



Internet of Things/Industrial Internet

Computer Aided Design und Rapid Prototyping



Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik
Prozesse und Systeme

Universität Potsdam



Chair of Business Informatics
Processes and Systems

University of Potsdam

M.Sc. Ravil Goetzke, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gronau
Wiss. Mit. | Research Assistant, Lehrstuhlinhaber | Chairholder

August-Bebel-Str. 89 | 14482 Potsdam | Germany

Tel +49 331 977 3322

Fax +49 331 977 3406

E-Mail ngronau@lswi.de

Web lswi.de



Konstruktion

Computergestützte Konstruktion

Computer Aided Design

Digitale Repräsentation von CAD-Objekten

Rapid Prototyping/Generative Fertigungsverfahren

Lernziele

- Konstruktionsarten und -phasen kennen und deren Zusammenhang verstehen
- Bestandteile und Begriffe der C-Techniken kennen
- Konzept des Virtuellen Prototyps und Digitalen Mock-Ups verstehen
- CAD (Grund-)Funktionen kennenlernen
- CAD-Datenmodelle verstehen
- Boundary Representation (BRep)-Modell und Constructive Solid Geometry (CSG)-Modell vergleichen bzw. Vor-/Nachteile kennen
- Verschiedene CAD Datenaustauschformate kennen
- Unterschiede generativer und additiver Fertigungsverfahren verstehen



Konstruktion

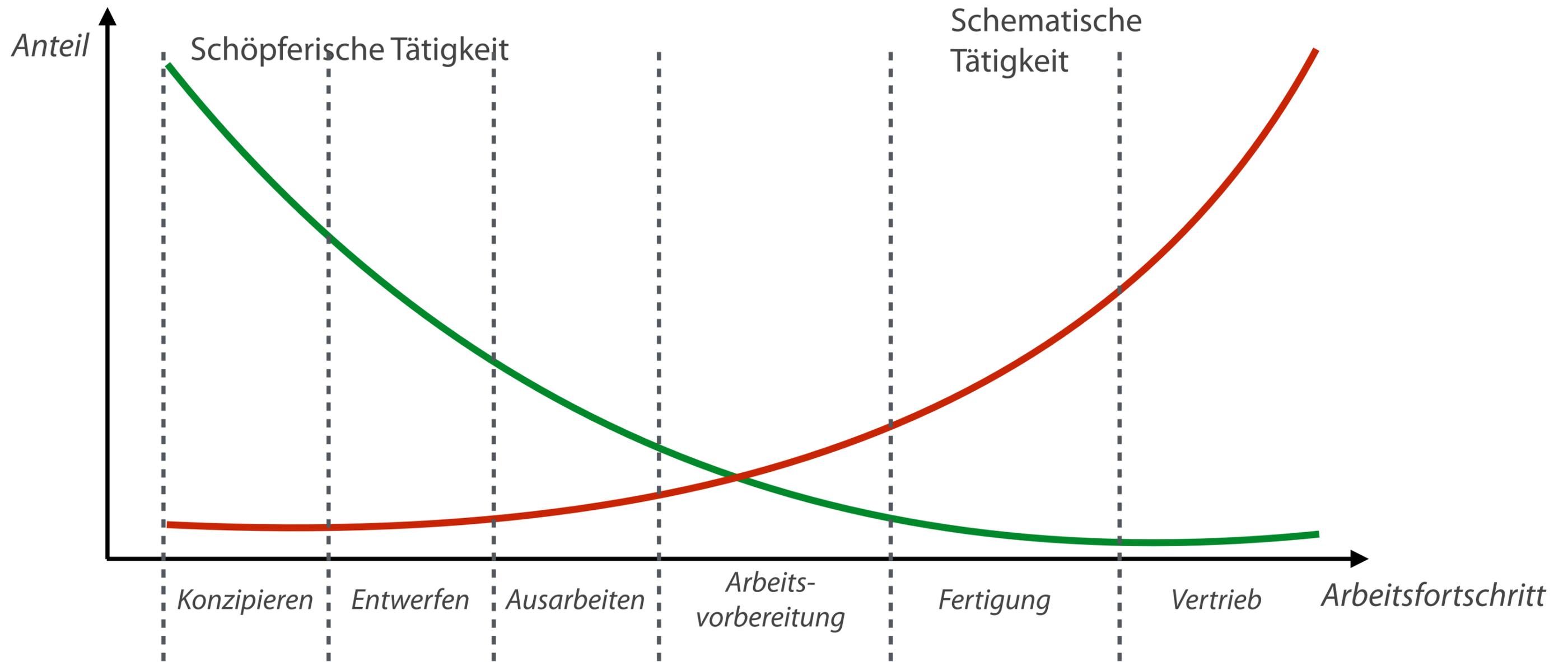
Computergestützte Konstruktion

Computer Aided Design

Digitale Repräsentation von CAD-Objekten

Rapid Prototyping/Generative Fertigungsverfahren

Tätigkeitsarten in der Produktentstehung



Konstruktionsarten

Konstruktionsarten		Konstruktionsphasen			
		Konzipieren		Entwerfen	Ausarbeiten
Grundbegriffe	Gebräuchliche Begriffe der Praxis	Funktionsfindung	Prinzip- erarbeitung	Gestaltung	Detaillierung
Neukonstruktion	Neukonstruktion				
	Entwicklungs konstruktion				
	Angebots konstruktion				
Anpassungs- konstruktion	Anpassungskonstruktion				
	Angebots konstruktion				
	Fertigungskonstruktion				
	Änderungskonstruktion				
Varianten- konstruktion	Variantenkonstruktion				
Konstruktion mit festem Prinzip	Prinzipkonstruktion				



Konstruktion

Computergestützte Konstruktion

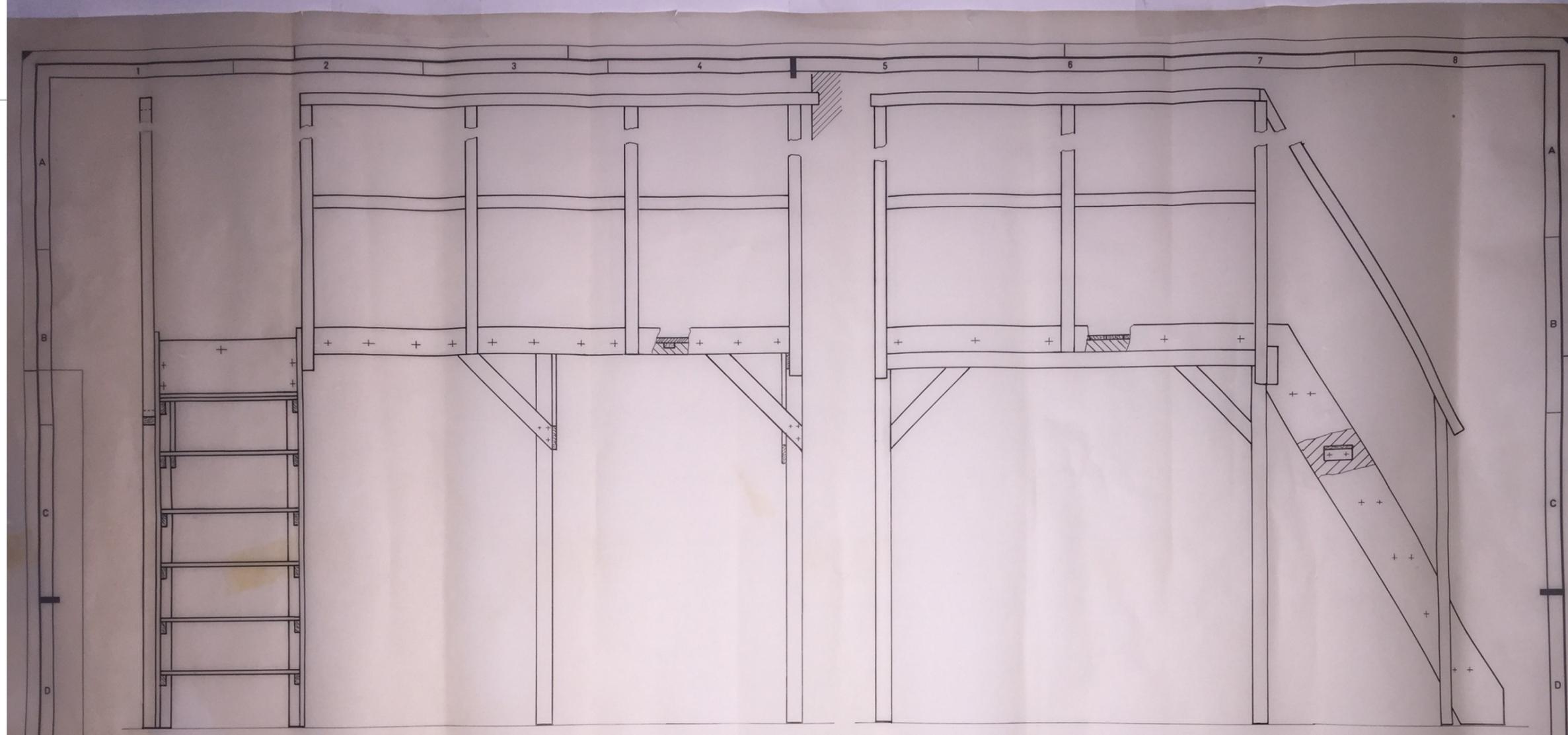
Computer Aided Design

Digitale Repräsentation von CAD-Objekten

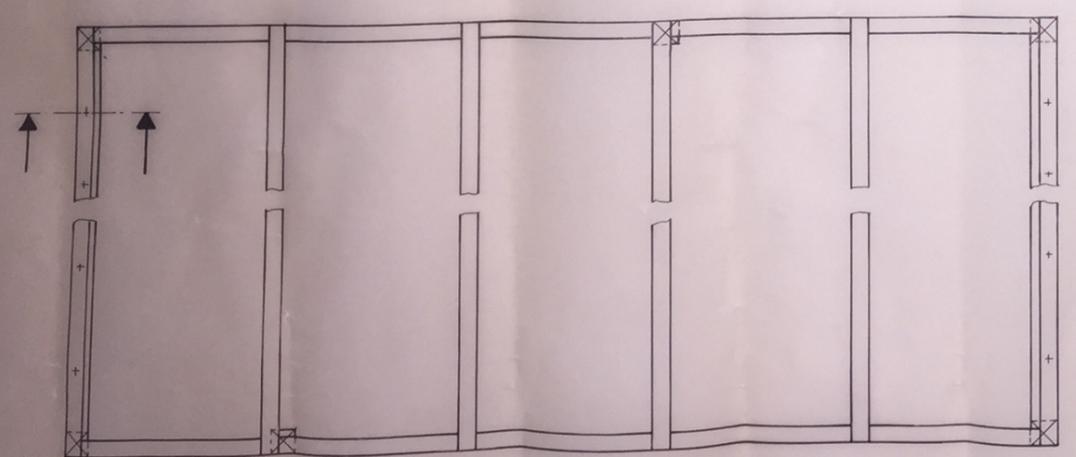
Rapid Prototyping/Generative Fertigungsverfahren

Begriffe der C-Technik

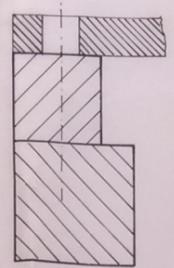
		noch in Verwendung
CAD	Computer Aided Design	✓
CAE	Computer Aided Engineering	✓
CAI	Computer Aided Industry	✗
CAM	Computer Aided Manufacturing	✓
CNC	Computerized Numeric Control	✓
CAP(P)	Computer Aided (Production) Planning	-
CAQ	Computer Aided Quality Control	✓
PPS	Produktionsplanung und-steuerung	-
CIM	Computer Integrated Manufacturing	✗
DMU	Digital Mock-Up	✓
EDM	Engineering Data Management	✗
PDM	Product Data Management	✓
PLM	Product Lifecycle Management	✓
RP	Rapid Prototyping	✓
VR	Virtual Reality	✓



Rohbau



Schnitt
1:2



Für diese techn. Unterlagen behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung
 oder Unternehmenseintragung, sie darf ohne unsere vorherige schriftliche Genehmigung weder verviel-
 fältigt, noch Dritten zugänglich gemacht, noch in anderer Weise mitteilbar oder veröffentlicht werden.

Verwendbar für		Bauvorhaben Kaiserin - Augusta - Allee 38		Maßstab 1:10	
Bauherr		Norbert Gronau, Berlin - Charlottenburg		Nadelholz Fichte / Tanne geschliffen und versiegelt	
Maße ohne Toleranzangabe:	DIN	1985	Datum	Name	
		Bearb.	19.03	Gronau	
		Gepr.			
		Norm			
INGENIEUR - HOLZBAU BERLIN			2-700.01.0001		
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr.	Blatt
					Bl.
Zust.-MLK	A	B	C	D	E
	F	G	H	I	J
	K	L	M	N	O
	P	Q	R	S	T
	U	V	W	X	Y
	Z	St.	Reg.		

Verwendbar für:

Bauvorhaben
Bauherr

Kaiserin - Augusta - Allee 38
Norbert Gronau, Berlin - Charlottenburg

Maße ohne
Toleranzangabe:
DIN _____

Maßstab 1 : 10

Nadelholz Fichte / Tanne
geschliffen und versiegelt

1985	Datum	Name
Bearb.	19.03.	Gronau
Gepr.		<i>gr.</i>
Norm		

Arbeitsplattform

INGENIEUR -
HOLZBAU BERLIN

2-700.01.0001

Blatt

Bl.

Zust.

Änderung

Datum

Name

Urspr.

Ers. f.

Ers. d.

Zust.-MLK

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

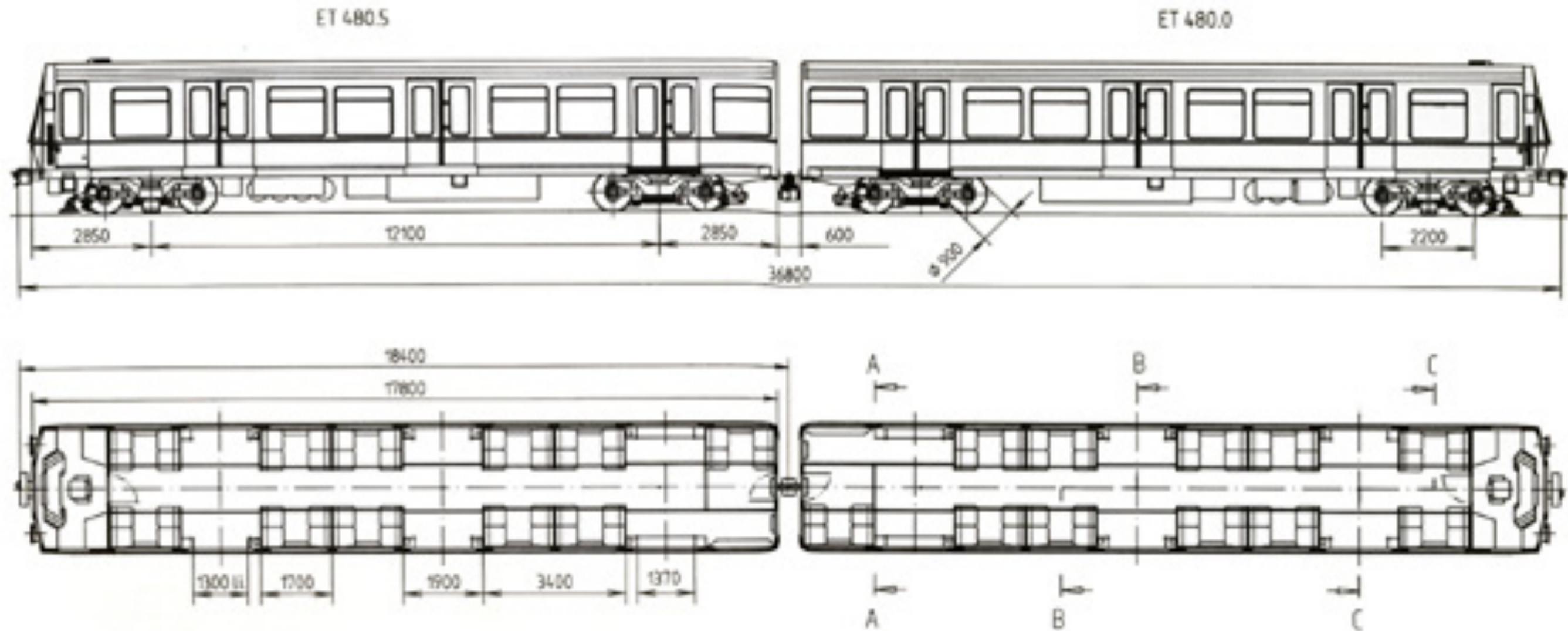
Y

Z

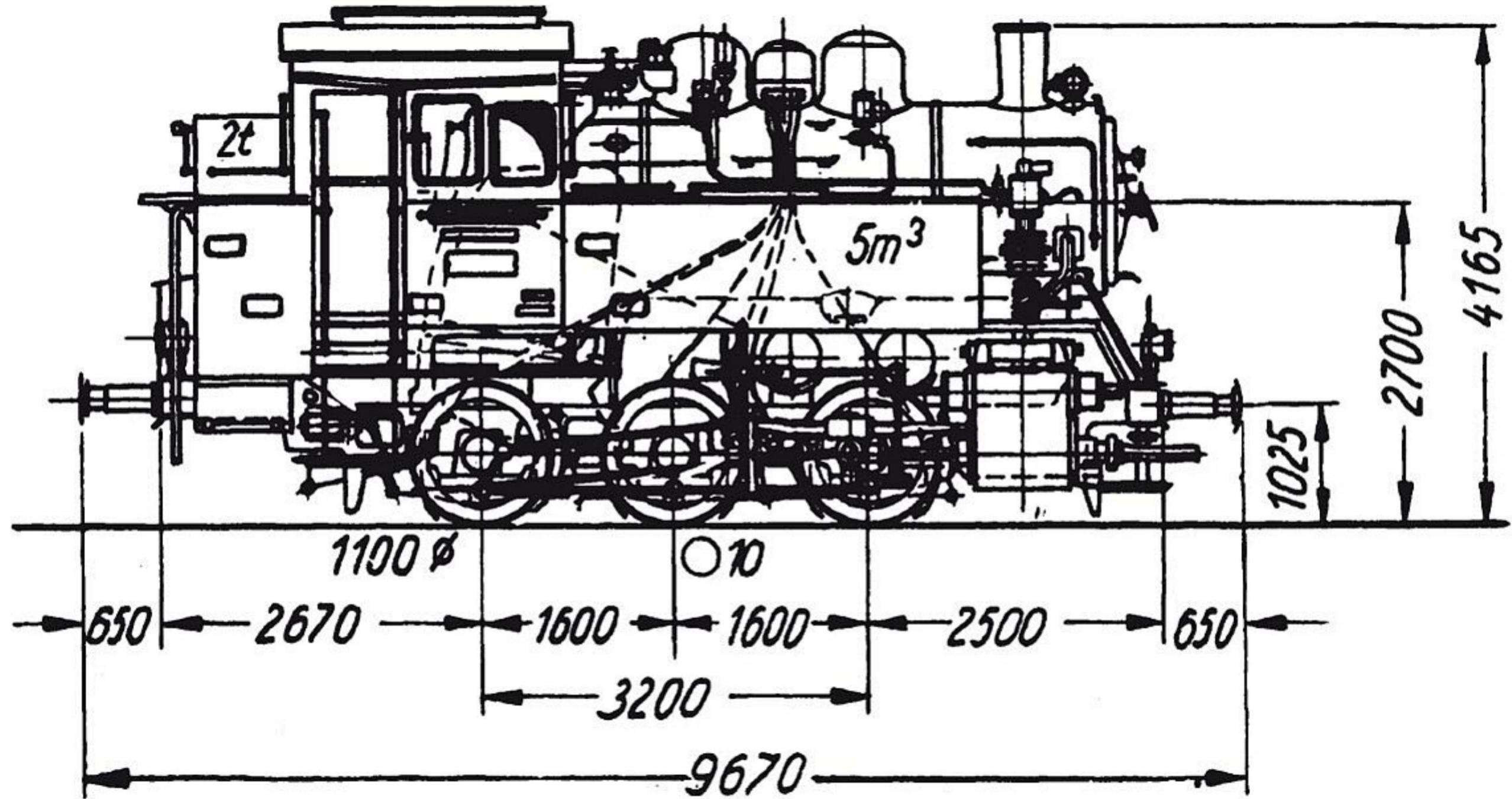
Si.

Reg.

Wagenskizze BR 480



Wagenskizze Lokomotive 80 013



Einsatz von CAD in der Produktentwicklung

Planen

Konzipieren

- Klären der Aufgabenstellung und Ausarbeitung der Anforderungsliste
- Gesamtfunktion in Teilfunktionen aufgliedern und Suchen nach Lösungsprinzipien sowie Bausteinen zur Erfüllung der Funktionen
- Kombinieren der Lösungsprinzipien/Bausteine zum Erfüllen der Gesamtfunktion
- Erarbeiten von Konzeptvarianten und Bewerten dieser Varianten

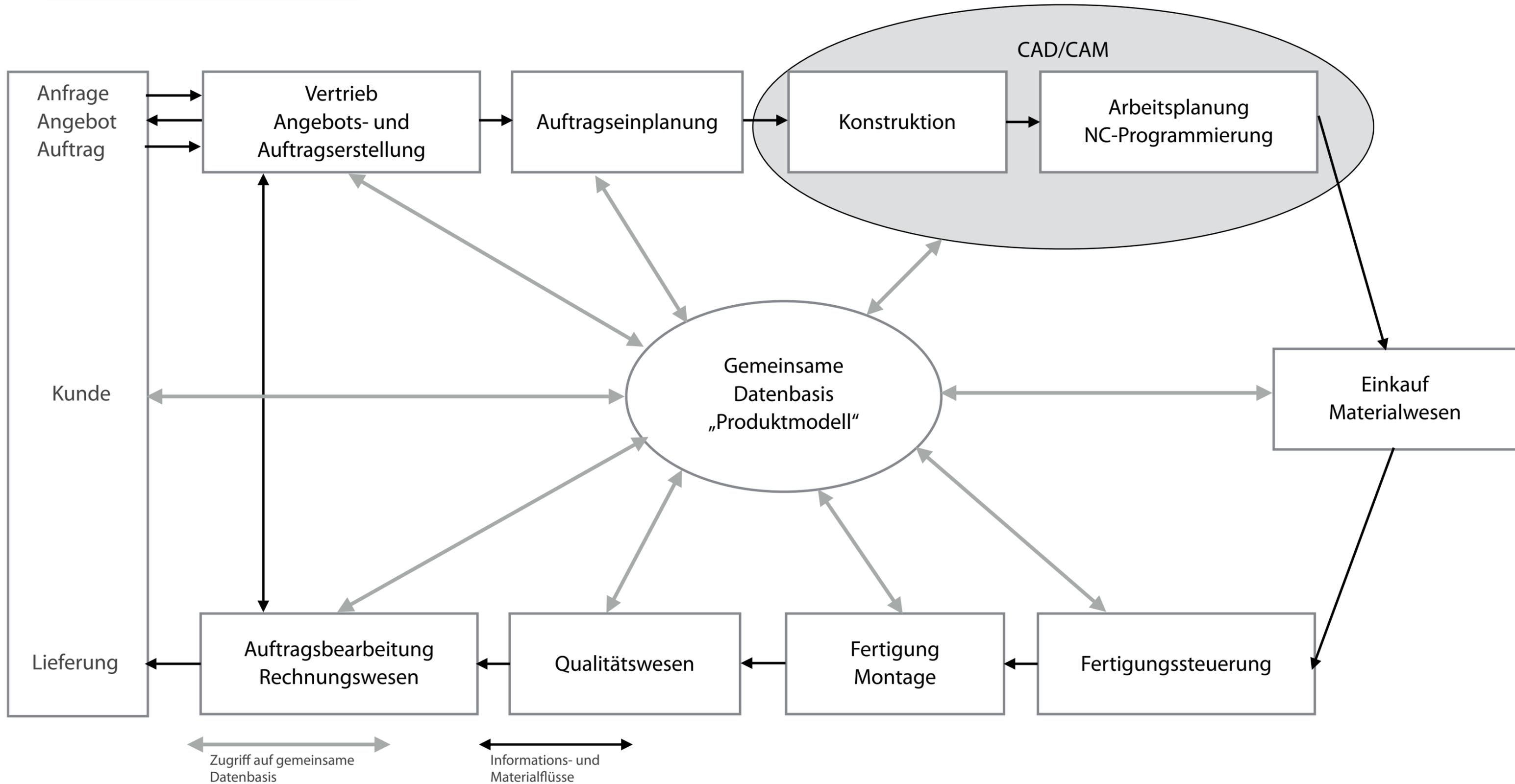
Entwerfen/Gestaltung

- Erstellen eines maßstäblichen Entwurfs
- Bewerten des Entwurfs und erstellen eines verbesserten Entwurfs
- Optimieren der Gestaltungszonen
- Festlegung eines bereinigten Entwurfs

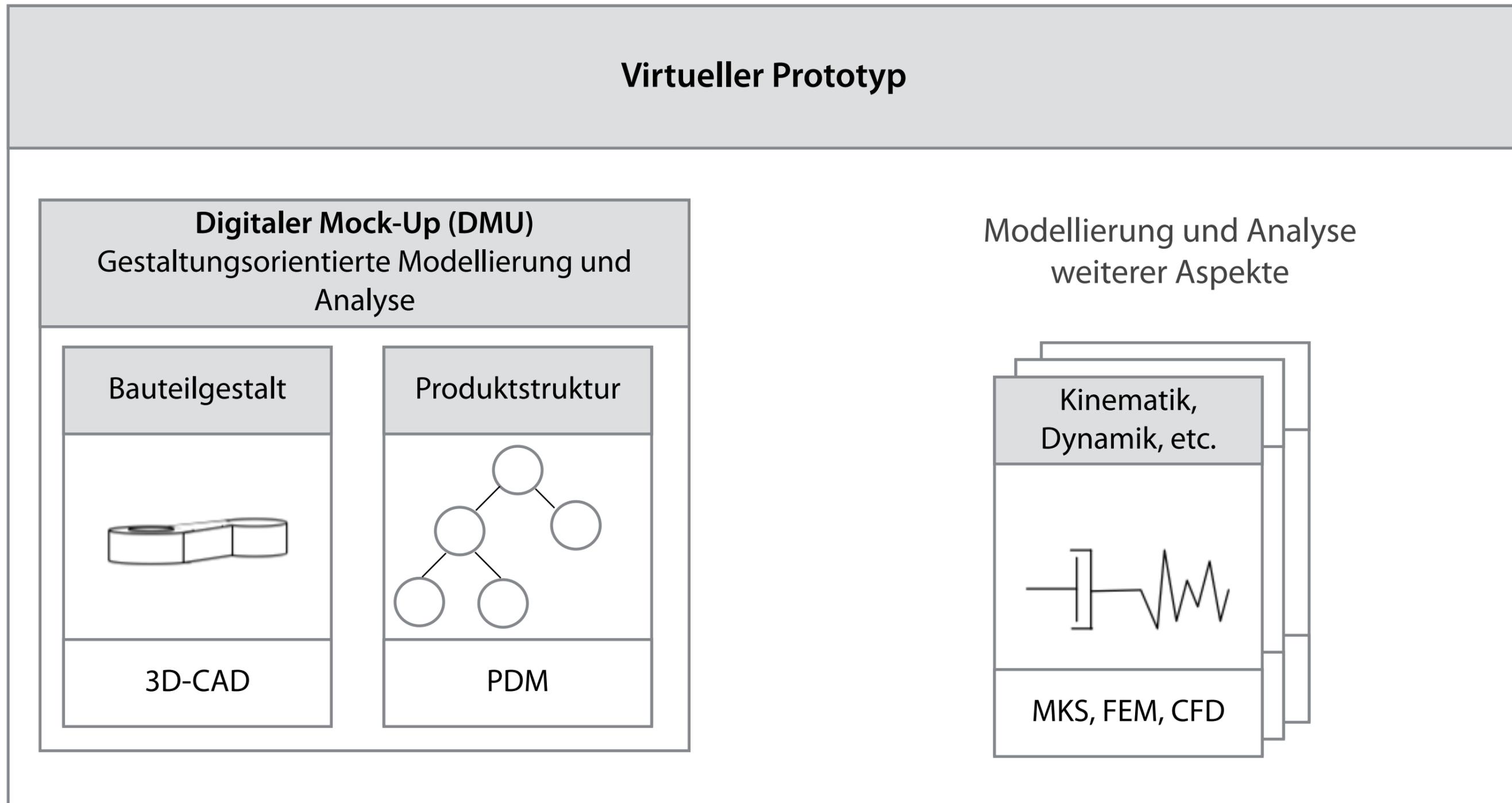
Ausarbeiten/Detaillierung

- Gestalten und optimieren der Einzelteile
- Ausarbeitung der Ausführungsunterlagen
- Herstellen und Prüfen eines Prototyps

Integrierte Datenverarbeitung mit gemeinsamer Datenbasis



Virtueller Prototyp und Digitaler Mock-Up



MKS - Mehrkörpersimulation
CFD - Computational Fluid Dynamics (Strömungssimulation)
FEM - Finite Elemente Methode (Festigkeitsberechnung)



Konstruktion

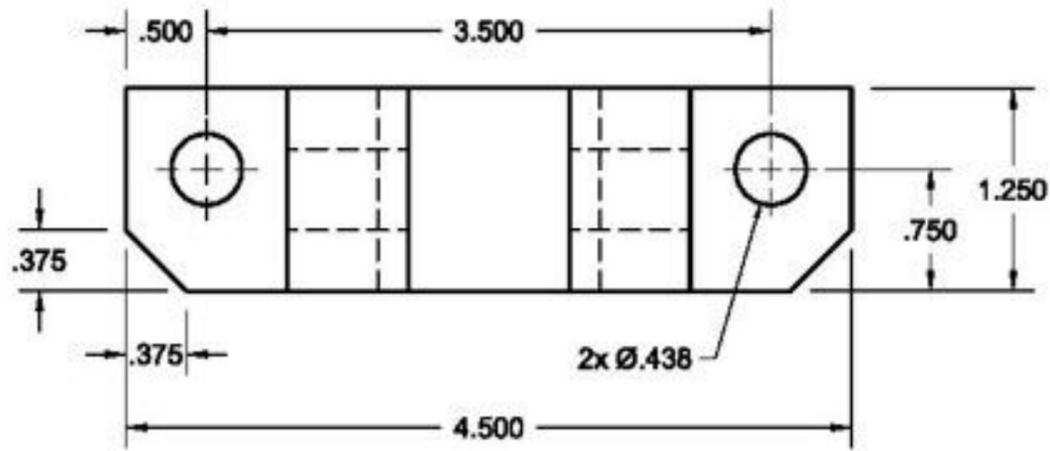
Computergestützte Konstruktion

Computer Aided Design

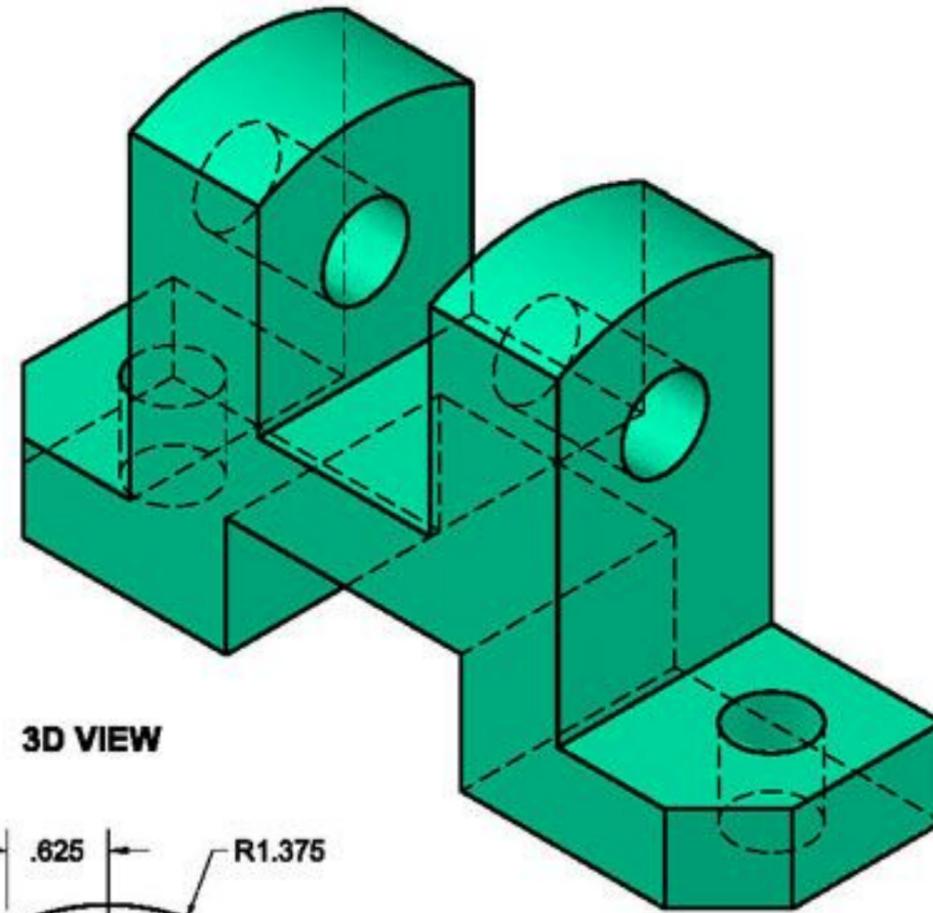
Digitale Repräsentation von CAD-Objekten

Rapid Prototyping/Generative Fertigungsverfahren

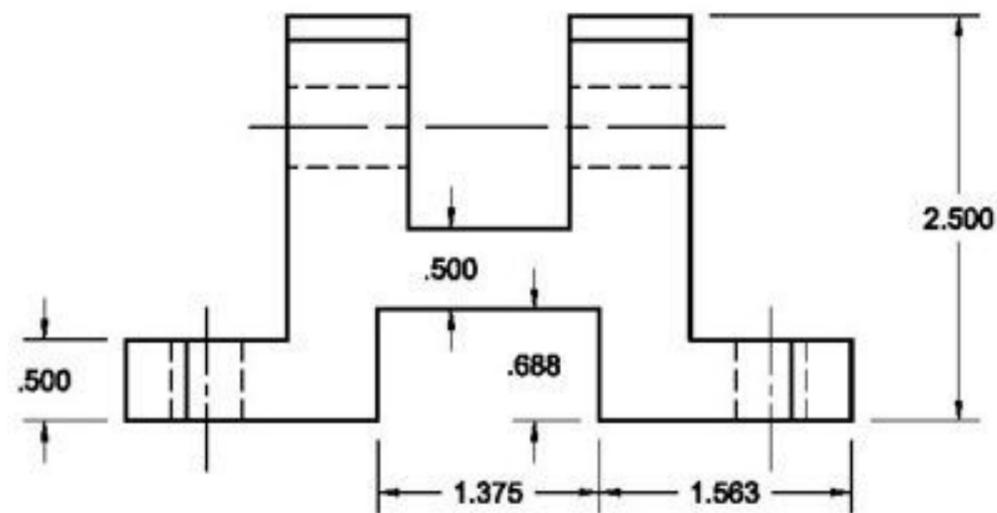
CAD-Beispiele



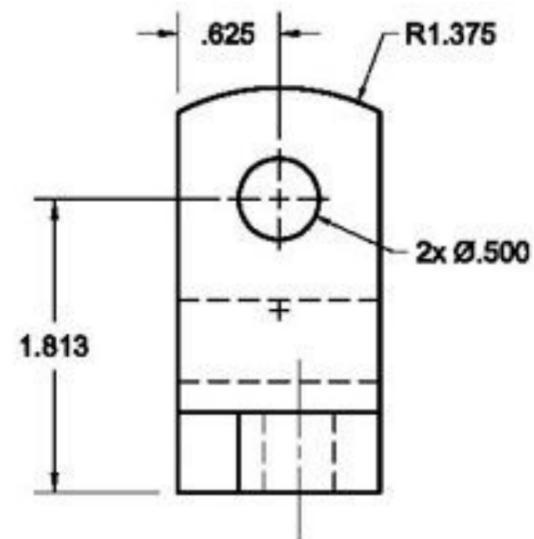
TOP VIEW



3D VIEW



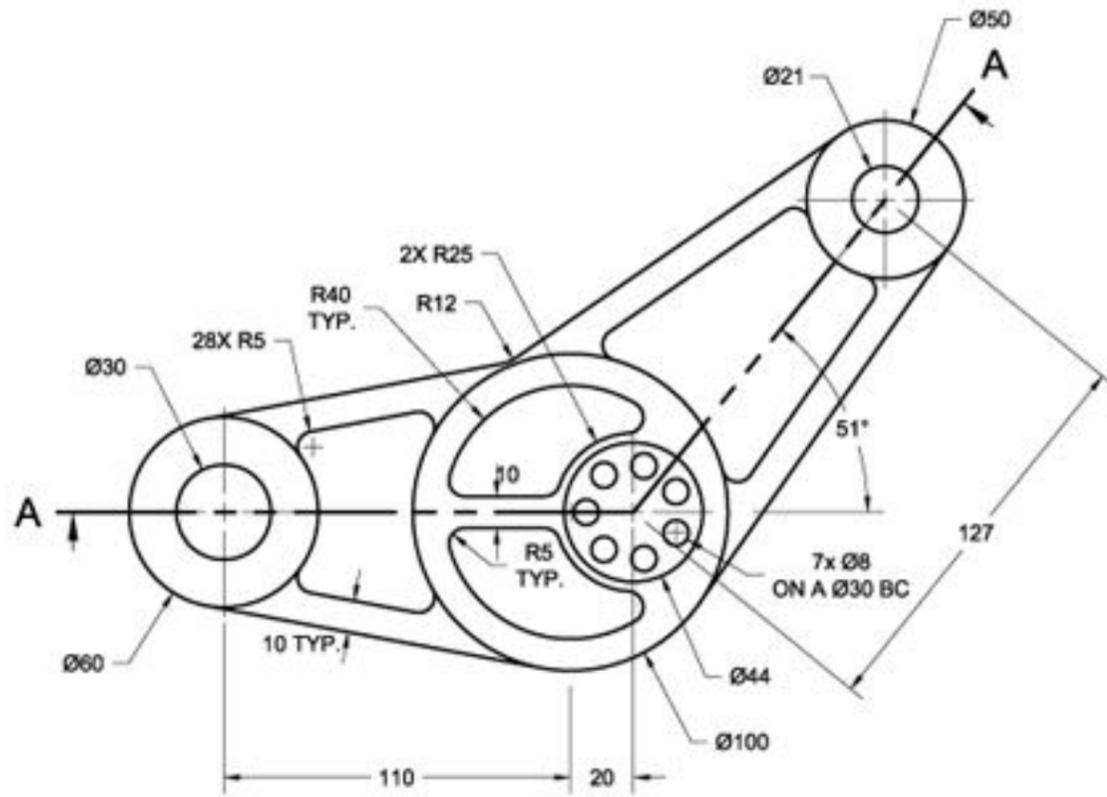
FRONT VIEW



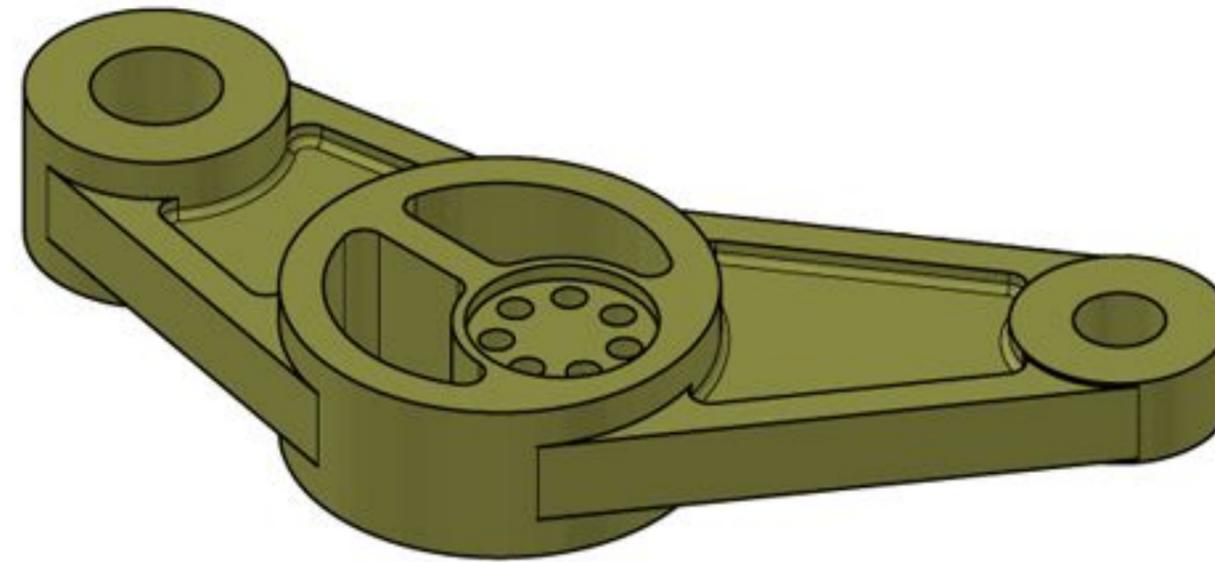
SIDE VIEW

AutoCAD 3 3D Modeling	
PROJECT:	Practice
DRAWING TITLE:	Rod Support
DRAWN BY:	KB
DATE:	
SCALE:	1:1
CLASS:	CADD3
CHECKED BY:	KB
DRAWING NUMBER:	

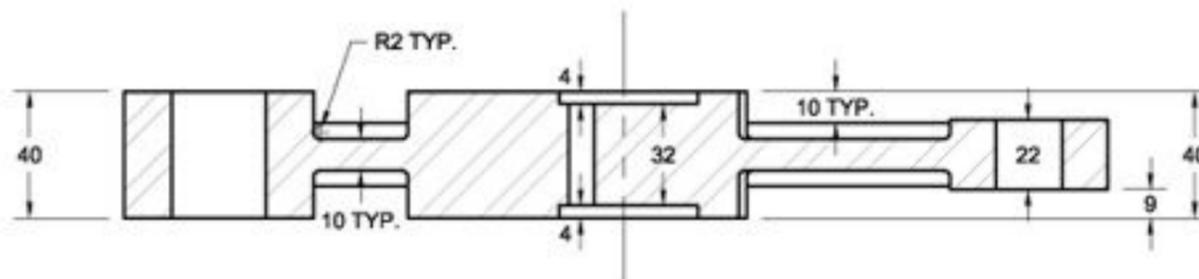
CAD-Beispiele



TOP VIEW (1:2)



3D VIEW #1



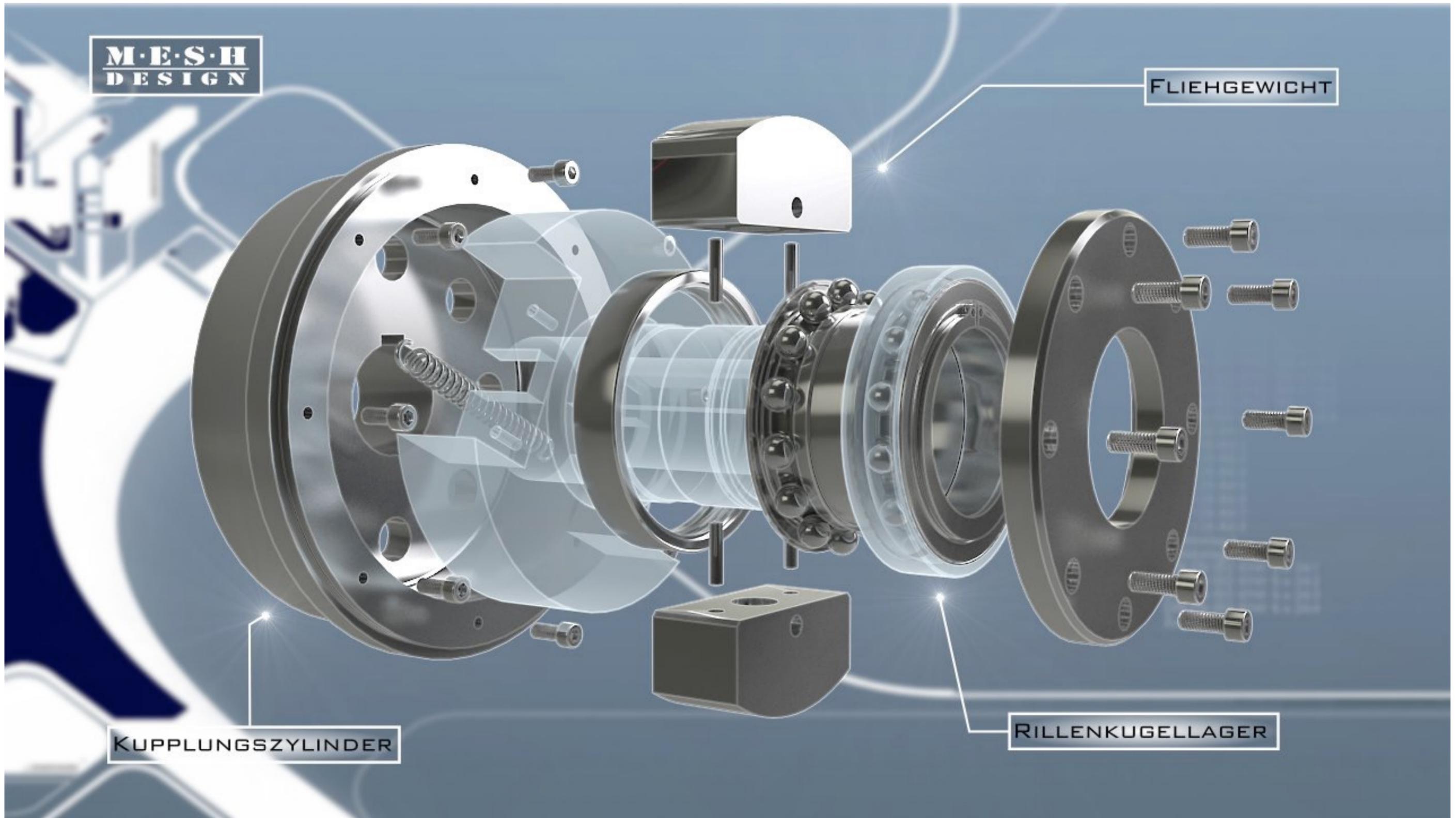
ALIGNED SECTION A-A (1:2)



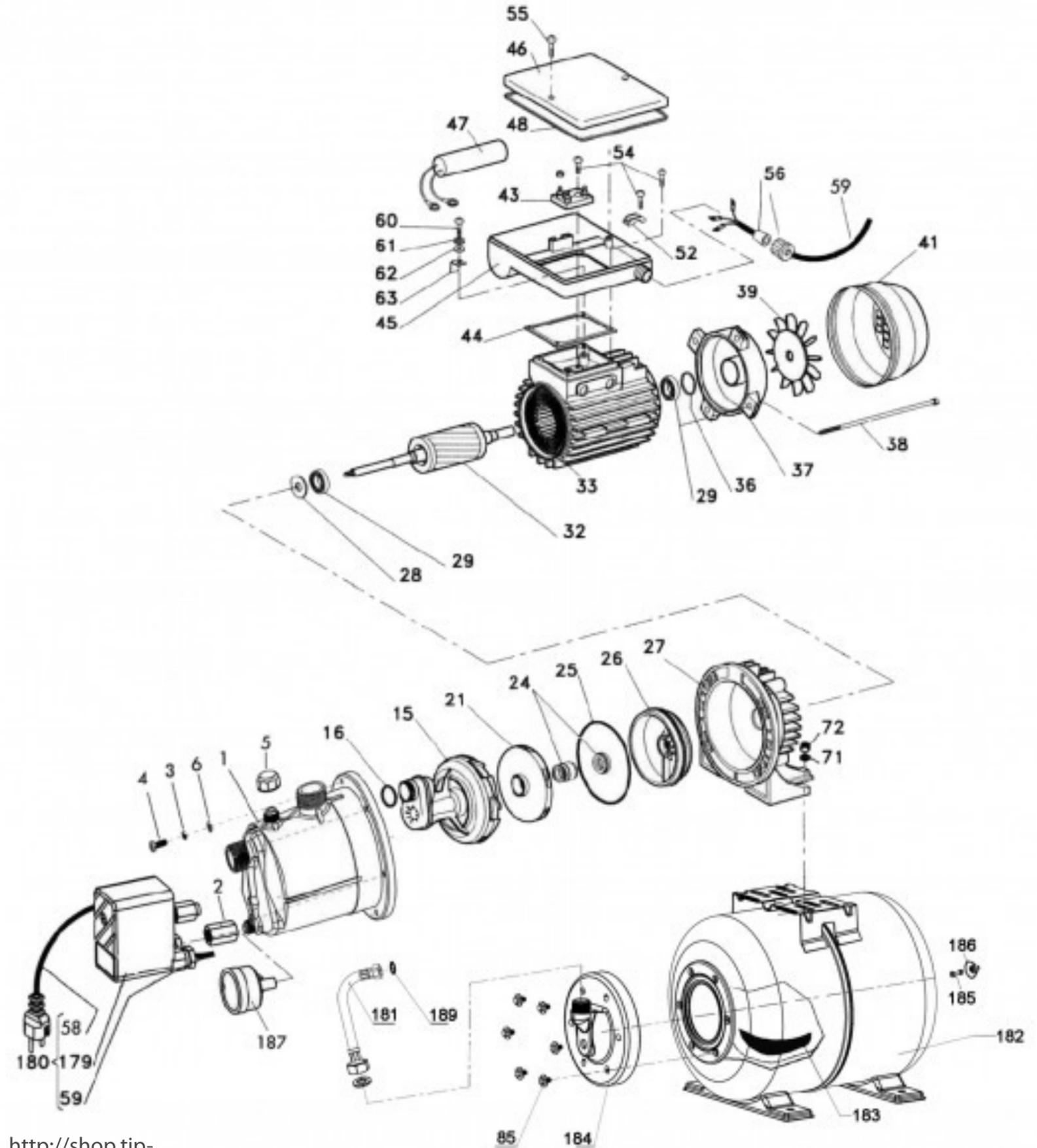
3D VIEW #2

AutoCAD 3	
3D Modeling	
PROJECT:	Lesson 14 Practice 14_2
DRAWING TITLE:	CONTROL ARM
DRAWN BY:	KB
DATE:	03/08/2013
SCALE:	1:2
CLASS:	CADD3
CHECKED BY:	KB
DRAWING NUMBER:	M-1

CAD-Beispiele

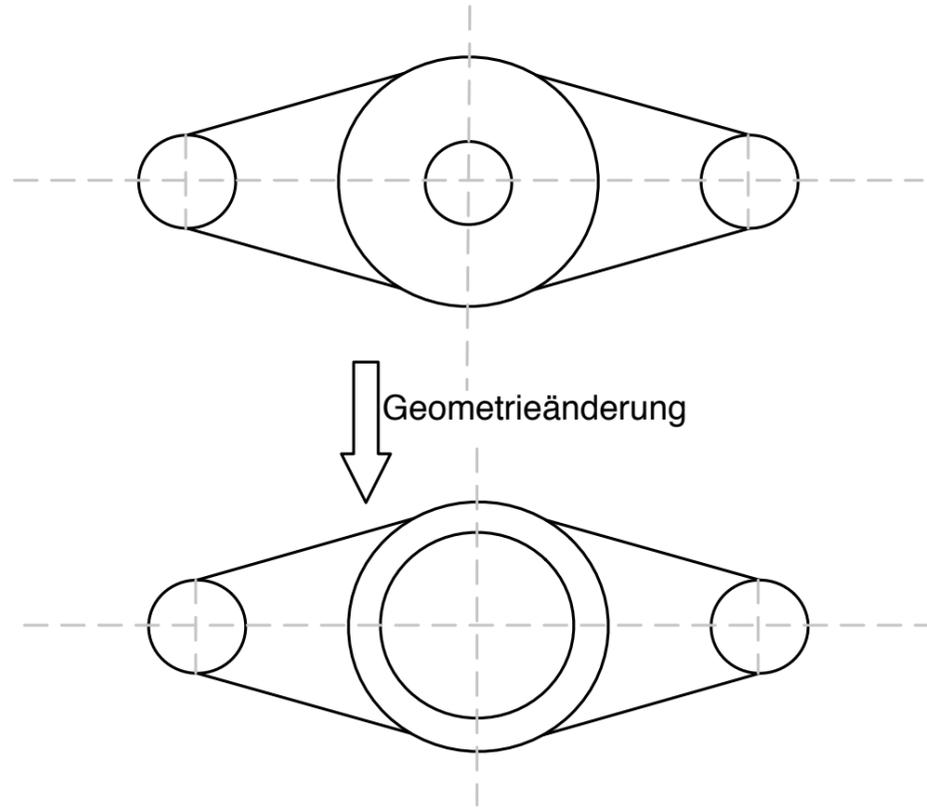


CAD-Beispiele

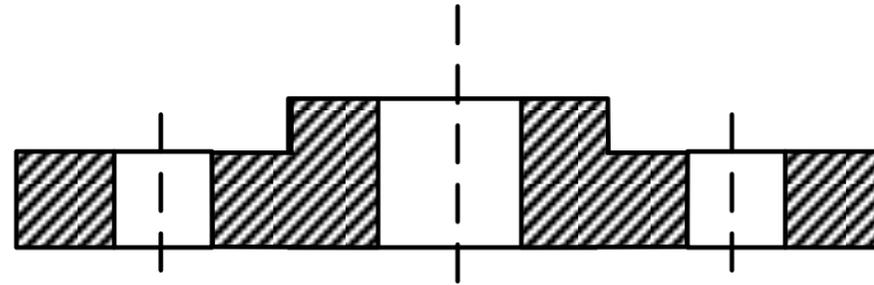


CAD-Grundfunktionen

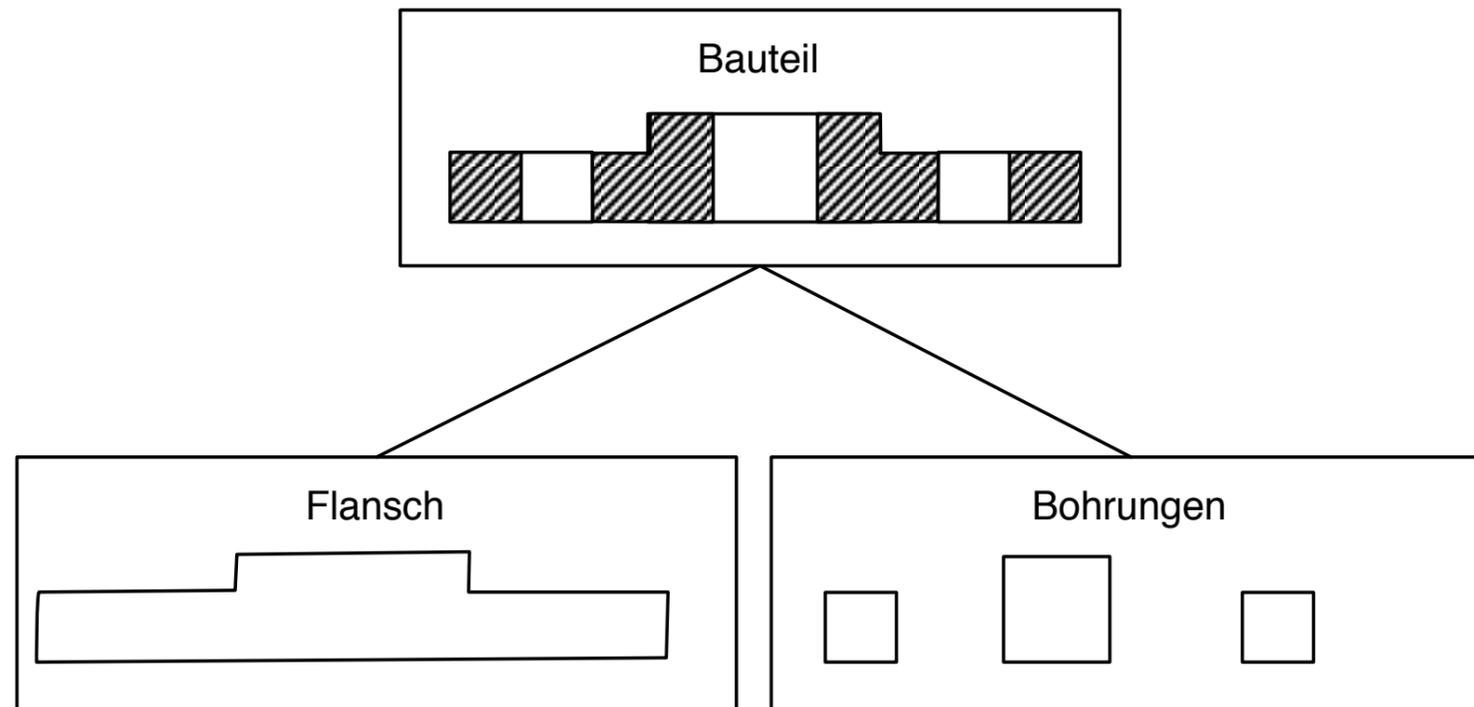
Manipulation



Schraffur

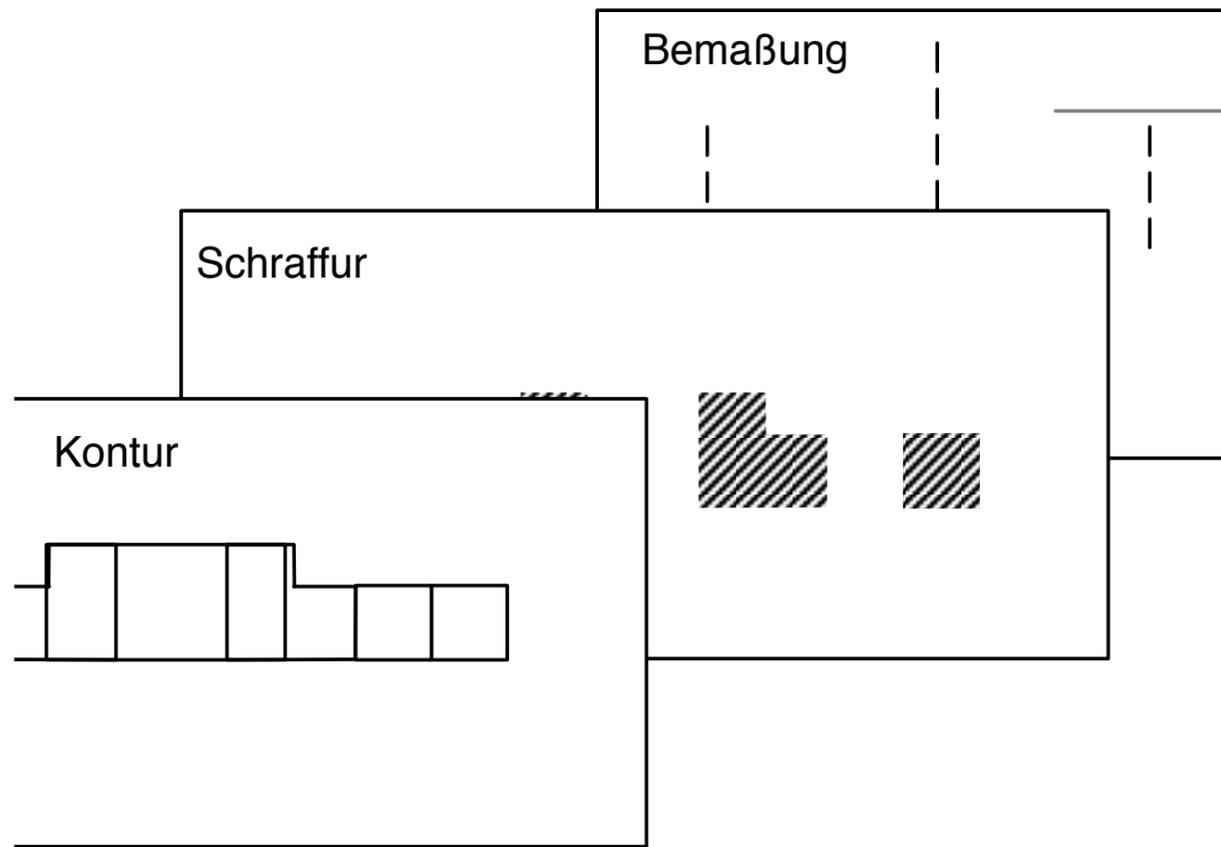


Manipulierbare Geometriegruppen

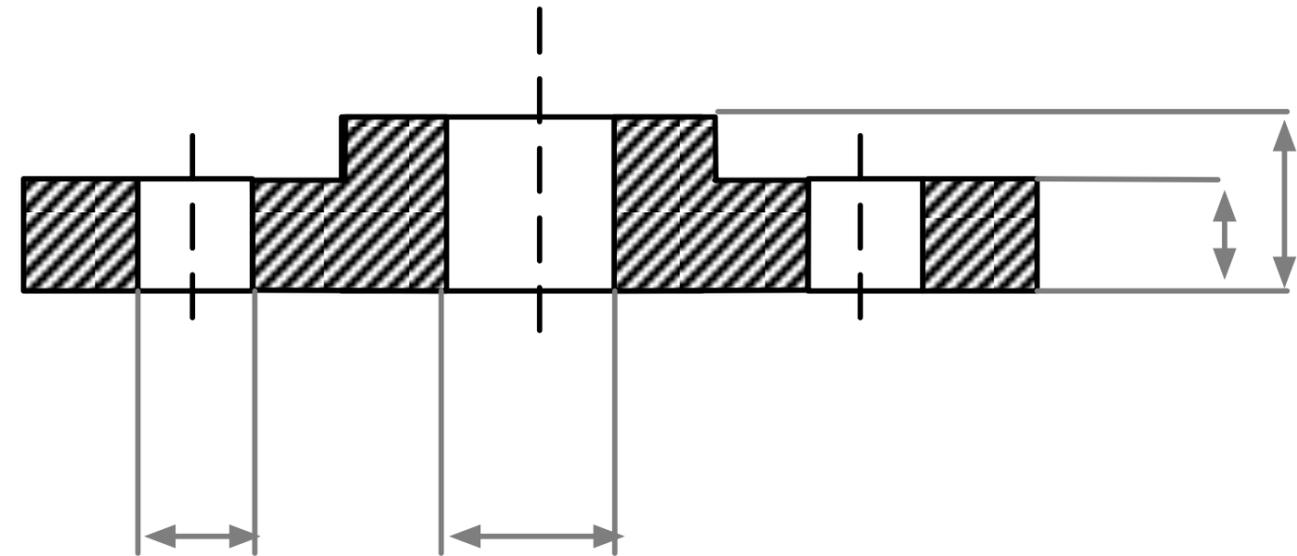


Weitere CAD-Funktionen

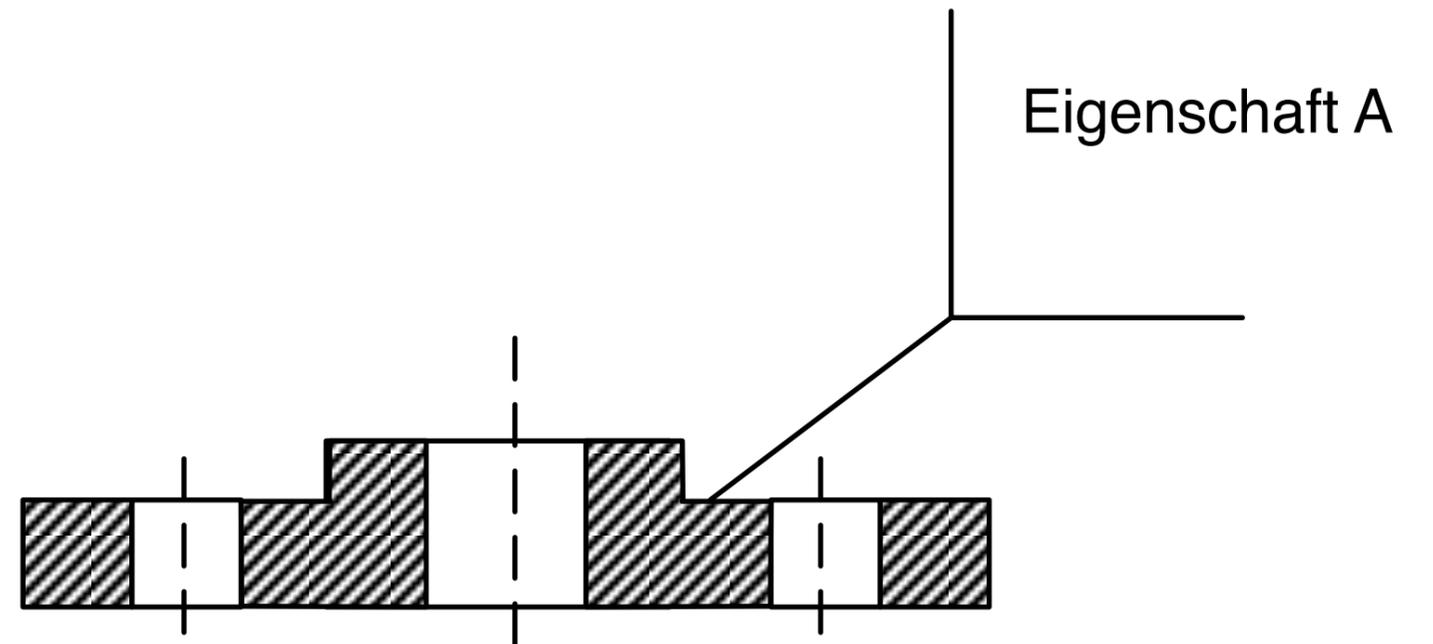
Ebenen-/Layertechnik



Bemaßung



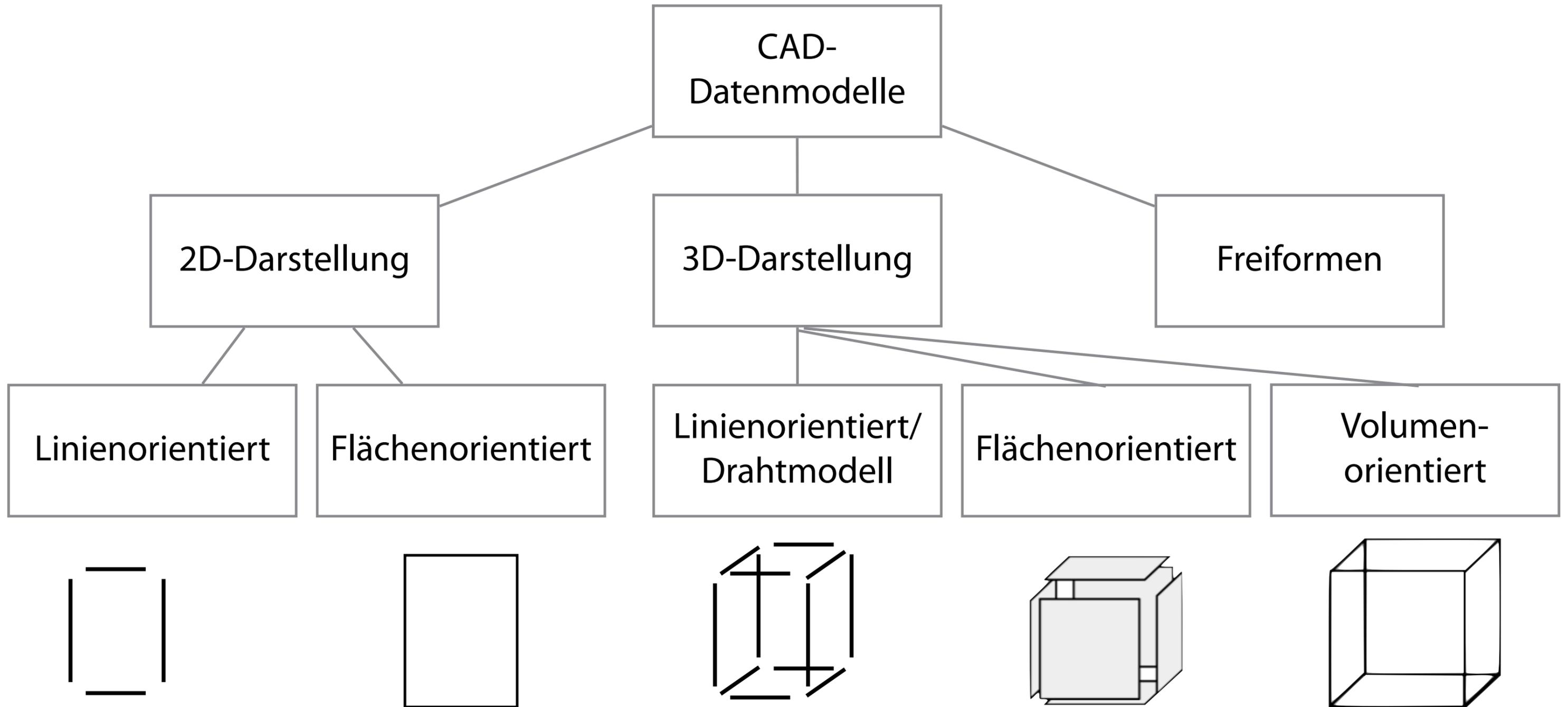
Attribute



Zusätzliche CAD-Funktionen

- Anbindung an NC / CNC - Systemen
- DXF- und DWG-Import
- Rasterbearbeitung mit Vektorisierung
- Hilfslinien und Konstruktionshilfen
- 2D/3D - Durchgängigkeit (Visualisierung und Darstellung)
- Unterstützung für Einzelteile, Zusammenbauten, Präsentationen, Zeichnungen, iParts, begleitete Bauteile
- Materialmanagement
- Stücklistenmanagement
- Dokumentenverwaltung (DMS)
- Trassen-Modell Funktionen
- Umfangreiche Bearbeitungsmöglichkeiten: Dehnen, Trimmen, Flächen erzeugen, Fangfunktion etc.
- Einhaltung von Unternehmens- und globalen Branchenstandards für technische Dokumente
- Unterstützung von IETMs (Interactive Electronic Technical Manuals) und IETPs (Interactive Electronic Technical Publications)

CAD-Datenmodelle



2D-Modelle können beispielsweise durch Rotation oder Extrusion zu 3D-Modellen werden.



Konstruktion

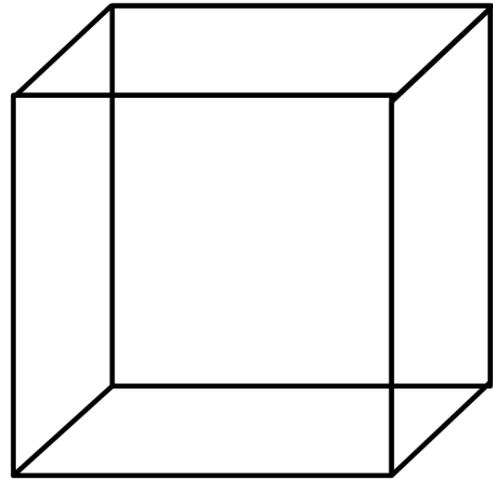
Computergestützte Konstruktion

Computer Aided Design

Digitale Repräsentation von CAD-Objekten

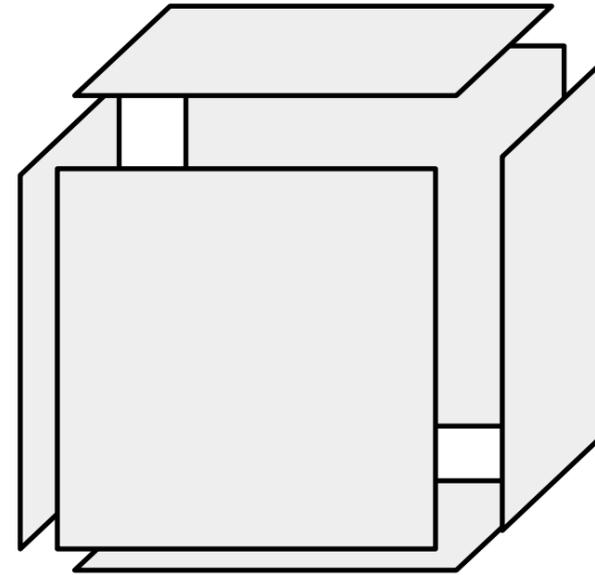
Rapid Prototyping/Generative Fertigungsverfahren

Vergleich der 3D-Modelltechniken



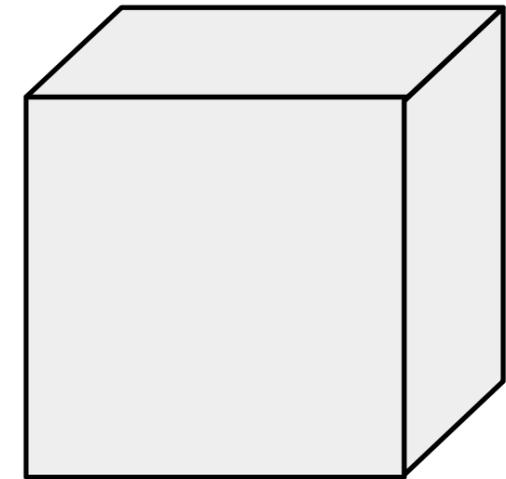
3D-Drahtmodell

- Mehrdeutigkeit
- Keine geometrische Integrität
- Keine physikalischen Eigenschaften
- keine Kollisionsprüfung



3D-Flächenmodell

- Keine Richtung für Material
- Keine Flächenintegrität
- Praktisch keine physikalischen Eigenschaften
- Kollisionsprüfung nur über Flächendurchdringung



3D-Volumenmodell

- Richtung für Material
- Physikalische Eigenschaften exakt berechenbar
- Kollisionsprüfung möglich
- Bsp.: CSG- und BRep-Volumenmodelle

Boundary Representation (BRep)-Modell

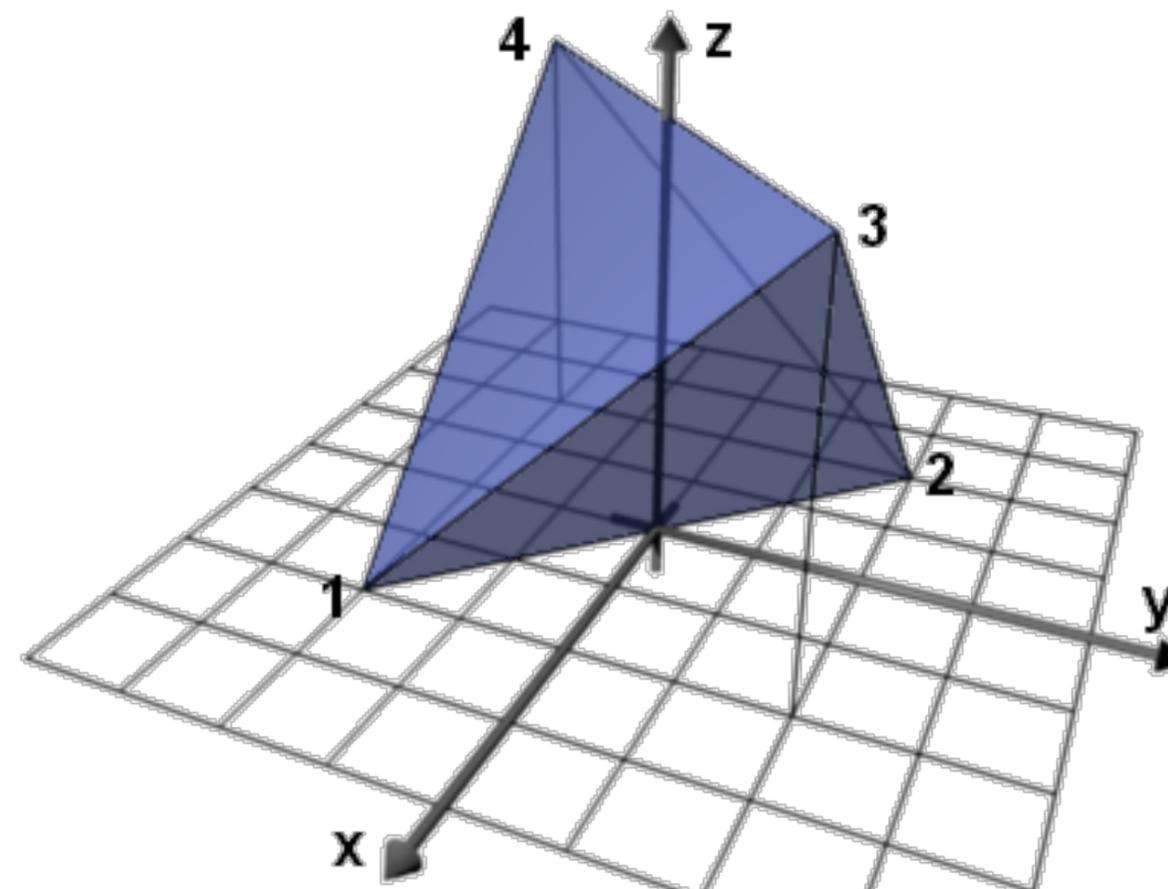
Beim BRep-Modell wird das Volumen durch die umhüllenden Begrenzungsflächen sowie die Lage des Materials relativ zu den Begrenzungsflächen beschrieben. Es ist ein um Materialvektoren erweitertes Flächenmodell.

Knotennr.	x	y	z
1	2	-2	0
2	-2	2	0
3	2	2	4
4	-2	-2	4

Kantennr.	Knotennr. 1	Knotennr. 2
1	1	2
2	2	3
3	1	3
4	1	4
5	2	4
6	3	4

Flächennr.	Kantenfolge (Kantenr. 1-3)
1	1 2 3
2	3 6 4
3	2 5 6
4	1 4 5

Volumennr.	Orientierung	Begrenzungs-flächen (Flächennr. 1..x)
1	1	1 2 3 4



Bewertung BRep-Modell

Vorteile

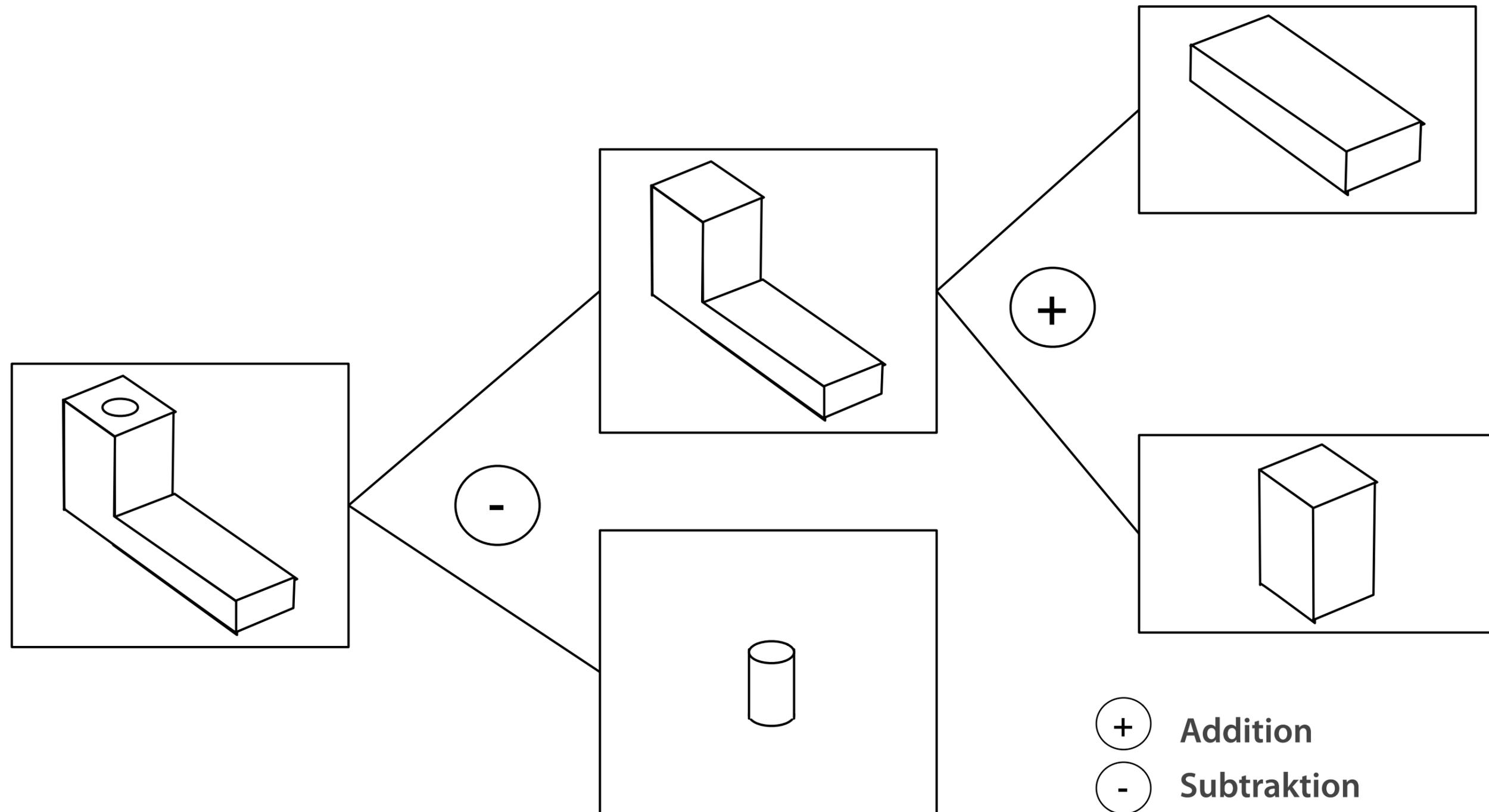
- Abgeschlossenheit und Konsistenz werden durch Algorithmen gewährleistet
- Das dargestellte Modell stellt jederzeit ein explizites und vollständiges Abbild der Geometrie dar
- Alle geometrischen Elemente im Modell können direkt angesprochen werden
- Beliebige geformte Volumenelemente möglich
- Keine Beschränkung auf Grundelemente (siehe CSG-Modell)
- Keine ständige Neuberechnung des gesamten Modells notwendig

Nachteile

- Erneute Überprüfung der Volumenkonsistenz nach jeder Operation notwendig
- Hoher Speicherplatzbedarf
- Keine Information über die Beschreibungshistorie
- Freiform Körper sind nicht beschreibbar

Constructive Solid Geometry (CSG)-Modell

Ein CSG-Modell ist ein generatives Volumenmodell, das aus Grundmodellen nach den Regeln der Booleschen Algebra aufgebaut wird. Die nötigen Verknüpfungen werden im CSG-Baum gespeichert.



Bewertung des CSG-Modells

Vorteile

- Gewährleistung der Modellkonsistenz
- Geringer Eingabeaufwand
- Geringer Speicherbedarf
- Leichte Überführung in andere Geometriemodelle
- Möglichkeit alle Elemente in ihrer Gesamtheit zu manipulieren

Nachteile

- Notwendigkeit der erneuten Evaluierung eines Modells bei erneutem Bildaufbau
- Schwierige Einbeziehung von Freiformflächen
- Informationen über wirkliche Flächen und Kanten des Objektes nicht speicherbar
- Einzelne Elemente des Volumens lassen sich nur schwer manipulieren

Vergleich CSG- vs. BRep-Datenstruktur

BRep-Datenstruktur

Gespeicherte Daten

- Geometrische Primitive des Objekts
- Relationen

Charakteristika

- Explizite Datenstruktur
- Komplexe Netzwerkstruktur
- Elemente des modellierten Objektes direkt manipulierbar
- Möglichkeit des Anbringens technologischer Informationen an beliebige Elemente des Objekts
- Keine Informationen über Verknüpfungshistorie

CSG-Datenstruktur

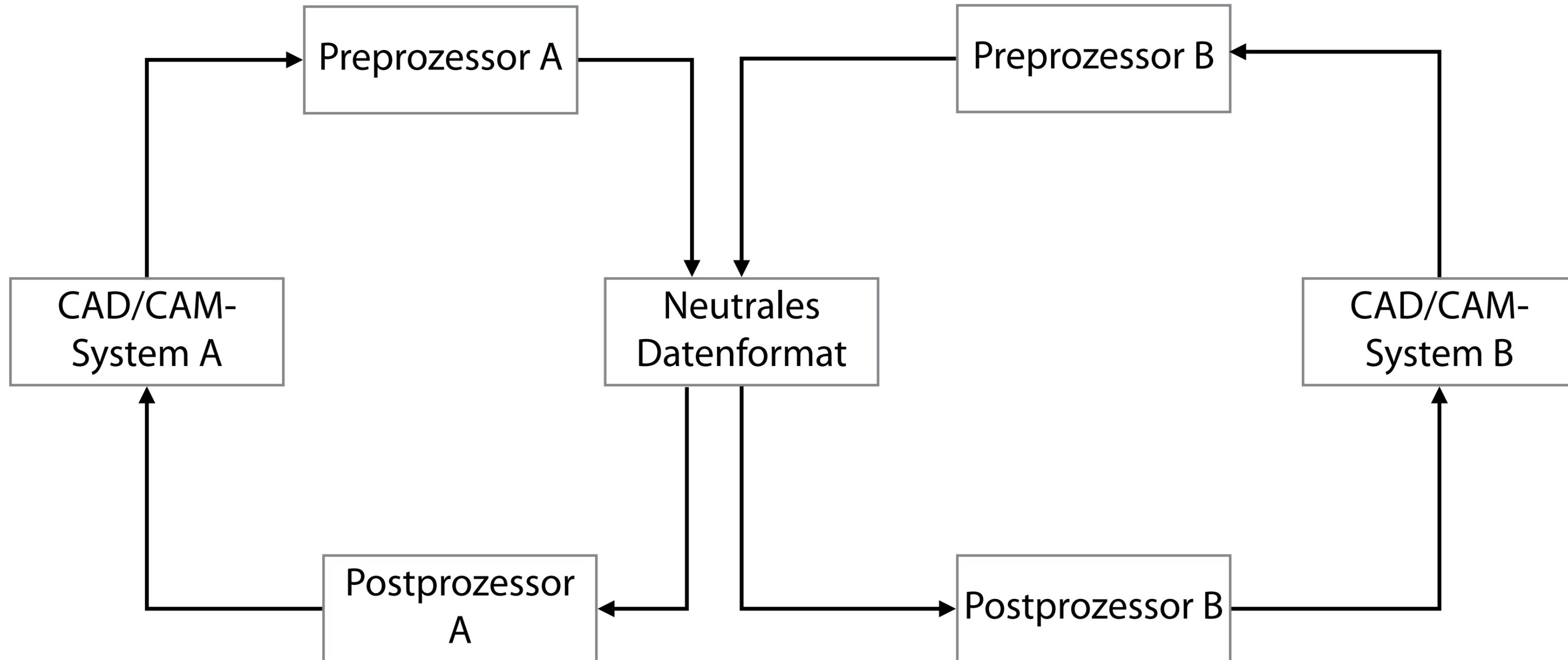
Gespeicherte Daten

- Volumenprimitive mit Transformationen
- Verknüpfungshistorie mittels boole'schen Operationen

Charakteristika

- Implizite, nicht evaluierte Datenstruktur
- Binäre Baumstruktur mit kompakter Speicherung
- Alle Elemente in ihrer Gesamtheit manipulierbar, wobei jedes für sich seine autonome Existenz behält
- Keine Informationen über wirkliche Flächen und Kanten des Objekts

Datenaustausch zwischen CAD-Systemen



Durch Austauschformate können verschiedene Module der virtuellen Fabrik miteinander verknüpft werden. Redundanzen und Informationsverluste werden verringert und eine Änderungshistorie ermöglicht.



AutoCAD

Von Autodesk

- Architektur
- Maschinenbau
- GIS

SolidWorks

von Dassault Systèmes

- Maschinenbau
- Anlagenbau
- Werkzeug- und Formenbau
- Design

hiCAD

von ISD Software und Systeme GMBH

- Maschinenbau
- Blechbearbeitung
- Stahl- und Metallbau
- Fassadenbau

Datenaustauschformate

ACIS

- Realisierung komplexer Freiflächen auf Basis von Non-uniform rational B-Splines
- Möglichkeit der Erweiterung um Attribute (komplexe Objekte)

DXF:

Drafting Exchange Format

- ASCII-Austauschformat von AutoCAD
- Konvertierung von 2D- und 3D-Geometrien sowie Zeichnungselementen

IGES: Initial Graphics Exchange Specification

- Übertragung von Produktinformationen
- Beschreibung der Flächen erfolgt analytisch oder approximativ durch Freiformflächen

STEP: Standard for the Exchange of Product Model Data

- Internationale Norm
- Definition eines Produktmodellschemas mit Übertragungs- und Archivierungsformate
- Definiert in ISO 10303

STL: Stereolithographie Language

- Austausch von Geometriedaten zwischen CAD-Systemen und Rapid-Prototyping-Maschinen
- Basiert auf Triangulationsverfahren

VDA-FS: Verband der deutschen Automobilhersteller - Flächenschnittstelle

- Austausch reine Gestaltdaten
- Basiert auf der topologischen Verknüpfung von Freiformflächen

STEP - Standard for the Exchange of Product Model Data

Allgemein

- ISO (International Standardization Organization) 13030
- Standard zur Beschreibung von Produktdaten
- Modulare Definition ermöglicht nutzerspezifische Anpassung (Unternehmens- oder Branchenspezifikation)
- Objektorientierung

Anwendungsbereiche

- Computer Aided Design (CAD)
- Computer Aided Manufacturing (CAM)
- Produktlebenszyklusmanagement (PLM)
- Digital Mock-Up (DMU)
- und weitere...

Umfang

- Funktionale und physische Aspekte eines Produkts
- Abbildung von Produktdateninformationen des gesamten Lebenszyklus
- Beschreibung produktdefinierender Daten (sowohl geometrisch als auch nicht-geometrisch)

Anwendungszwecke

- Datenaustausch mittels sequentieller Dateien
- Datenbankimplementierungen
- Langzeitarchivierung

STEP Bestandteile

Beschreibungsmodelle	Generische Ressourcen	Anwendungsprotokolle
11 EXPRESS-Beschreibungssprache 13 STEP-Entwicklungsmethode	41 Grundlagen der Produktbeschreibung 32 geometrische und typologische Repräsentationen 43 Präsentationsstrukturen 44 Produktstrukturen 45 Materialien 46 Visuelle Präsentation 47 Gestalttoleranzen 49 Prozeßstrukturen	201 Explizite Zeichnungen 203 Baugruppenkonstruktion 212 Elektrotechnische Anlagen 213 NC-Arbeitspläne für maschinelle Bauteile 214 Kerndaten für mechanische Konstruktionsprozesse für Automobile 224 Produktbeschreibung für die Prozeßplanung 226 mechanische Systeme von Schiffen
Anwendungsorientierte Basismodelle	Konformitätstests	Integrierte anwendungsbezogene Konstrukte
101 Zeichnung 102 Schriftstrukturen 103 Elektrik/Elektronik 104 Finite-Element-Analyse 105 Kinematik 106 Kernmodell für Baukonstruktionen	31 Generelle Konzepte 32 Anforderungen an die Testumgebungen	501 Drahtmodell 512 Facettenmodell 514 Randflächenmodell 515 CSG-Darstellung
Implementierungsmethoden	Abstrakte Testfälle	
21 Austauschstrukturen auf Textbasis 22 Spezifikation der Standard-Zugriffsschnittstelle	301 ATS für explizites Zeichnen 303 ATS für Baugruppenkonstruktion	



Konstruktion

Computergestützte Konstruktion

Computer Aided Design

Rapid Prototyping/ Generative Fertigungsverfahren

Anforderungsabhängige Einteilung additiver Fertigungsverfahren

Rapid Prototyping

- schnelle Herstellung von Prototypen oder Modellen zur Evaluierung von Design und Funktionalität, ohne den Einsatz traditioneller Werkzeuge

Rapid Tooling

- beschleunigte Produktion von Prototypenwerkzeugen oder Werkzeugkomponenten, um Stückzahlen jenseits der bei Rapid Prototyping üblichen Mengen zu realisieren

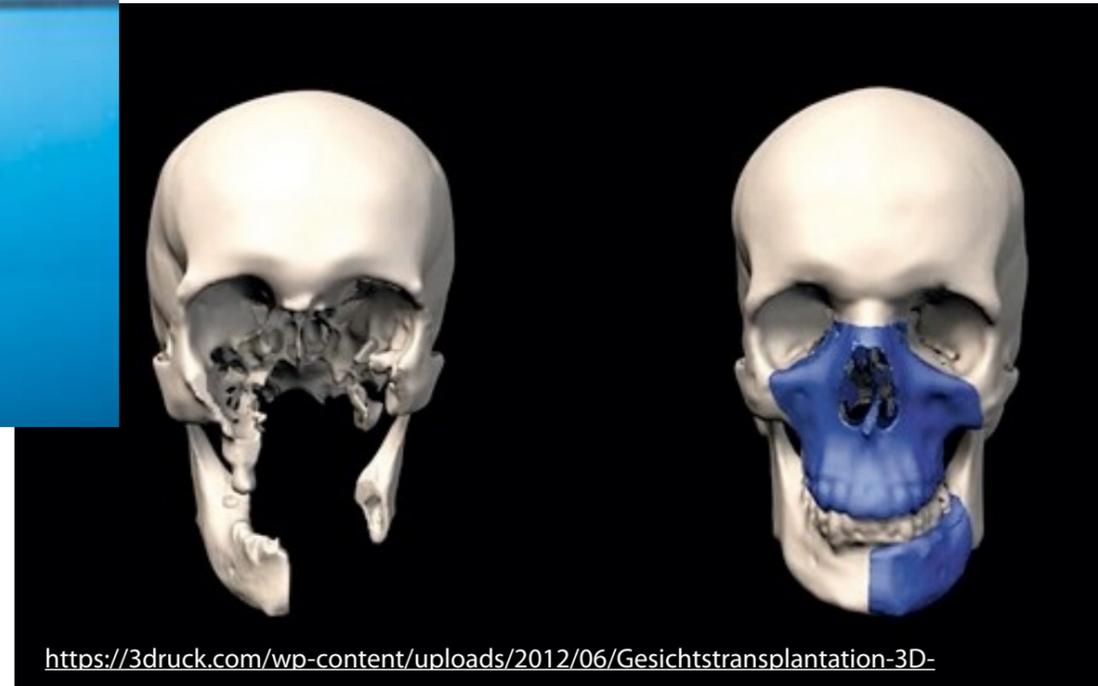
Rapid Manufacturing

- direkte und schnelle Produktion von Endprodukten oder Bauteilen, oft unter Einsatz additiver Fertigungstechnologien, ohne die Nutzung in traditioneller Weise hergestellter Werkzeuge



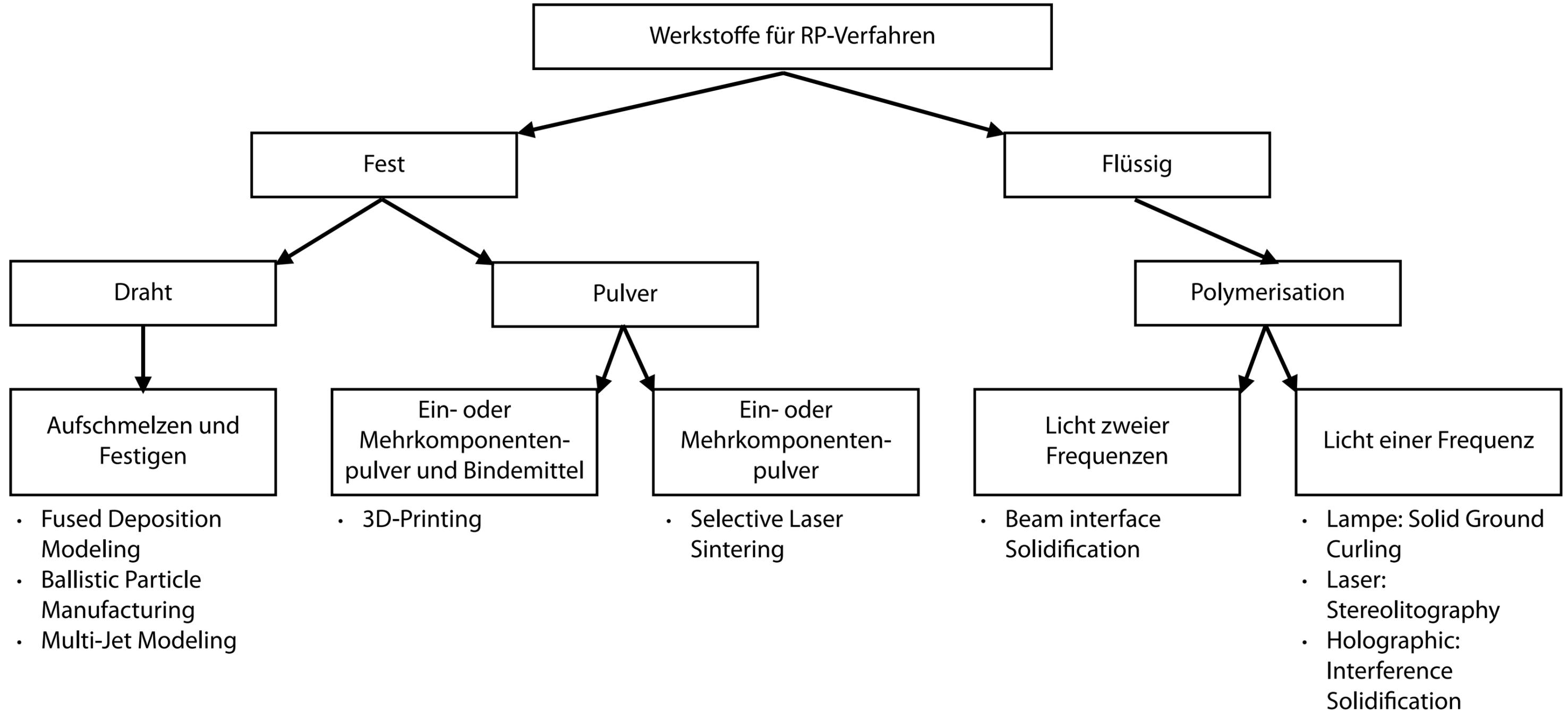
Bei Additiven Fertigungsverfahren wird das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut.

Eigenschaften generativer Fertigungsverfahren



- Direkte Schichtengenerierung aus rechnerinterner Darstellung (3D-CAD)
- (Keine) NC-Programmierung notwendig
- Vermeidung von Werkzeug-Kollision
- Prinzipielle Herstellbarkeit beliebiger Geometrien
- Lokale Schaffung von Werkstoffzusammenhalt

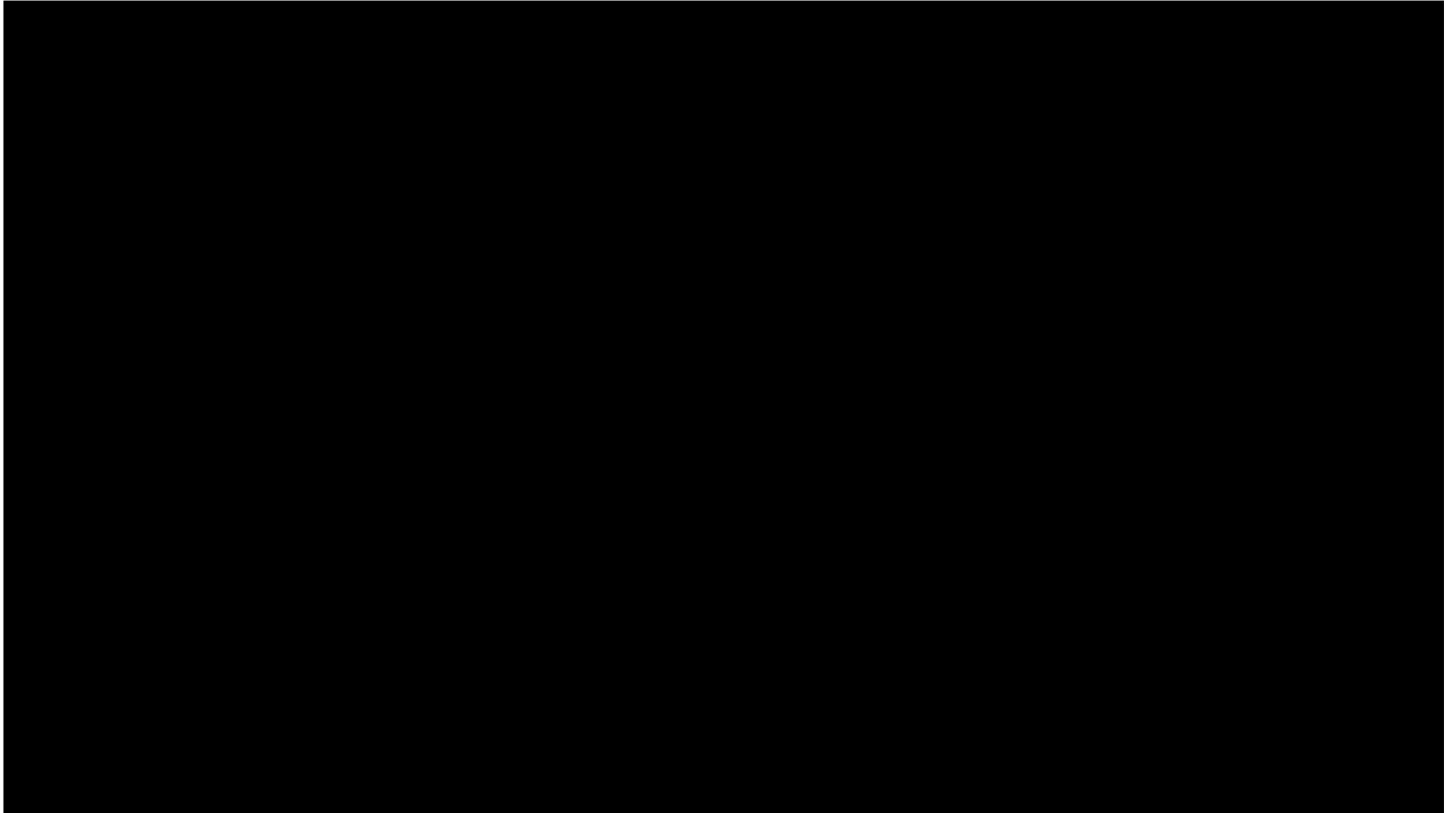
Einteilung generativer Fertigungsverfahren



Industriell relevante Rapid Prototyping Verfahren

Deutsche Bezeichnung	Englische Bezeichnung	Abkürzung
Stereolithographie	Stereolithography	SL
Selektives Laser Sintern	Selective Laser Sintering	SLS
3D-Druckverfahren	3D Printing	3DP
Extrusionsverfahren	Fused Deposition Modeling	FDM
Ballistische Verfahren	Ballistic Particle Manufacturing	BPM
Schicht-Laminier-Verfahren	Layer Laminate Manufacturing	LLM

It's Video-Time: Stereolithographie



Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=NM55ct5Kwil>



Your 3D Printing Solution
Send us your .STL file, We will advise you accordingly!

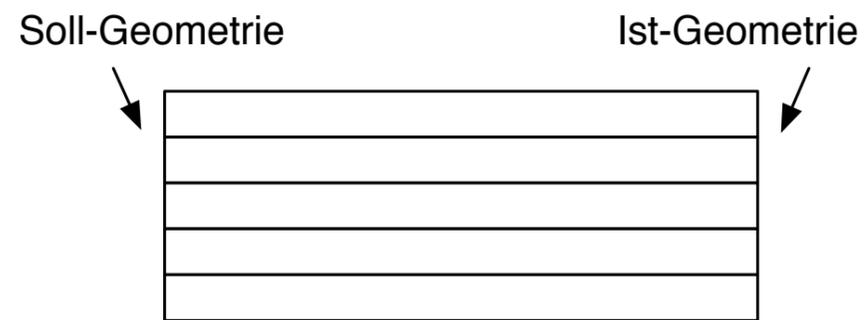
It's Video-Time: Fused Deposition Modeling



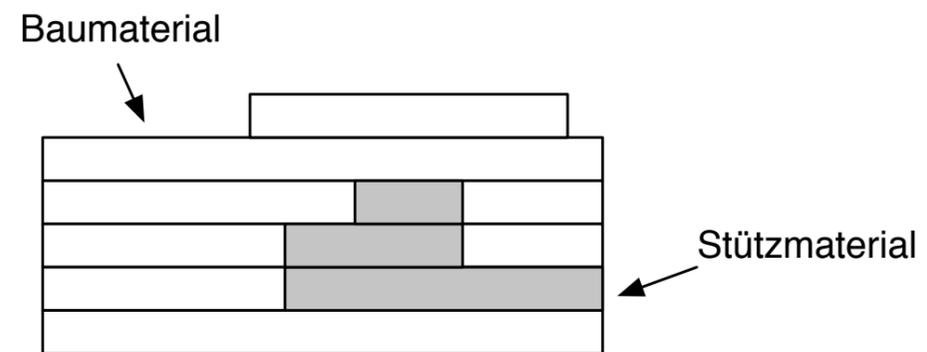
Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=WHO6G67GJbM>

Schichtenaufbau

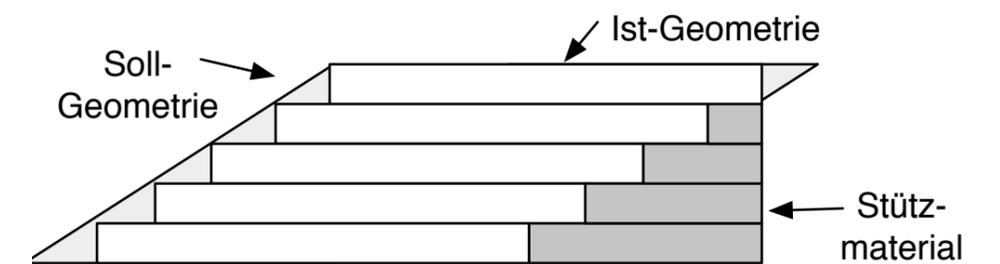
Vertikaler Modellaufbau, einfache Geometrie



Modellaufbau mit Hohlraum



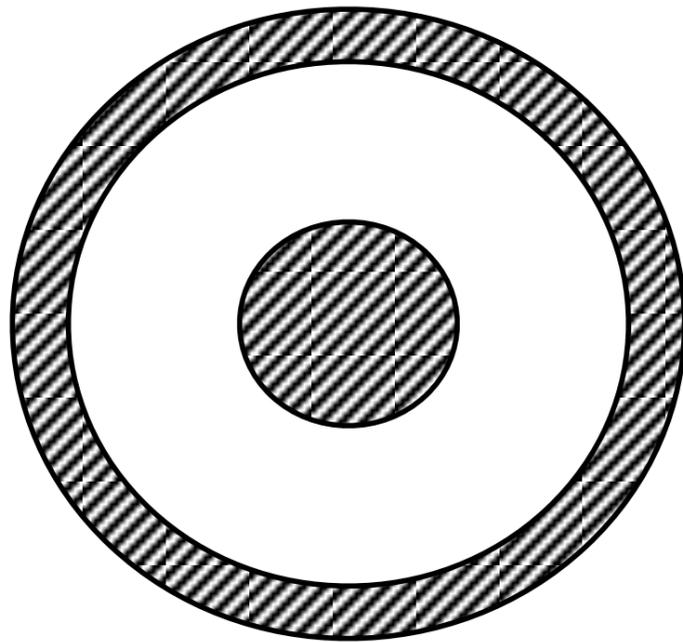
Modellaufbau mit Überhang



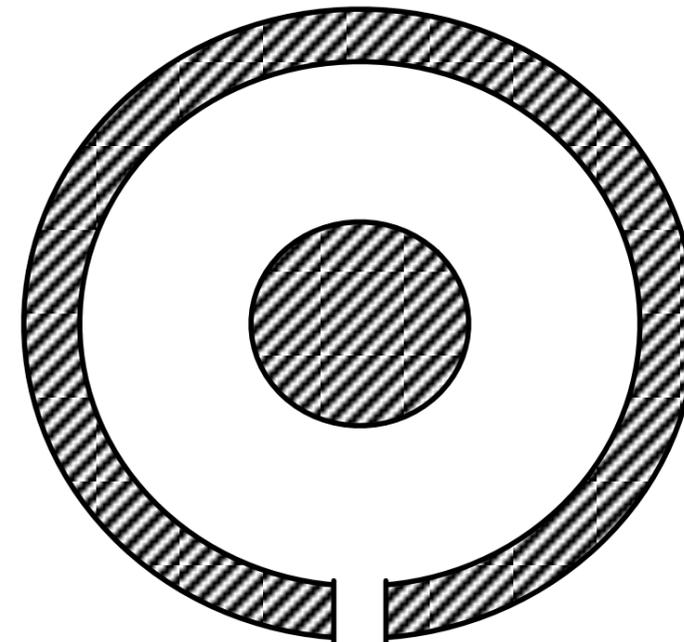
Herausforderungen

- Treppenstufeneffekt
- Abfluss von Füllmaterial
- Kombination verschiedener Materialien
- Oberflächenstruktur

Fertigung einer "Kugel in der Kugel"



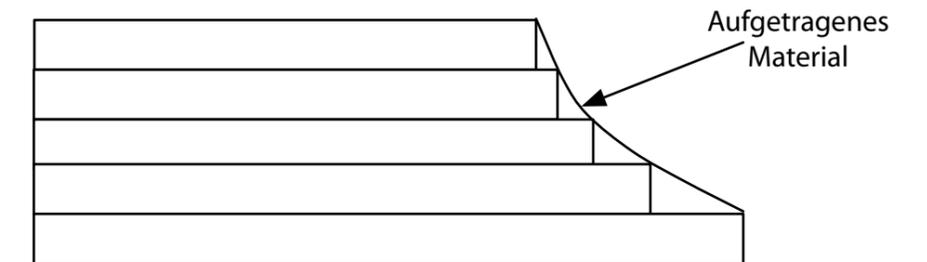
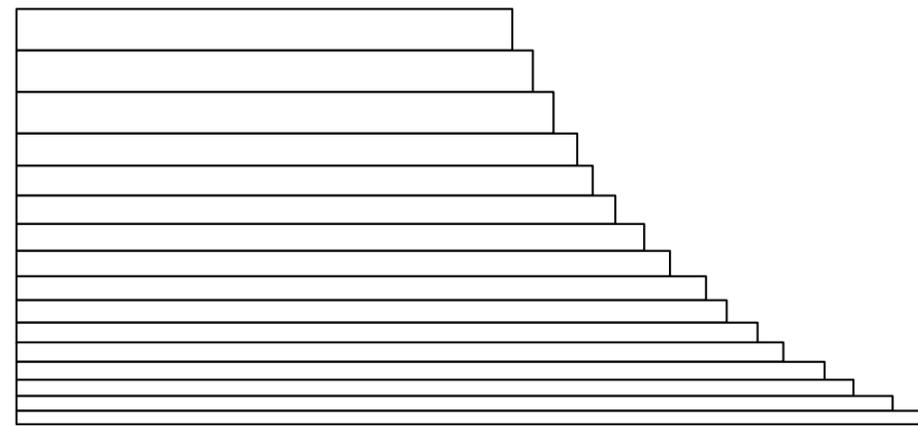
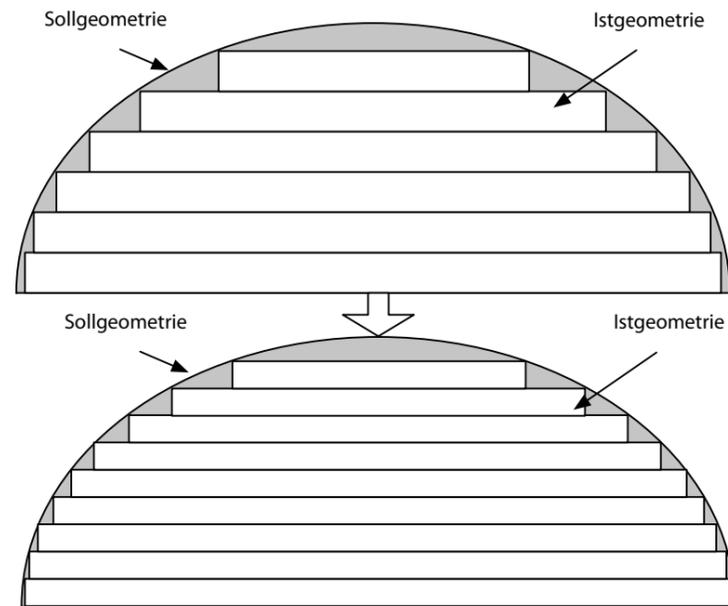
Herausforderung beim RP:
Wie kann das Stützmaterial entfernt werden?



Lösung: kleine Öffnung

Geometrieapproximierung

Problem: Treppenstufeneffekt durch diskrete Schichten



Verringerung der Schichtdicken

- Erhöhung der Schichtdicken
- Verlängerung der Bauzeit

Adaptive Slicing

- Verwendung unterschiedlicher Schichtdicken an einem Objekt
- Dünne Schichten werden da verwendet, wo sie notwendig sind

Beschichten/Nachbearbeiten

- Durch das Auftragen von zusätzlichem bzw. das Abtragen von überschüssigem Material werden die Stufen geglättet

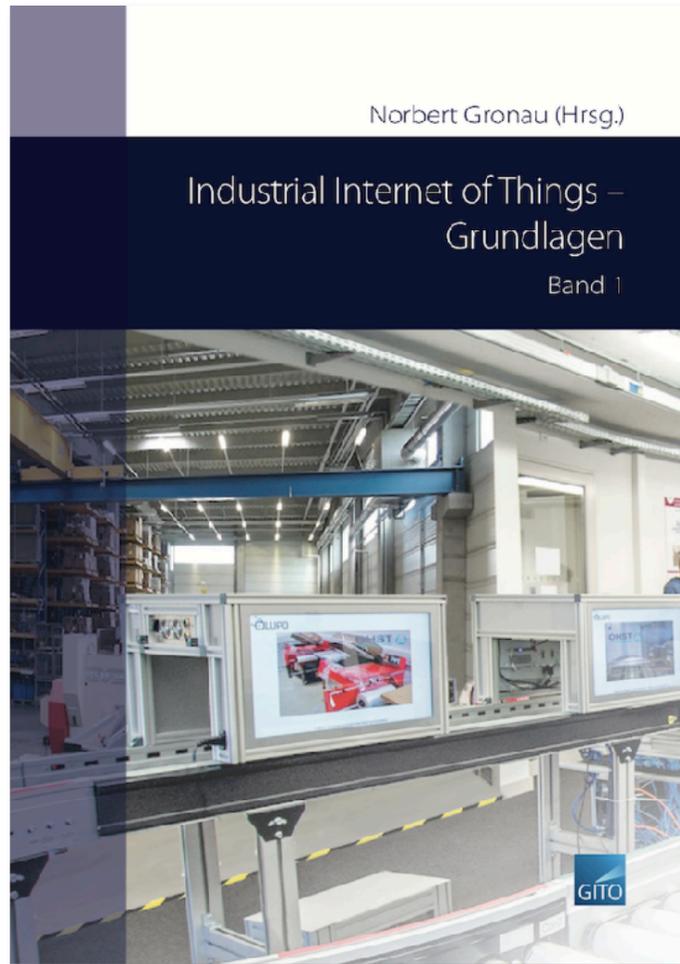
Chancen durch generative Fertigungsverfahren

- Flexible Produktion
- Wirtschaftliche Fertigung von Einzelteilen/
Individualisierung
- Verringerung Lagerhaltung
- Integralbauweise
- Geringere Time-to-Market
- Schnelles Änderungsmanagement
- Gewichtsreduzierung von Bauteilen
- Keine Fertigungswerkzeuge
- Sicherheit gegen Produktpiraterie

Anwendungen in unterschiedlichen Branchen

- Produktion: Mass Customization
- Medizinbranche: Druck individueller Implantate
- Bauindustrie: Riesendrucker für den Hausbau
- weiter: Mode, Schmuck, Musikinstrumente ...

Zum Nachlesen



Kontakt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Gronau

Universität Potsdam
August-Bebel-Str. 89 | 14482 Potsdam
Germany

Tel. +49 331 977 3322
E-Mail ngronau@lswi.de

Gronau, N.:
Industrial Internet of Things – Grundlagen
Berlin 2018, ISBN 978-3955452476 und 978-3955452612



Literatur

Appex - Product Development Prototyps Parts <https://www.appex.com/rapid-manufacturing.html>

Gausemeier, J. (2019). Rechnergestützte Entwicklung CAE/CAD: [https://web.archive.org/web/20210926062731/https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Computer-Integrated-Manufacturing-\(CIM\)/Rechnerunterstutzte-Entwicklung-\(CAE-CAD\)/index.html/](https://web.archive.org/web/20210926062731/https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Computer-Integrated-Manufacturing-(CIM)/Rechnerunterstutzte-Entwicklung-(CAE-CAD)/index.html/)

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren – Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. Carl Hanser Verlag, 2013.

Henning, K.: CAD-Technologie: Entscheidungskriterien für den wirtschaftlichen Einsatz in der Konstruktion. Hüthing. 1988.

Hoischer, H.; Hesser, W.: Technisches Zeichnen. Grundlagen, Normen, Beispiele. 30. Auflage. Cornelsen, 2005

ISO 13030-1:2024: Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange

Lobeck, F.: Vorlesungsskript: CAD/CAE (CAD), 2012

Niemann, G., Winter, H., Höhn, BR., Stahl, K. (2019). Arbeitsmethoden in der Produktentwicklung. In: Maschinenelemente 1. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55482-1_1

Roloff/Matek: Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung, 2011.

Rudolph F.-N., Dietrich, J.: Praktischer Einsatz von CAD- und EDM/PDM-Systemen Teil III. In CAD-CAM Engineering Report, Nr. 6 Juni 2003.

Uhlmann, E.: Rapid Prototyping. Vorlesungsskript: 2008

Vajna, S.: CAD/CAM für Ingenieure. Hardware, Software, Strategien. Vieweg, Braunschweig. 1994.