

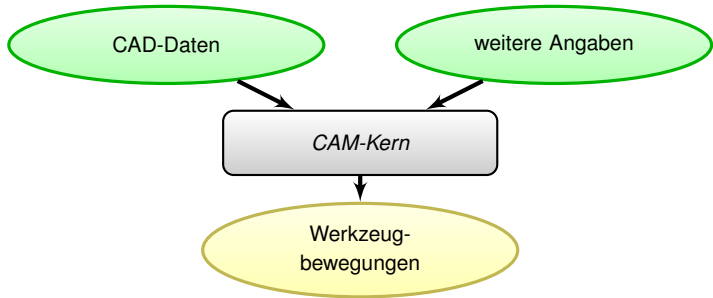


- Bedienung der Programme analog zu CSG-Operationen
- typisch: Liste von „Operationen“ (Features)

- 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, ...

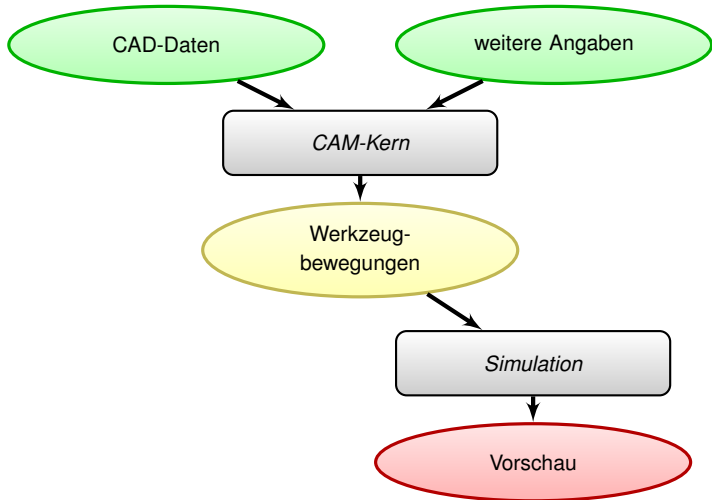






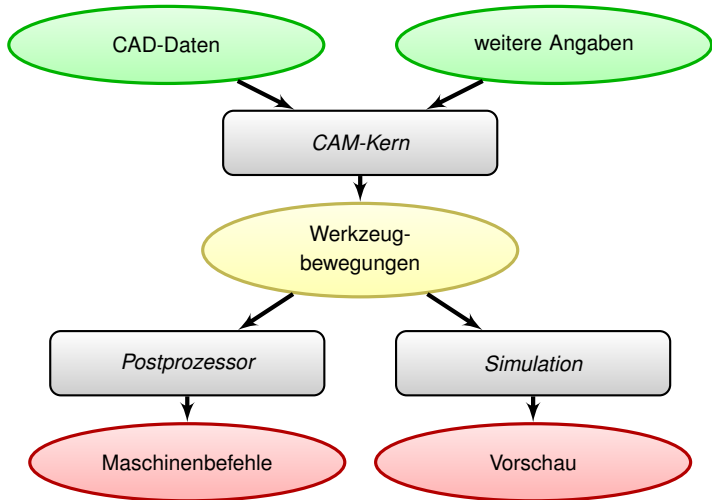
in Anlehnung an: Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 236, Springer-Verlag 2006 und Russwurm: Die WZM als mech. Sys. Teil 3, Folie 12.





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





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



- gewünschte Form soll übrigbleiben
 - Werkzeugform berücksichtigen
 - nicht zuviel wegfräsen, notfalls etwas weniger
- Werkzeugdaten einhalten (Zustellung, Vorschub)
- Maschine nicht beschädigen (Kollisionen)

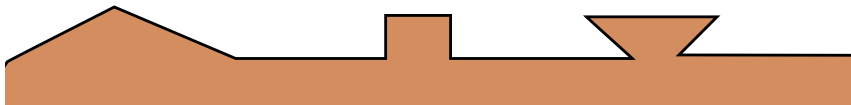


- gewünschte Form soll übrigbleiben
 - Werkzeugform berücksichtigen
 - nicht zuviel wegfräsen, notfalls etwas weniger
- Werkzeugdaten einhalten (Zustellung, Vorschub)
- Maschine nicht beschädigen (Kollisionen)
 - Algorithmus je nach Maschine (Fräsen/Drehen/...) und Bearbeitungstyp
 - unterschiedlichste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



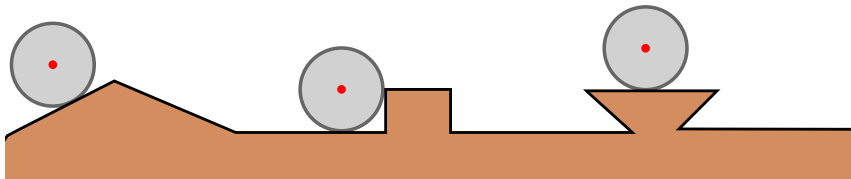
- Fräser ist kreisrund → „Abrolllinie“ entlang Außenkontur

von oben gesehen:



- Fräser ist kreisrund → „Abrolllinie“ entlang Außenkontur

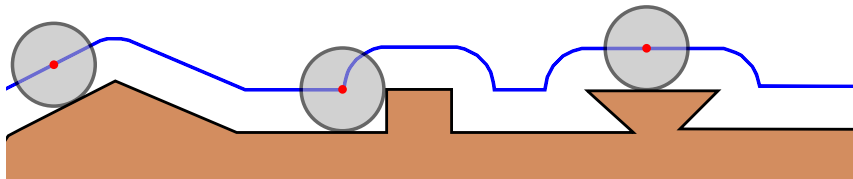
von oben gesehen:



Werkzeugwege beim 2D-Fräsen: Radiuskorrektur

- Fräser ist kreisrund → „Abrolllinie“ entlang Außenkontur

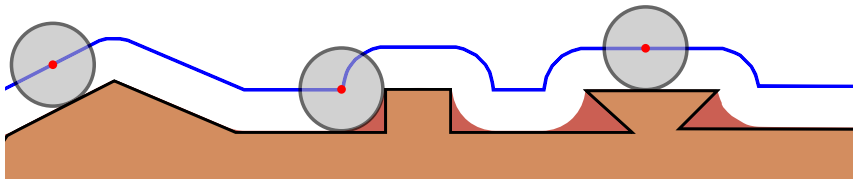
von oben gesehen:



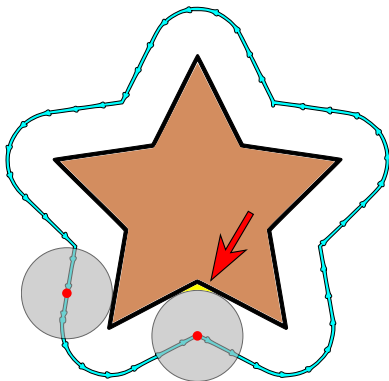
Werkzeugwege beim 2D-Fräsen: Radiuskorrektur

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

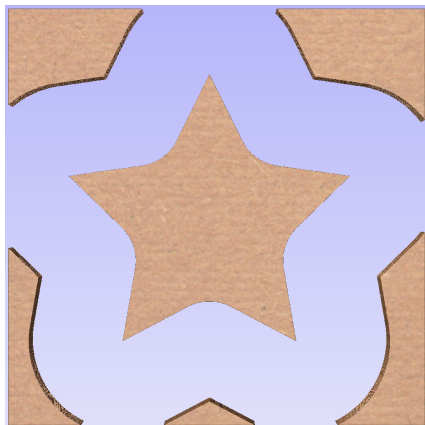
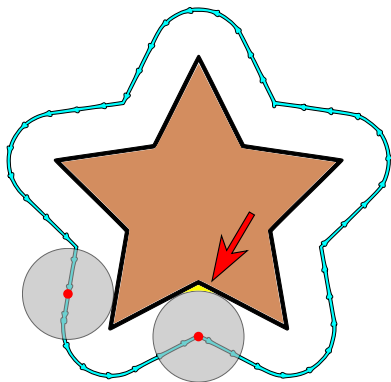
von oben gesehen:



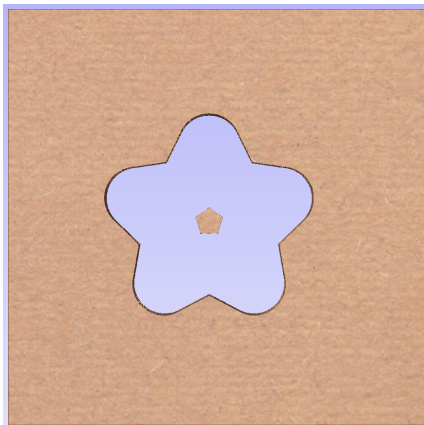
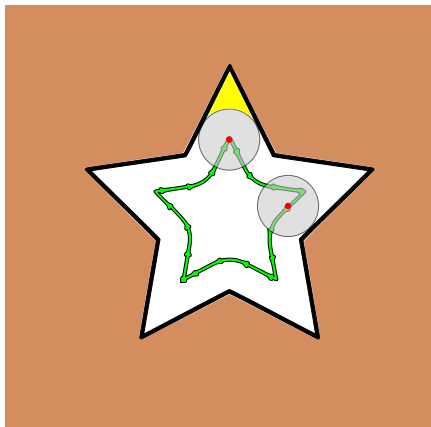
Beispiel: Ausfräsen eines Sterns



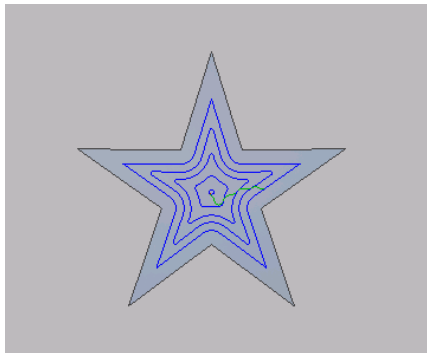
Beispiel: Ausfräsen eines Sterns



Beispiel: Einfräsen eines sternförmigen Lochs

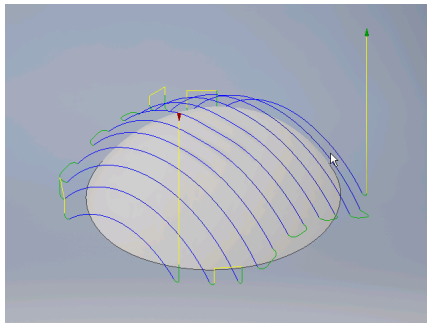


- 2D-Fräsen (feste Tiefe)
 - Kontur fräsen: Radiuskorrektur, wie eben gezeigt
 - Taschenfräsen: zusätzliche Bahnen für Innenfläche



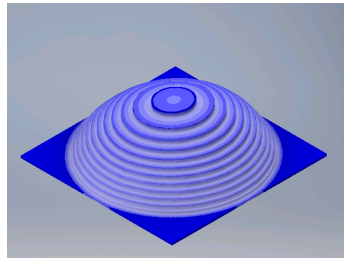
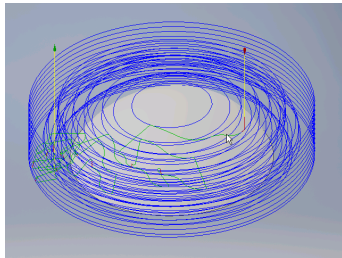
Werkzeugwege beim Fräsen

- 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



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



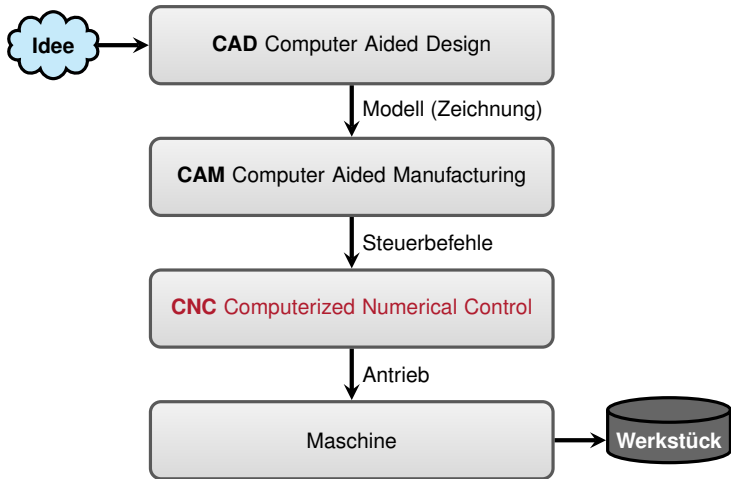
- 2D-Fräsen (feste Tiefe)
 - Kontur fräsen: Radiuskorrektur, wie eben gezeigt
 - Taschenfräsen: zusätzliche Bahnen für Innenfläche
- 3D-Fräsen
 - „Abzeilen“ (*drop-cutter*): vorgegebene X-Y-Bahnen abfahren, Z variabel
 - Schnittebenen (*waterline*): Höhenstufen, wie 2D
 - oft weiterführende Ansätze,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

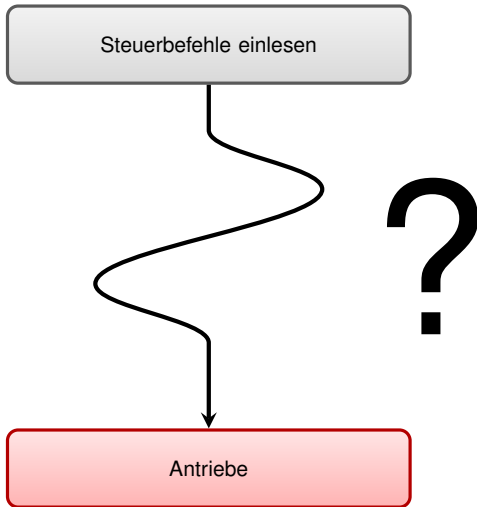


Bild nach: Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 167, Springer-Verlag 2006.
und Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Fo-
lie 21. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012



Funktionsweise einer CNC-Steuerung

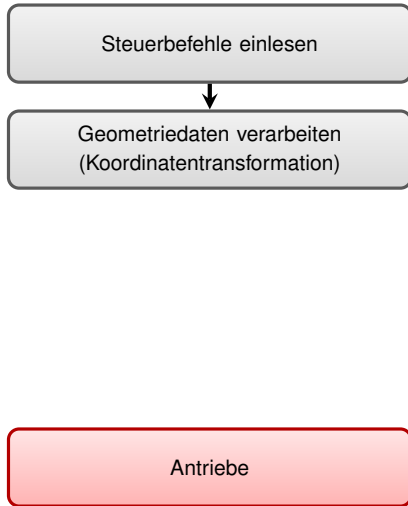


Bild nach: Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 167, Springer-Verlag 2006. und Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 21. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012



Funktionsweise einer CNC-Steuerung

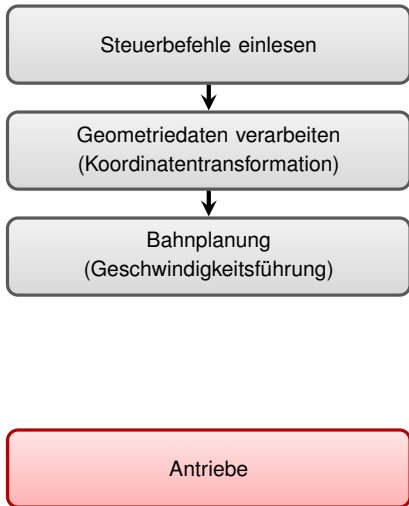
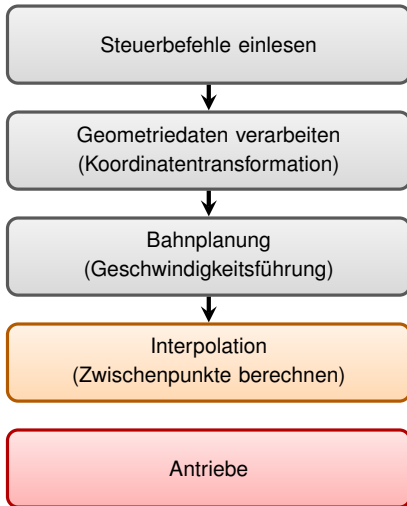


Bild nach: Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 167, Springer-Verlag 2006. und Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 21. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012



Funktionsweise einer CNC-Steuerung



typische Taktraten:

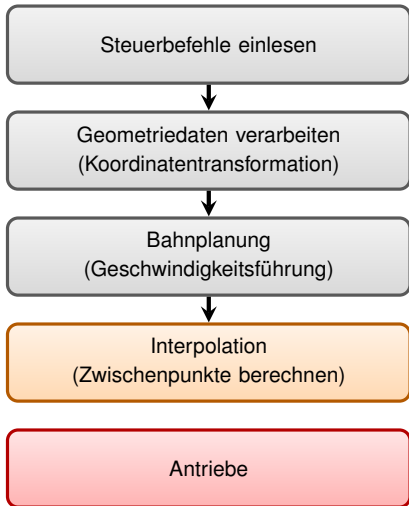
nach Bedarf

1ms

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



Funktionsweise einer CNC-Steuerung



typische Taktraten:

nach Bedarf

1ms

0,1ms

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



Funktionsweise einer CNC-Steuerung

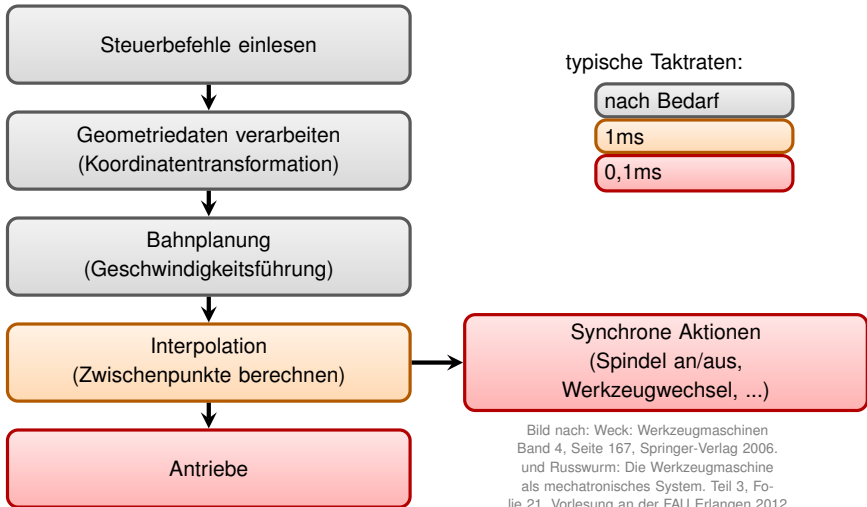
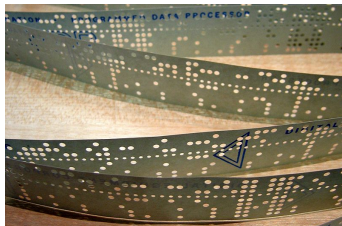


Bild nach: Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 167, Springer-Verlag 2006. und Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 21. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012



- 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 are some dark, silhouetted structures and what looks like a road or a path. The overall atmosphere is hazy and industrial. The year '1964' is overlaid in large, bold, blue-outlined white text 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 **M06** T3

Wechsle auf Werkzeug 3



Beispielprogramm: Schlitz fräsen (leicht vereinfacht)

| % Beispielprogramm | Programmname |
|----------------------|------------------------------------|
| N01 M06 T3 | Wechsle auf Werkzeug 3 |
| N02 M03 S1500 | Frässpindel anschalten, 1500 U/min |



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 |



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 |



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 |



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!)



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 |
| N07 G00 Z40 | Fahre im Eilgang nach Z=40 mm |



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 |
| N07 G00 Z40 | Fahre im Eilgang nach Z=40 mm |
| N08 M02 | Spindel aus |



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 |
| 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?



Problem: Geschwindigkeitsführung

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

Prinzip aus der Regelungstechnik:

Der vorgegebene Sollverlauf muss realisierbar sein!



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

Prinzip aus der Regelungstechnik:

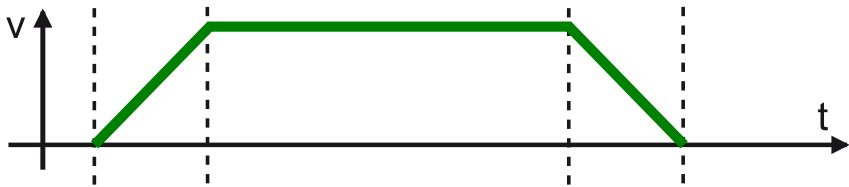
Der vorgegebene Sollverlauf muss realisierbar sein!

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



Lösung: Beschleunigungsrampe

- Geschwindigkeit linear hoch- und runterfahren
- recht einfach programmierbar

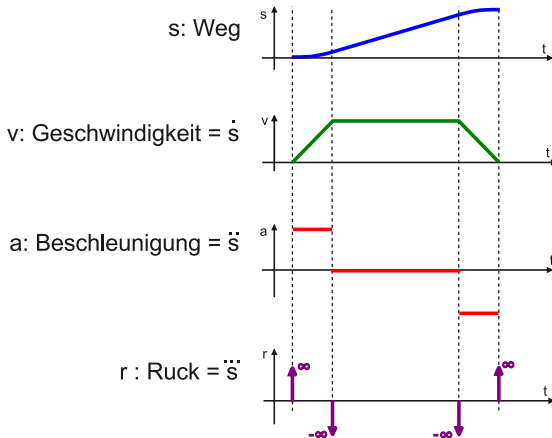


Weck: Werkzeugmaschinen Band 4, Seite 297, Springer-Verlag 2006.

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



Beschleunigungsrampe ohne Ruckbegrenzung



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

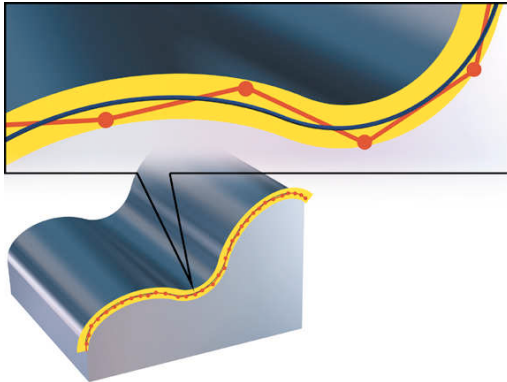


Bisher muss an jedem Eckpunkt ganz angehalten werden!



Bisher muss an jedem Eckpunkt ganz angehalten werden!

1 Verrunden von Ecken (erlaubte Toleranz)

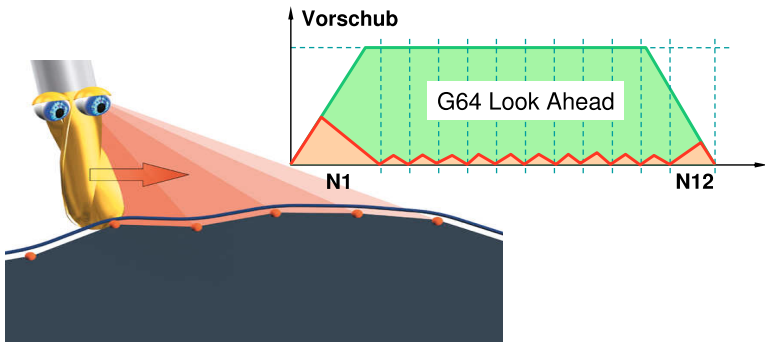


Russwurm: Die Werkzeugmaschine als mechatronisches System. Teil 3, Folie 63. Vorlesung an der FAU Erlangen 2012

Bahnplanung: Look Ahead

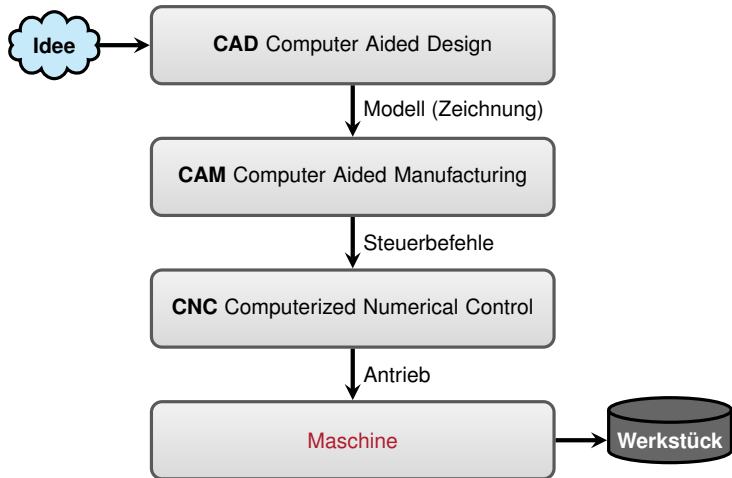
Bisher muss an jedem Eckpunkt ganz angehalten werden!

- 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

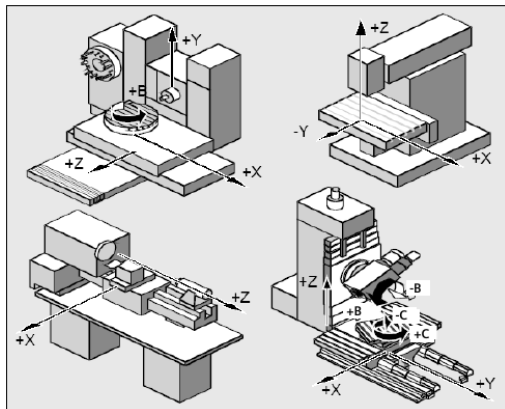




Werkzeugmaschine

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



Definition (Tönshoff, 1995)

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

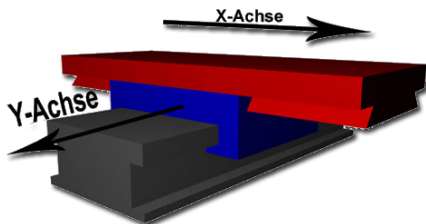
- Werkzeug wird definiert (automatisch) bewegt
- Bewegungspfad und Werkzeugform bestimmen das Ergebnis
- Wesentliche Bestandteile: Gestell, Führungen, Antrieb, Steuerung
- Beispiele:
 - Drehmaschine (auch Mehrspindelmaschine)
 - Fräsmaschine (3-Achsig / 5-Achsig)
 - FDM-„3D-Drucker“, Laserschneider, 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.corvintaurus.de/werkstatt2/kreuztisch/corvintaurus_kreuztis

- 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



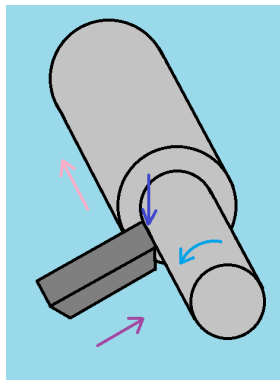
<http://www.hsckling.de/files/zerspanung3.jpg>

- 1 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.statistik.tu-dortmund.de/uploads/RTEmagicC_BohrungsFoto.jpg.jpg

- 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



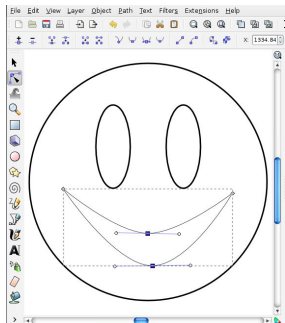
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1b/Speeds_and_feeds_0001.png

- 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

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

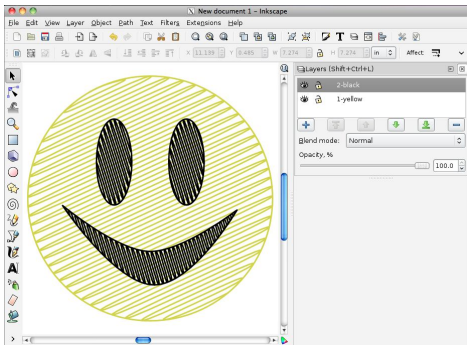


<http://wiki.evilmadscience.com/s3/eggbot/smileytut/21.jpg>



Rückblick: computerunterstützte Fertigung

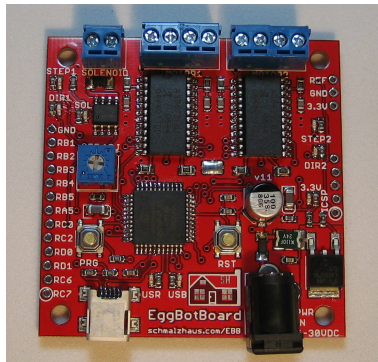
- 1 Idee
- 2 CAD: Entwurf
- 3 CAM: Fertigungsdaten
- 4 CNC: Maschinensteuerung
- 5 (Werkzeug-)Maschine
- 6 fertiges Werkstück



<http://wiki.evilmadscience.com/s3/eggbot/smileyut/46.jpg>

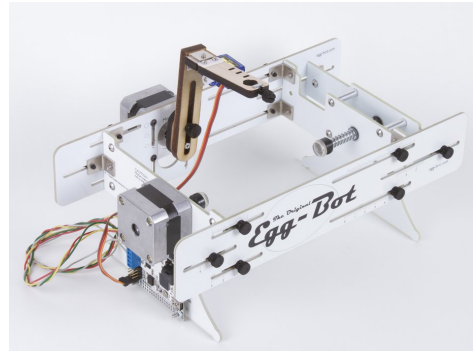


- 1 Idee
- 2 CAD: Entwurf
- 3 CAM: Fertigungsdaten
- 4 **CNC: Maschinensteuerung**
- 5 (Werkzeug-)Maschine
- 6 fertiges Werkstück



http://www.schmalzhaus.com/EBB/v11/EBB_v11_raw_pic.jpg

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



<http://shop.emscdn.com/catalog/emskits/eggbot/kit/imglrg/2.jpg>

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



<http://wiki.evilmadscience.com/s3/eggbot/smileytut/golf7.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



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?



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



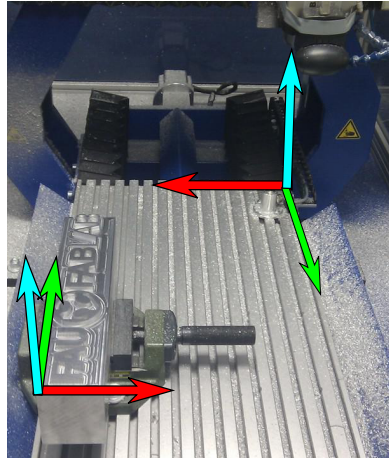
Koordinatensysteme und Transformationen

Maschinen-KS (fest)



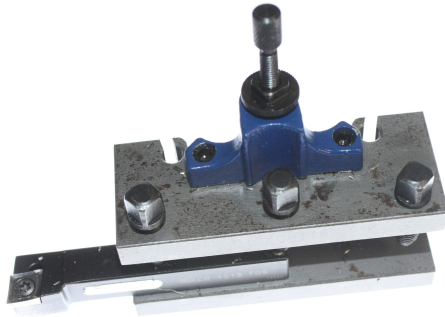
Werkzeuglänge
Verschiebung
Drehung

Werkstück-KS



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



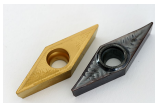


- Wichtigstes Werkzeug
- Nimmt Wendeschneidplatte auf
- An Aufgaben angepasste Formen verfügbar

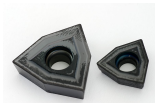
- allgemeine Bezeichnung: Drehmeißel
- Verwendung von Wendeschneidplatten
- Einteilung in Drehverfahren (Auswahl):
 - Längsdrehen - Plandrehen - Stehdrehen
 - Schruppen - Schlichten
 - Rändeln



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

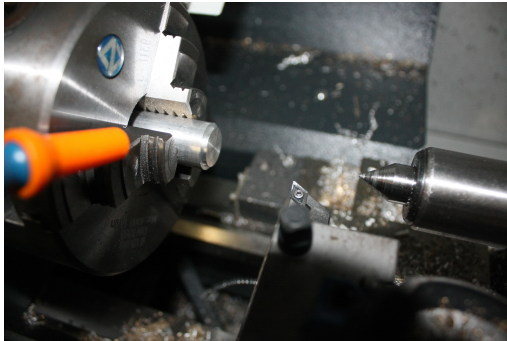


<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wendeschneidp>



<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)



Schrittmotor

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

Servomotor

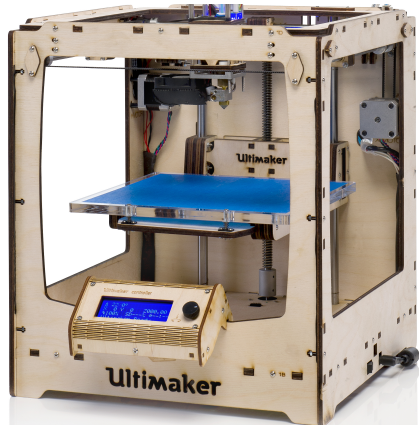
- normaler DC-Motor + Positionsmessung
- Positionsregelung
- + kein Schrittverlust
- + schneller
- i.d.R. teurer



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€)

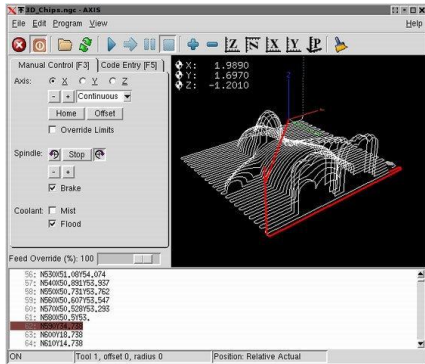


<https://www.ultimaker.com/3d-printers/49/Original-Ultimaker-Original-Press-kit.zip>



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€)



<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-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)

