Gestalten für additive Fertigungsverfahren: Potenziale, Restriktionen und Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer
Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik (KAt)
Direct Manufacturing Research Center (DMRC)
Universität Paderborn

22. Fachtagung Rapid Prototyping
10. November 2017
Lemgo

Agenda

Motivation und Zielsetzung

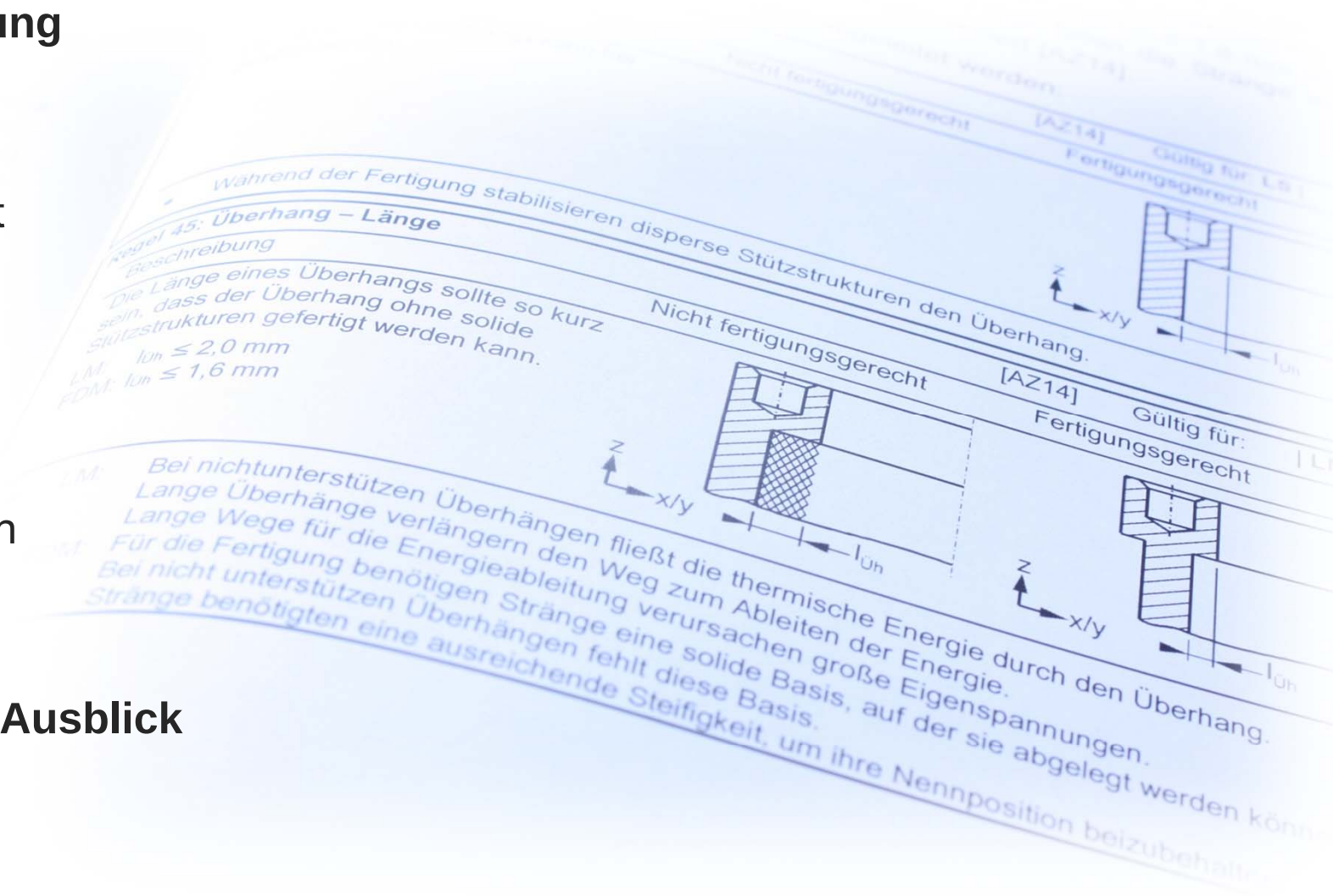
Potenziale

- Gestalterische Freiheit
- Topologieoptimierung
- Funktionsintegration

Restriktionen

- Konstruktionsrichtlinien
- Toleranzen

Zusammenfassung und Ausblick



Situation der additiven Fertigungsverfahren …

… bezüglich der Technologie

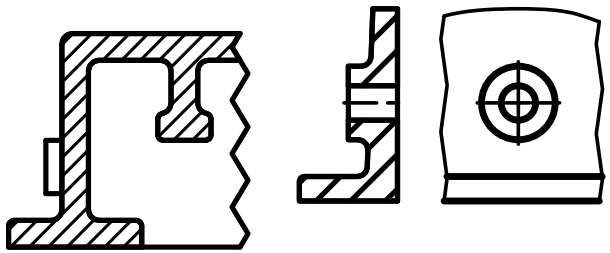
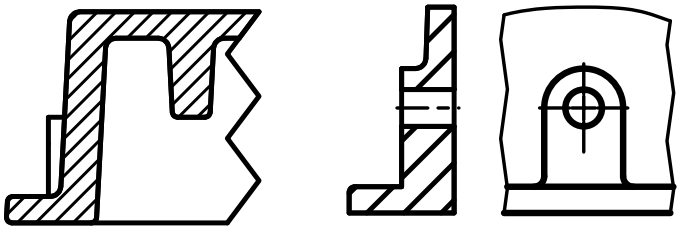
- Verkürzen der Markteinführungszeit
- Reduzieren der Entwicklungskosten
- Neue Gestaltungsmöglichkeiten

… bezüglich der Verbreitung

- Etabliert in Forschungseinrichtungen und technologieführenden Unternehmen
- Gestaltungsmöglichkeiten kaum bekannt
- In Lehre und Ausbildung unzureichend bekannt

Ziel

Hinweise für die Gestaltung additiv gefertigter Bauteile

	ungünstig	günstig
Keine Hinterschnitte		

Beispiel: Gestaltungsregel für Spritzgusstechnologie

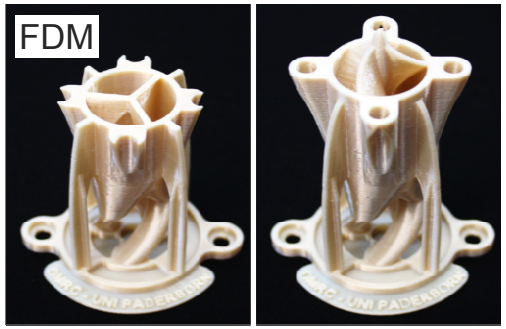
Potenziale: Gestalterische Freiheit
Technische Aspekte

Konstruktions- und Antriebstechnik

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

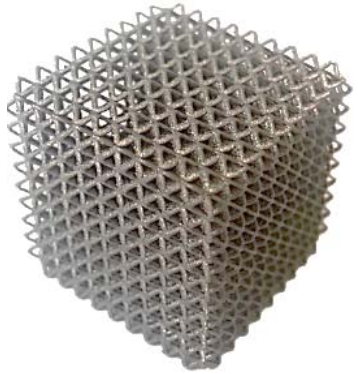
Hinterschneidungen

- Werkzeugzugänglichkeit nicht erforderlich
- Hinterschnitte können entstehen in
  - Schichtrichtung
  - Baurichtung



Gitterstrukturen

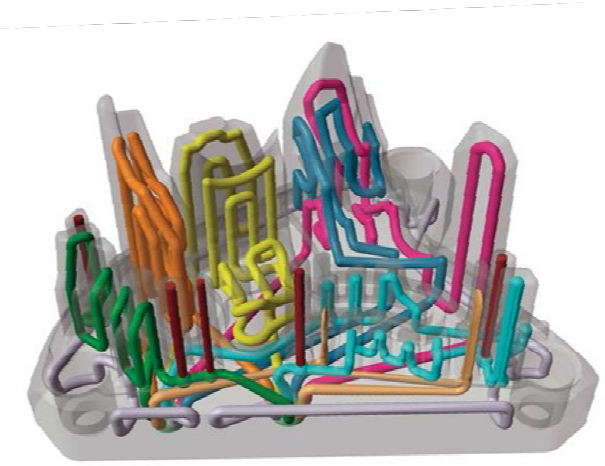
- Komplexe räumliche Anordnungen von Stäben und Balken



Innenliegende Strukturen

Beispiel: Konturnahe Kühlkanäle

- Herausforderung:
  Eventuell enthaltenes disperses Stützmaterial (z.B. Pulver) muss nachträglich entfernt werden



[medizin-und-technik.de]

Herstellung topologieoptimierter Bauteile

- Belastungsoptimiert, bionische Strukturen

[DMRC]

Potenziale: Topologieoptimierung
Herausforderung

Konstruktions- und Antriebstechnik

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Bauteilanforderungen

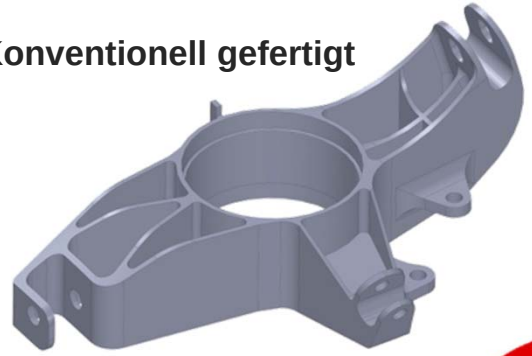
- Funktionsintegration erzeugt komplexe Bauteilstrukturen
- Leichtbau: Material nur da, wo es gebraucht wird.

➔ Mehrachsige Spannungszustände: FEM-basierte Topologie-Optimierung

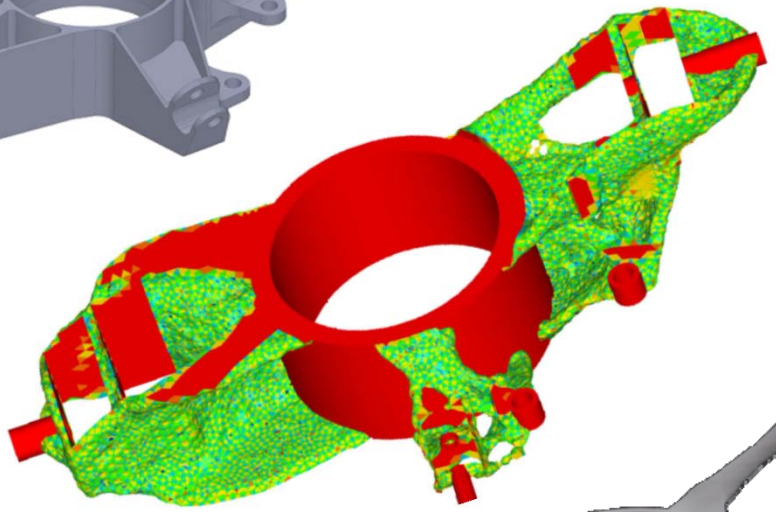
Einsatz „neuer“ CAx-Werkzeuge

➔ Angepasste Datenmodelle erforderlich

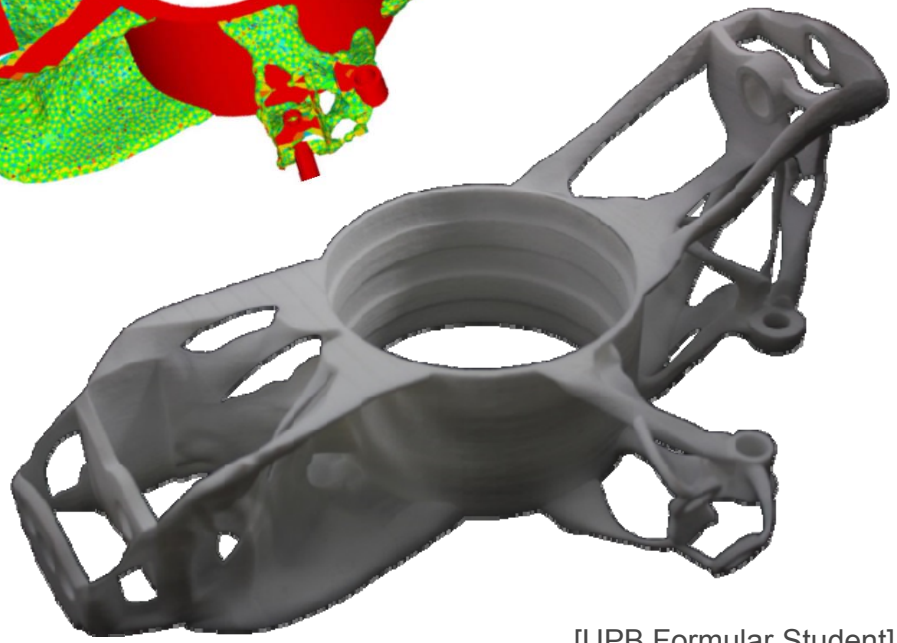
Konventionell gefertigt



FEM-Modell



Additiv gefertigt

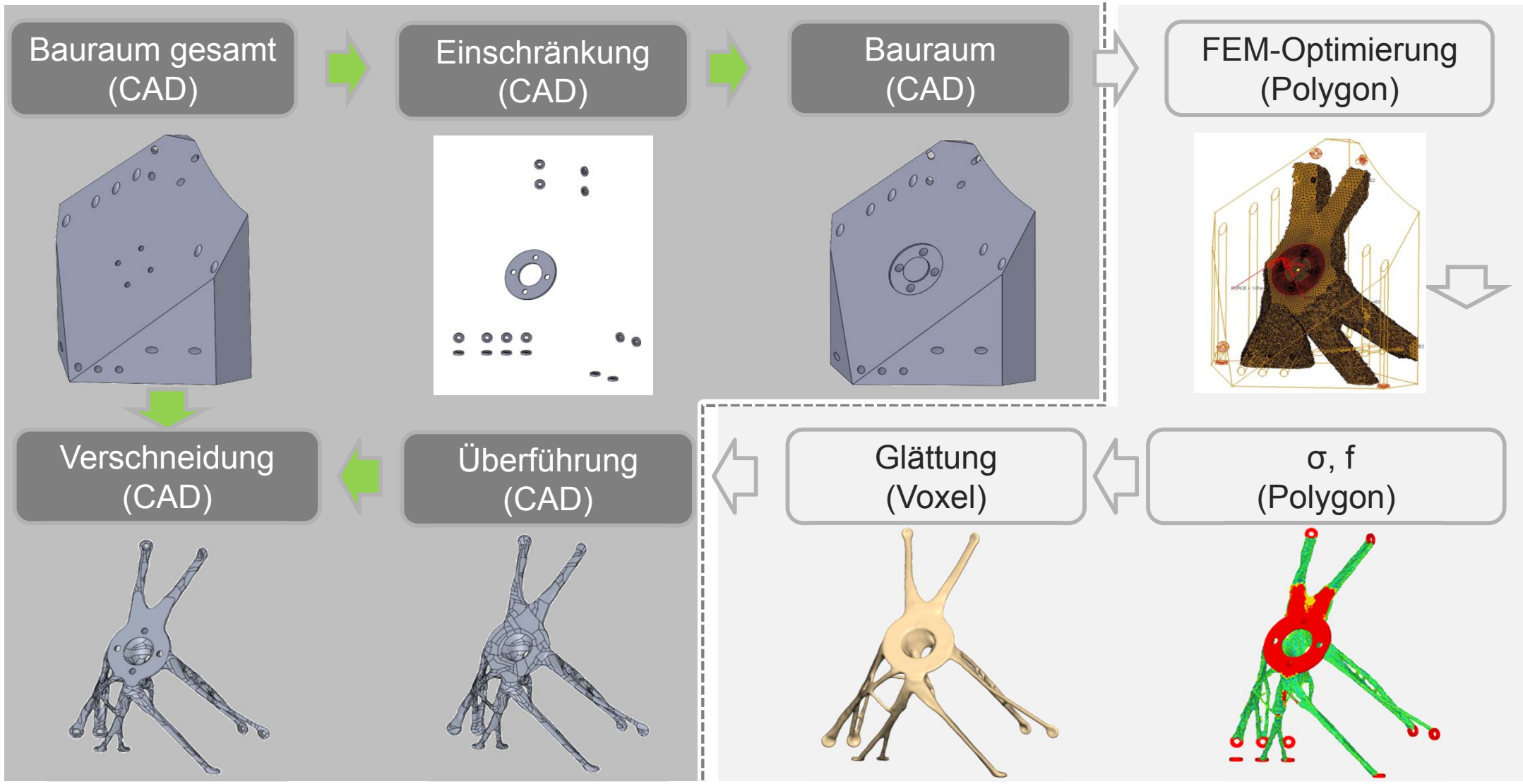


[UPB Formular Student]

Potenziale: Topologieoptimierung
Software und Ablauf

Konstruktions- und Antriebstechnik

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft



[DMRC-CIK Reiher]

Potenziale: Topologieoptimierung
Beispiel

Konstruktions- und Antriebstechnik

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Reaction Wheel-Bracket (ÉSA)

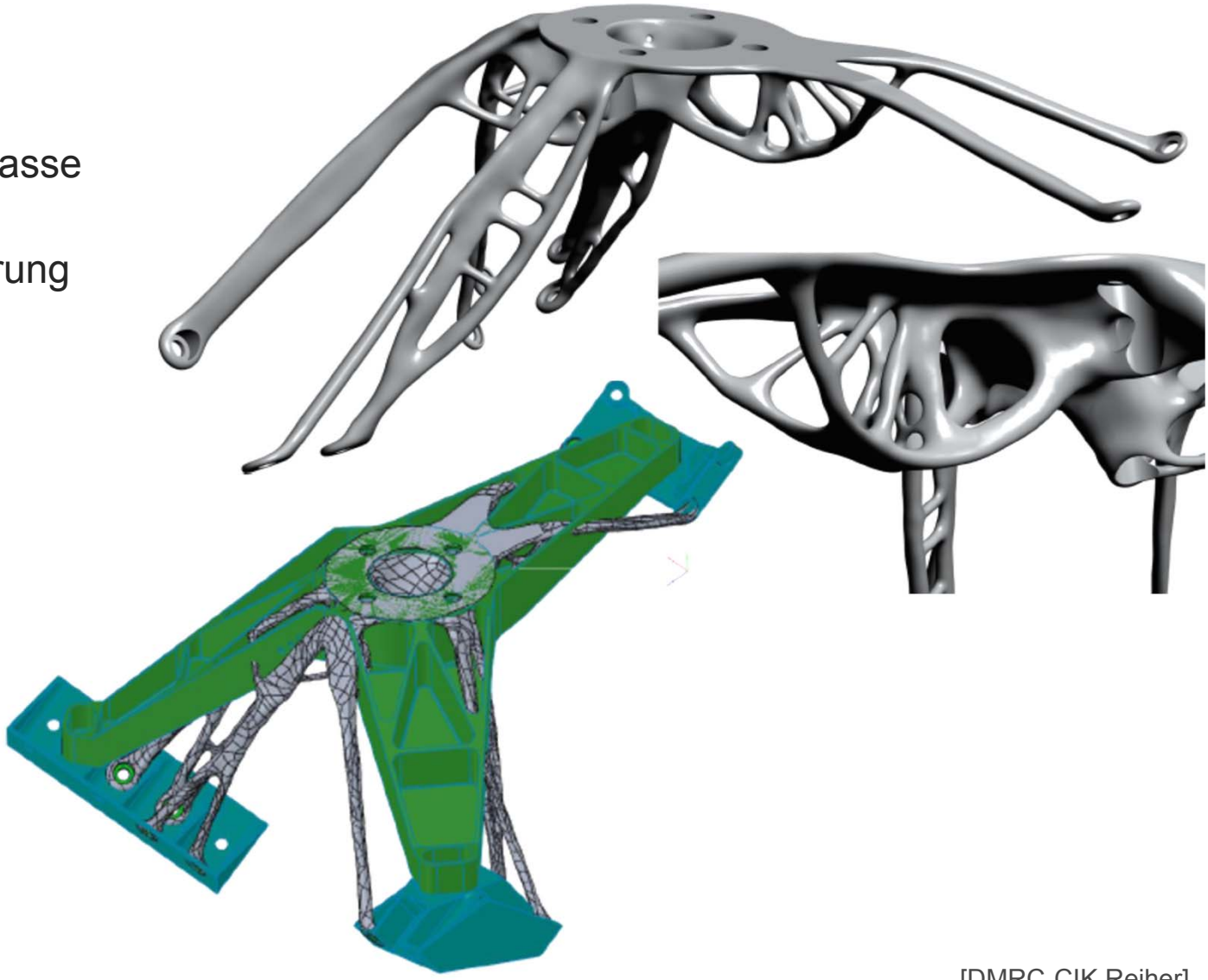
- Bauteil eines Satelliten
- trägt drehbar gelagerte Schwungmasse
- Beschleunigen / Verzögern der Schwungmasse bewirkt Lageänderung (ohne Treibstoff)

Vergleich mit bestehender Lösung

- Gewicht: - 60 %
- Verformung: - 37 %
- Eigenfrequenz in weniger kritische Bereiche verschoben
- Kosten halbiert

Umsetzungshemmnis

Qualitätssicherung



[DMRC-CIK Reiher]

Potenziale: Funktionsintegration
Dämpfung

Konstruktions- und Antriebstechnik

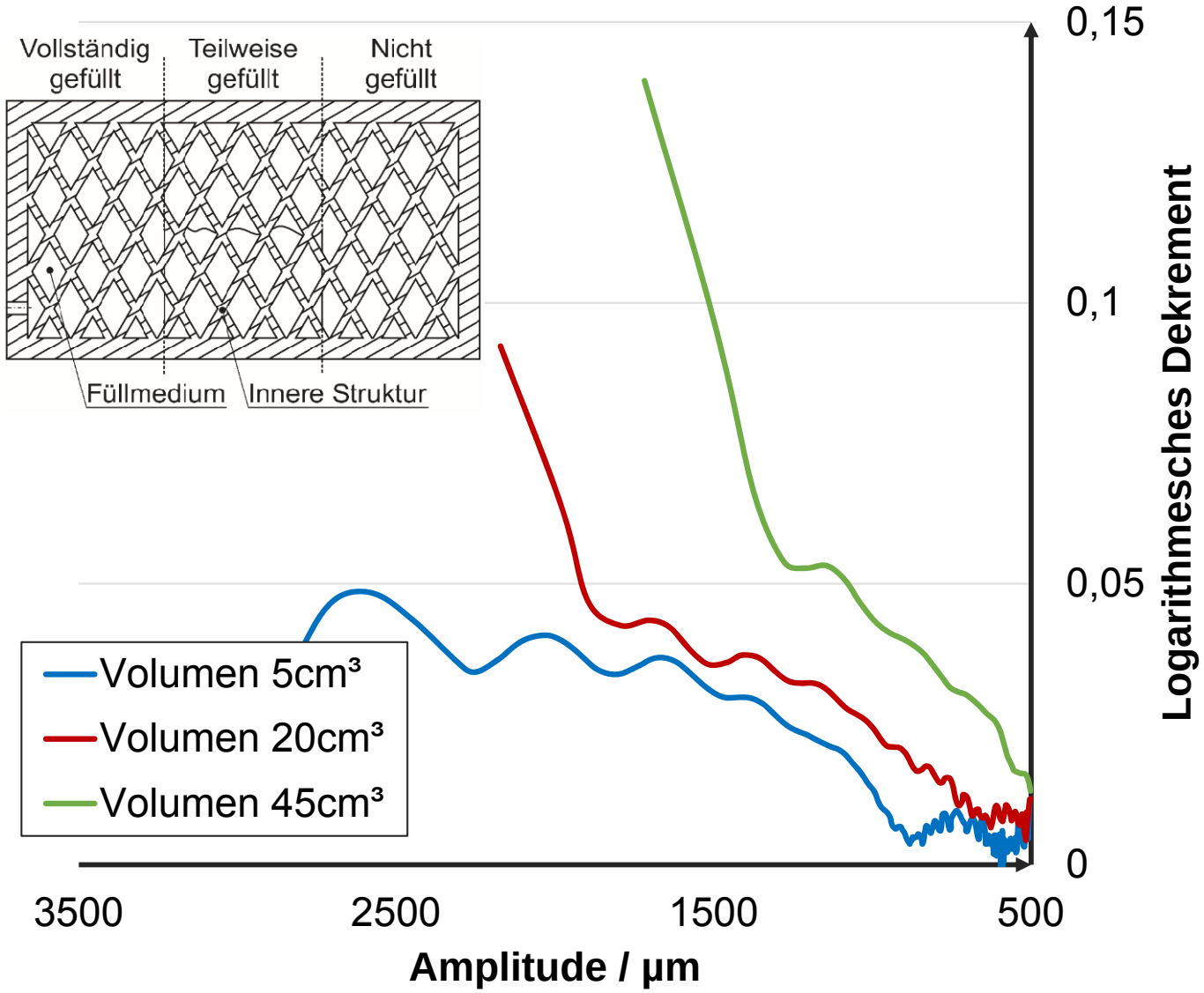
UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Durchführung:
- Biegebalken mit unterschiedlichen Hohlraumvolumina, Ausschwingen nach Anfangsauslenkung

Beobachtung:
- Stärkere Dämpfung bei höherem Hohlraumvolumen
- Logarithmische Dekrement ist abhängig von der Amplitude.

Interpretation:
- Bei größerem Hohlraumvolumen befinden sich mehr Partikel im Hohlraum, die zu mehr Kollisionen und Reibkontakten beitragen.

patentiert durch Siemens AG



[DMRC-KAt Künneke]

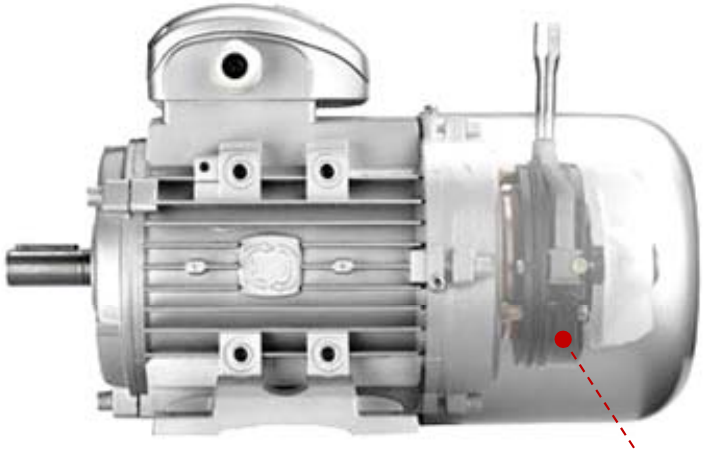
Potenziale: Funktionsintegration
Dämpfung – Beispiel Federkraftbremse

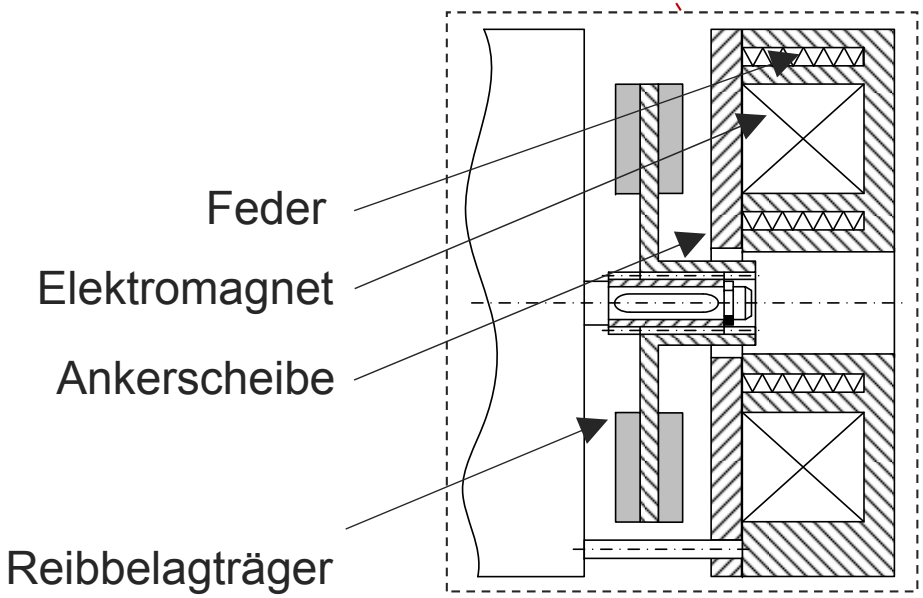
Konstruktions- und Antriebstechnik KAt

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

- Verwendung zum Abbremsen und Halten von Massen, häufig positioniert am B-Lagerschild von Elektromotoren
- Federelemente stellen die Bremskraft
- Lüften der Bremse durch den Elektromagneten: Beschleunigungen der Ankerscheibe führt zu Schwingungsanregung beim Aufprall (Gong)
- Sensible Anwendungen erfordern geräuscharme Bremsen (z.B. Theatertechnik, Aufzüge, …)

➔ Additiv gefertigte Ankerscheibe mit Dämpfungsintegration





[DMRC-KAt Künneke]

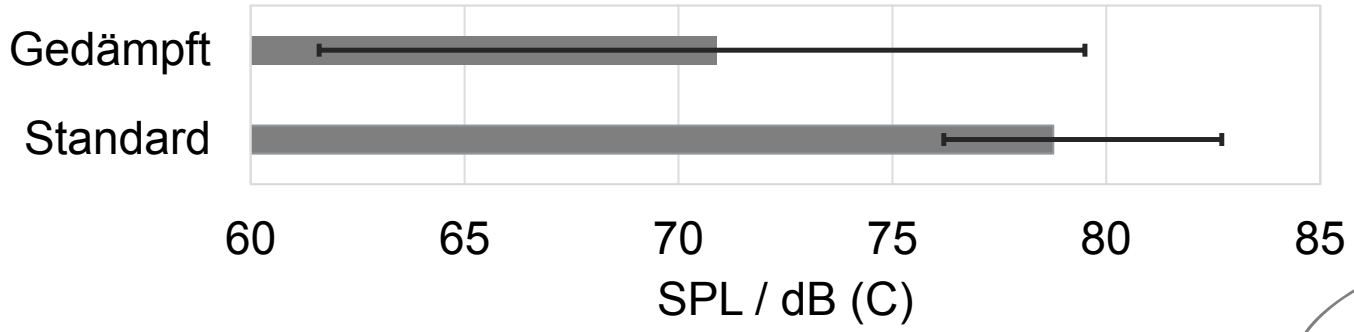
Potenziale: Funktionsintegration
Dämpfung – Beispiel

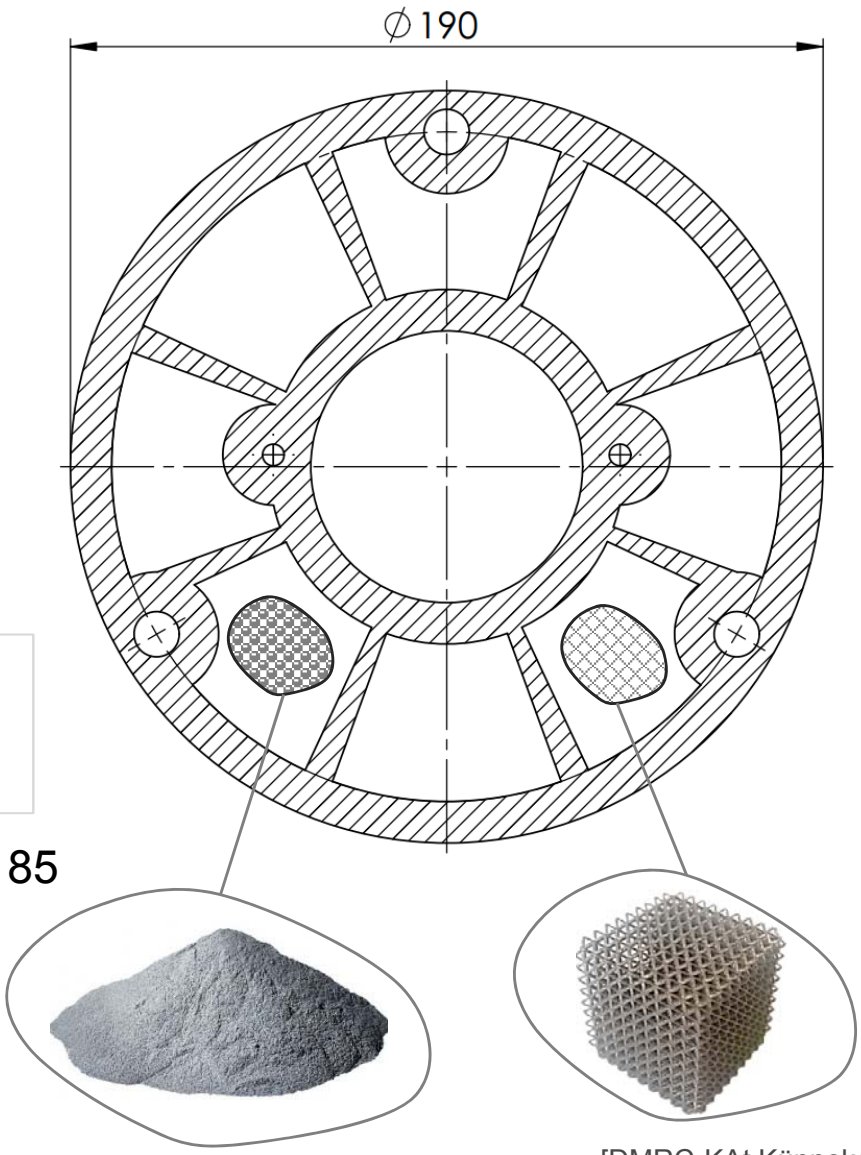
Konstruktions- und Antriebstechnik KAt

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Additiv gefertigte Ankerscheibe mit Dämpfungsintegration

- Segmentierter Hohlraum für eine verbesserte Aufnahme der Aufprallkräfte
- Integration von Gitterstrukturen zur Unterstützung von geringen Wanddicken
- Verwendung eines neuartigen Bremssystems aufgrund des nichtmagnetischen Werkstoffes





[DMRC-KAt Künneke]

Restriktionen: Konstruktionsrichtlinien
Systematisches Vorgehen

Konstruktions- und Antriebstechnik KAt

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Definition von Standardelementen

- Geometrische Elemente (z. B. Wand, Zylinder …)
- Identifizierung von Attributen (z. B. Wanddicke)

Fertigung der Standardelemente

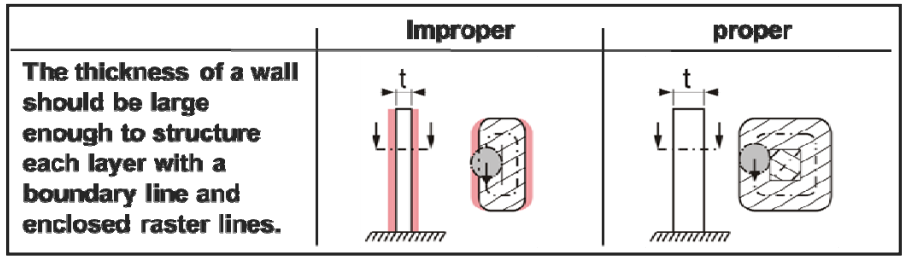
- Mit unterschiedlichen Attributsausprägungen
- **LS:** EOS395, PA2200, PPP120, d_S = 0,120 mm
- **LM:** SLM250, 316L, 400 W, d_S = 0,030 mm
- **FDM:** Fortus400, Ultem*9085, d_S = 0,250 mm

Qualitätsprüfung

- Untersuchung verschiedener Qualitätsmerkmale (z. B. Maßabweichung, Rundheitsabweichung …)

Ableiten von Konstruktionsregeln

- Vergleich der Qualität mit Attributsausprägungen

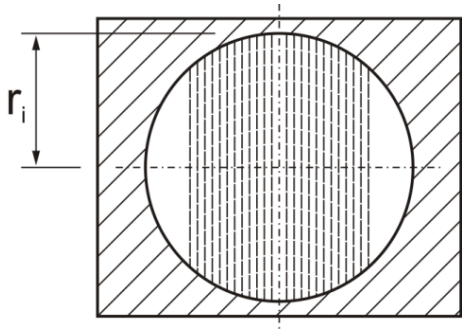
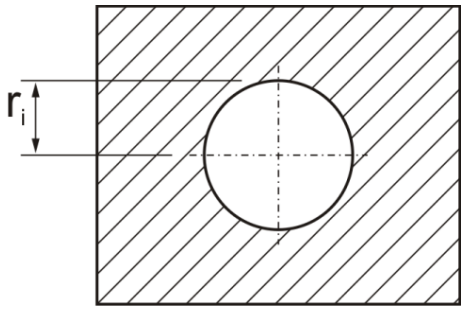


[DMRC-KAt Adam]

Restriktionen: Konstruktionsrichtlinien
Bohrungsdurchmesser

Konstruktions- und Antriebstechnik KAT

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Beschreibung	Nicht fertigungsgerecht	Fertigungsgerecht	Gültig
Sollen 0°-orientierte Bohrungen ohne solide Stützstrukturen im Inneren gefertigt werden, so muss der Innenradius ausreichend klein sein. LM: $r_i \leq 4{,}5$ mm FDM: $r_i \leq 5{,}0$ mm			LM FDM

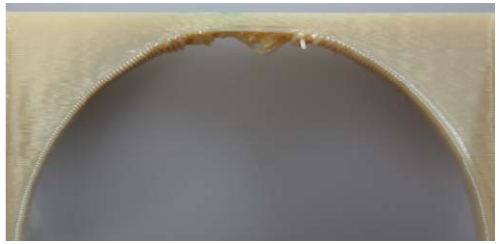
Laserschmelzen:

- Eigenspannungen an den Innenseiten der Elemente erfordern solide Stützstrukturen.
- Kleine Radien reduzieren Eigenspannungen.

Fused Deposition Modeling:

- Unterbauung der Stränge mit soliden Stützen bei großen Innenradien notwendig
- Steifigkeit der Stränge ausreichend bei kleinen Radien

Prüfkörper LM: Abgebrochen aufgrund von Eigenspannungen



Prüfkörper FDM: Oberflächenfehler aufgrund mangelnder Steifigkeit der Stränge

[DMRC-KAt Adam]

Restriktionen: Konstruktionsrichtlinien
Katalog

Konstruktions- und Antriebstechnik KAT

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Inhalt

- 11 geometrische Elemente
  - Basiselemente
  - Elementübergänge
  - Aggregierte Strukturen
- 55 Konstruktionsregeln

Format

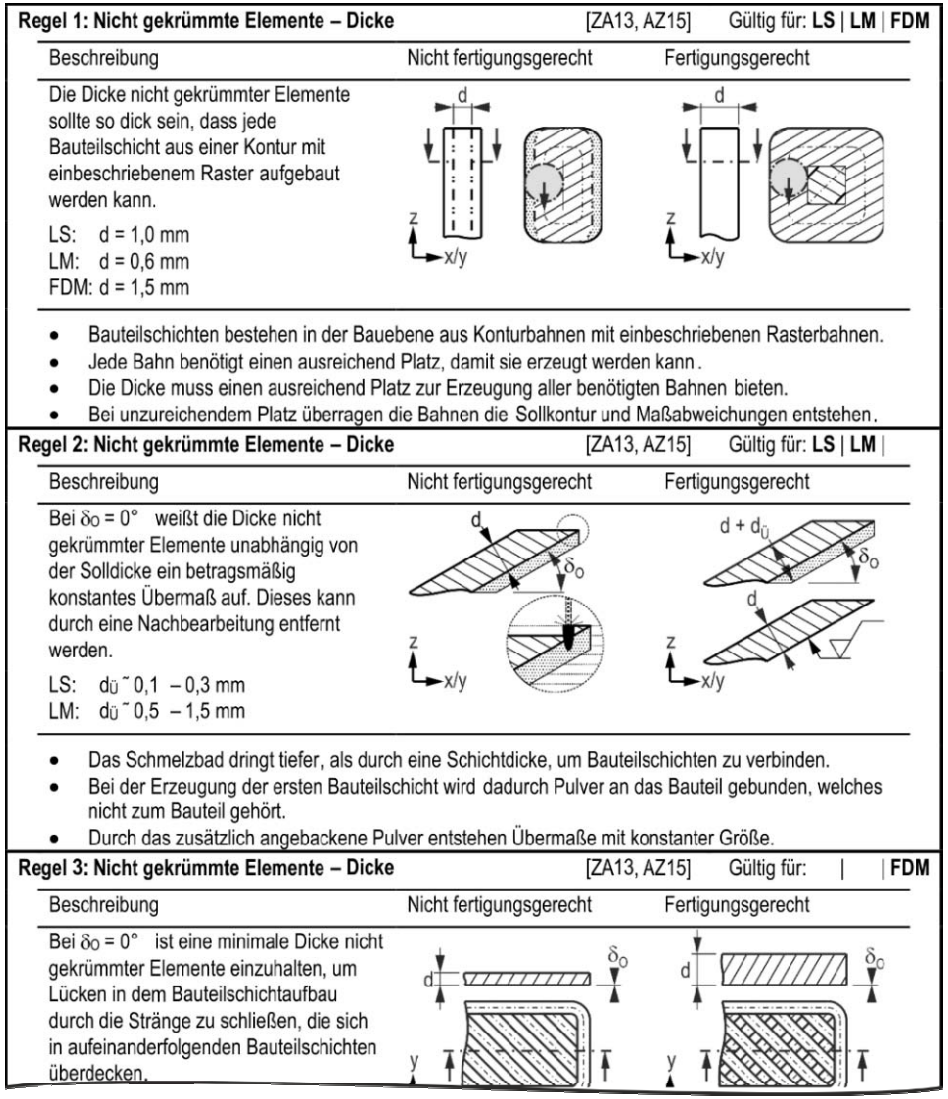
- Navigations- und Verfahrensindex
- Allgemeine und spezifische Beschreibung
- Gestaltungsbeispiele
- Verfahrenstechnische Erläuterungen

Verfahren

- Lasersintern
- Laserschmelzen
- Fused Deposition Modeling

Dissertation von ADAM

- *„Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für additive Fertigungsverfahren“ Shaker Verlag 2015*



Regel 1: Nicht gekrümmte Elemente – Dicke [ZA13, AZ15] Gültig für: **LS** | **LM** | **FDM**

Beschreibung	Nicht fertigungsgerecht	Fertigungsgerecht
Die Dicke nicht gekrümmter Elemente sollte so dick sein, dass jede Bauteilschicht aus einer Kontur mit einbeschriebenem Raster aufgebaut werden kann. LS: d = 1,0 mm LM: d = 0,6 mm FDM: d = 1,5 mm	d, z, x/y	d, z, x/y

- Bauteilschichten bestehen in der Bauebene aus Konturbahnen mit einbeschriebenen Rasterbahnen.
- Jede Bahn benötigt einen ausreichend Platz, damit sie erzeugt werden kann.
- Die Dicke muss einen ausreichend Platz zur Erzeugung aller benötigten Bahnen bieten.
- Bei unzureichendem Platz überragen die Bahnen die Sollkontur und Maßabweichungen entstehen.

Regel 2: Nicht gekrümmte Elemente – Dicke [ZA13, AZ15] Gültig für: **LS** | **LM** |

Beschreibung	Nicht fertigungsgerecht	Fertigungsgerecht
Bei $\delta_O = 0°$ weißt die Dicke nicht gekrümmter Elemente unabhängig von der Solldicke ein betragsmäßig konstantes Übermaß auf. Dieses kann durch eine Nachbearbeitung entfernt werden. LS: $d_Ü$ ~ 0,1 – 0,3 mm LM: $d_Ü$ ~ 0,5 – 1,5 mm	d, δ_O, z, x/y	d + $d_Ü$, δ_O, d, z, x/y

- Das Schmelzbad dringt tiefer, als durch eine Schichtdicke, um Bauteilschichten zu verbinden.
- Bei der Erzeugung der ersten Bauteilschicht wird dadurch Pulver an das Bauteil gebunden, welches nicht zum Bauteil gehört.
- Durch das zusätzlich angebackene Pulver entstehen Übermaße mit konstanter Größe.

Regel 3: Nicht gekrümmte Elemente – Dicke [ZA13, AZ15] Gültig für: | | **FDM**

Beschreibung	Nicht fertigungsgerecht	Fertigungsgerecht
Bei $\delta_O = 0°$ ist eine minimale Dicke nicht gekrümmter Elemente einzuhalten, um Lücken in dem Bauteilschichtaufbau durch die Stränge zu schließen, die sich in aufeinanderfolgenden Bauteilschichten überdecken.	d, δ_O, y	d, δ_O, y

[DMRC-KAt Adam]

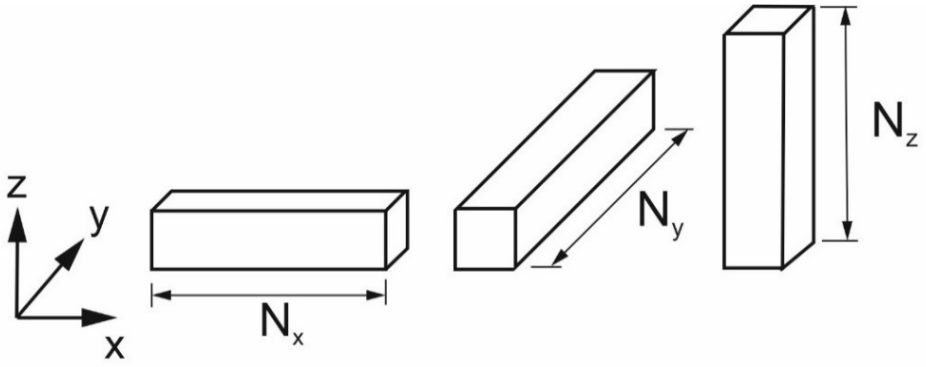
Restriktionen: Toleranzen
Versuchsplanung

Konstruktions- und Antriebstechnik KAt

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Variierte Einflussfaktoren

- Nennmaß (N): 3,0 mm … 500,0 mm
- Ausrichtung: x, y und z



Werkstattübliche Herstellung mit

- Lasersintern (LS)
- Laserschmelzen (LM)
- Fused Deposition Modeling (FDM)

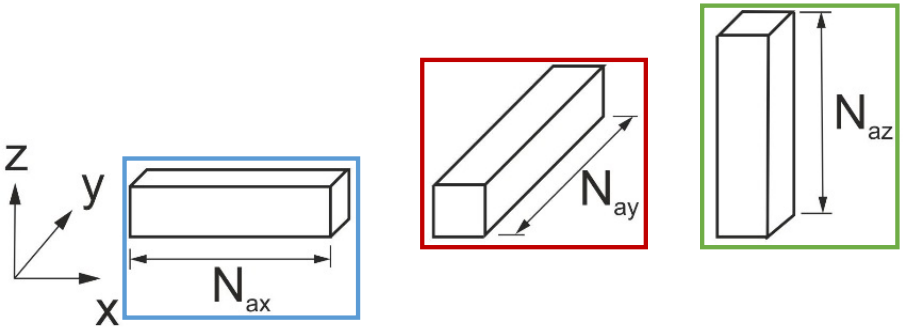
Parameter	LS	LM	FDM
Maschine	P395	SLM250^{HL}	F-400mc
Material	PA2200	316L	Ultem
Schichtdicke	0,120 mm	0,030 mm	0,250 mm
Schrumpffaktor			
x-Richtung [%]	3,2	0,113	0,71
y-Richtung [%]	3,2	0,113	0,71
z-Richtung [%]	2,2 – 1,6	0,000	0,70

Messung

- Messmittel Bügelmessschraube
- Abweichungsermittlung
  Abweichung (e) = Istmaß (I) – Nennmaß (N)

[DMRC-KAt Lieneke]

Restriktionen: Toleranzen
Fused Deposition Modeling



x-Ausrichtung:

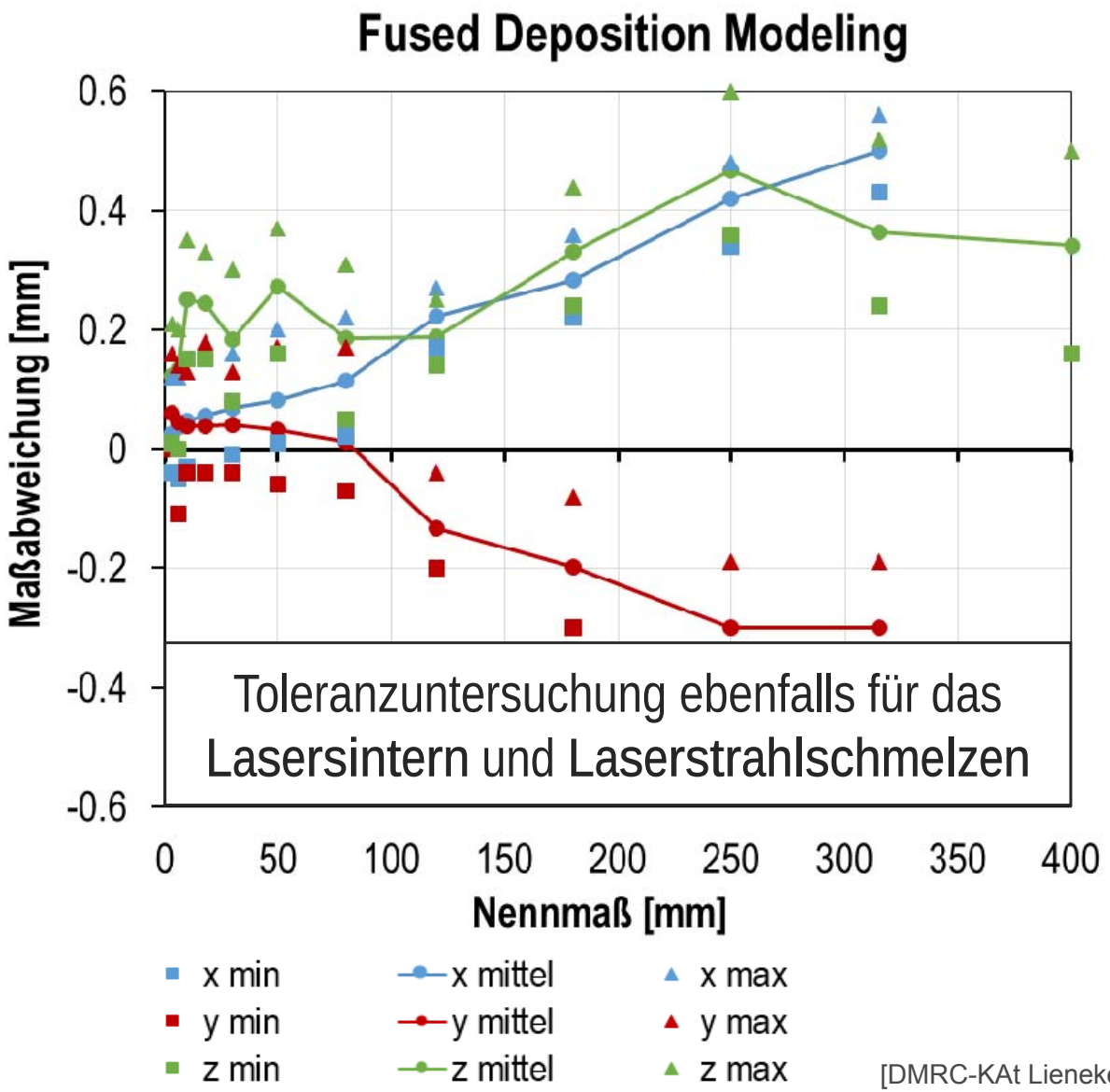
- Positiv ansteigende Abweichungen
- Toleranzbereiche: 0,10 - 0,20 mm

y-Ausrichtung:

- Negativ ansteigende Abweichungen
- Toleranzbereiche: 0,16 - 0,25 mm

z-Ausrichtung:

- Positiv ansteigende Abweichungen
- Toleranzbereiche: 0,11 - 0,34 mm



Toleranzuntersuchung ebenfalls für das Lasersintern und Laserstrahlschmelzen

[DMRC-KAt Lieneke]

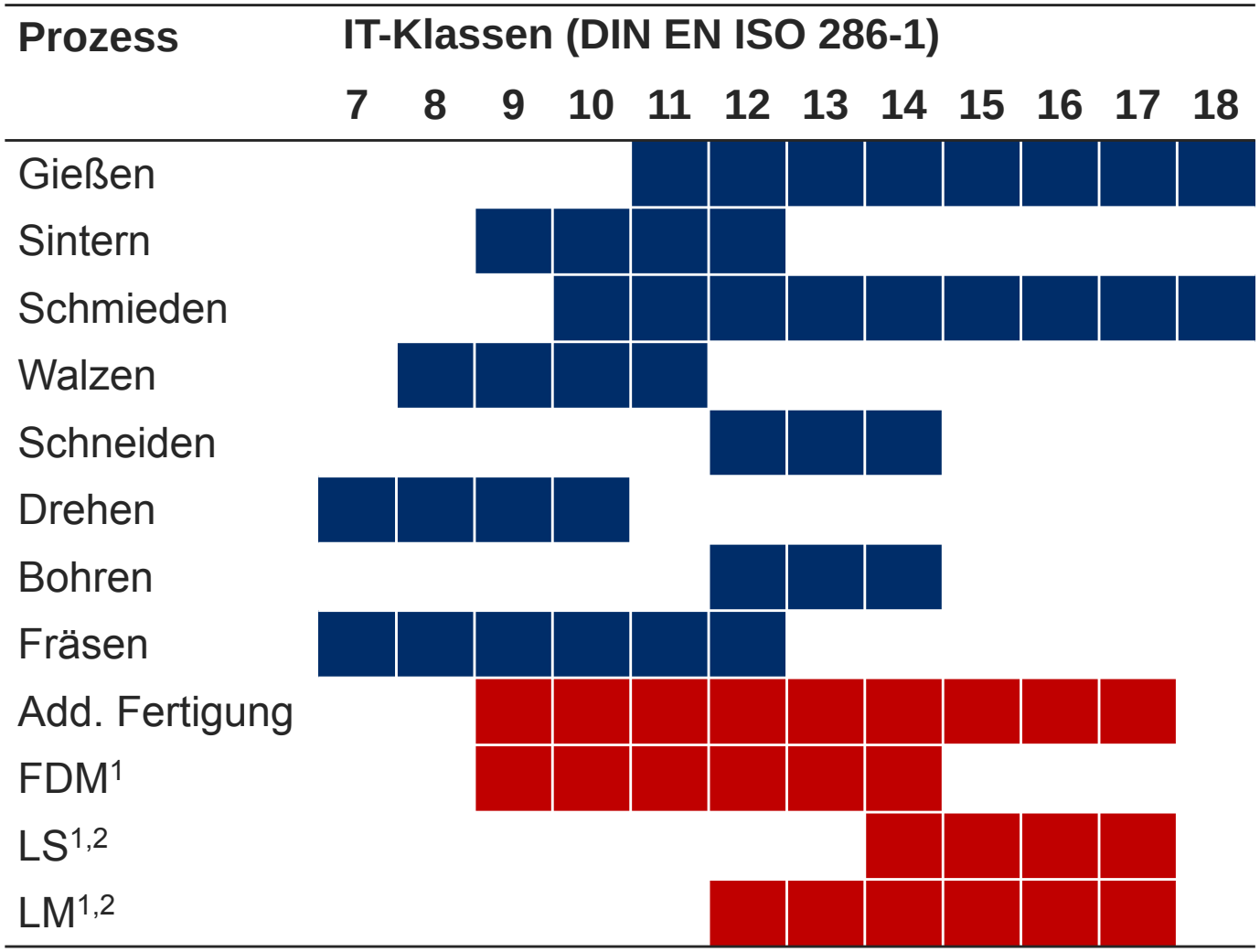
Restriktionen: Toleranzen
Erzielbare ISO Toleranzklassen

Konstruktions- und Antriebstechnik KAt

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Vergleich mit konventionellen Fertigungsverfahren nach DIN EN ISO 286-1

- Additive Fertigung erzielen IT-Klassen zwischen IT9 und IT17
- Hinsichtlich der Maßgenauigkeit vergleichbar mit:
  - Gießen
  - Sintern
  - Schmieden
  - Schneiden
  - Bohren
- Prozessparameter zeigen enormes Optimierungspotential



[1] ohne statistische Auswertung [2] bis zur Nennlänge 80 mm

[DMRC-KAt Lieneke]

Zusammenfassung

- Faszinierende Möglichkeiten (Leichtbau, komplexe Strukturen, Funktionsintegration)
- Entwicklung und Einsatz neuer Softwarewerkzeuge erforderlich
- Restriktionen beachten (Konstruktionsregeln, Toleranzen)
- Konstruktionsregeln zunehmend verfügbar (VDI FA105.3 Konstruktionsempfehlungen)

Ausblick

- Weitergehende Nutzung der Funktionsintegration (Kühlung, Schmierung, magnetischer Fluss): Modellbildung und experimentelle Untersuchungen
- Erweiterung der Konstruktionsregeln (Nachbearbeitung, Oberflächenbehandlung)
- Experimentelle Untersuchungen zu Form- und Lageabweichungen (BMBF-Projekt “KitkAdd”)
- Implementierung von Konstruktionsregeln in CAx-Werkzeuge (BMBF-Projekt “OptiAMix”)
- Berechnungsmethoden: Berücksichtigung lokal unterschiedlicher und richtungsabhängiger Materialkennwerte bei der (FEM-) Berechnung

Bundesministerium für Bildung und Forschung

PTKA
Projektträger Karlsruhe
im Karlsruher Institut für Technologie

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer
Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik (KAt)
Direct Manufacturing Research Center (DMRC)
Fakultät für Maschinenbau
Universität Paderborn

Maschinen DMRC

LBM: SLM: 250 HL, 280 HL
LS: EOS P395, P396
FDM: Stratasys Fortus 400 MC
Eigenbau zur Materialqualifizierung
Aarburg Freeformer

Optiamix:

PE, cik, LiA, EDAG (Entwicklungspartner Automotive), Intes (Software), Kemper (Bäckereimaschinen), Hirschvogel (Antriebskomponenten Kfz), Krause Dimatec (Konsortialführer

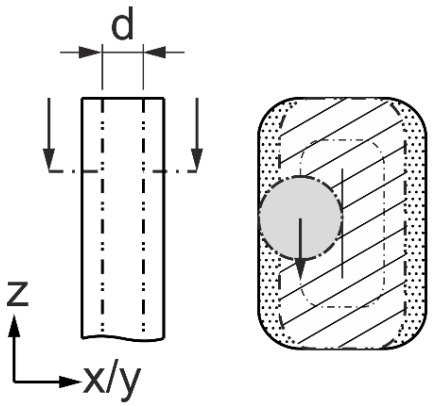
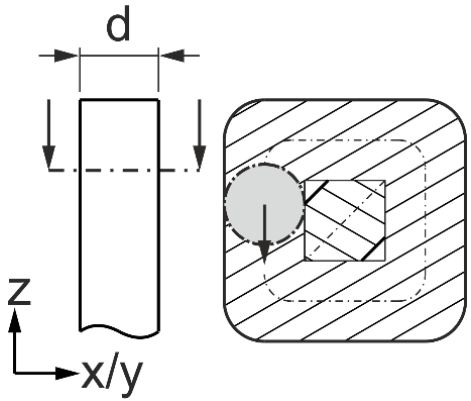
KitKadd:

wbk (KIT), KAt, GKN (Hybridzahnrad), H&H (Dienstleistung, Produktion), Siemens (Turbinenschaufel), John Deere (Wärmetauscher), Eisenhut (Zahnrad, Spritzgusswerkzeug), Schübel (Feinguss)

Restriktionen: Konstruktionsrichtlinien
Wanddicke

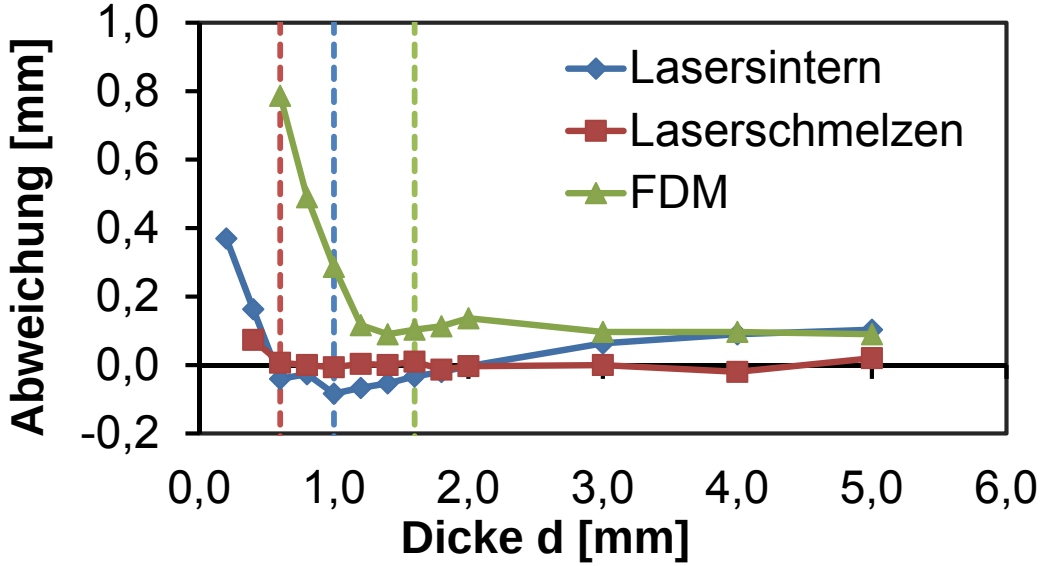
Konstruktions- und Antriebstechnik KAT

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Beschreibung	Nicht fertigungsgerecht	Fertigungsgerecht	Gültig
Die Dicke nicht gekrümmter Elemente sollte so groß sein, dass jede Bauteilschicht aus einer Kontur mit einbeschriebenem Raster aufgebaut werden kann. LS: d ≥ 1,0 mm LM: d ≥ 0,6 mm FDM: d ≥ 1,5 mm			LS LM FDM

- Die Breite von Kontur- und Rasterbahnen resultiert physikalisch aus der Größe des Schmelzbades und der abgelegten Stränge.
- Ein vollständiger Bauteilschichtaufbau (aus Kontur- und Rasterbahnen) benötigen daher ausreichend Platz in x-y-Richtung.
- Kleine Solldicken d bieten zu wenig Platz für einen vollständigen Bauteilschichtaufbau.

➔ Maßabweichungen entstehen



[DMRC-KAt Adam]

Potenziale: Funktionsintegration
Dämpfung

Konstruktions- und Antriebstechnik KAt

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Die Dämpfungsfunktion wird in bestehende Strukturen integriert durch …

… innere Strukturen (mit regelmäßiger und unregelmäßiger Form)

… Füllmedien wie disperses Stützmaterial und/oder Flüssigkeiten

Der Dämpfungsgrad soll an verschiedene Arten von Schwingungen eingestellt werden durch …

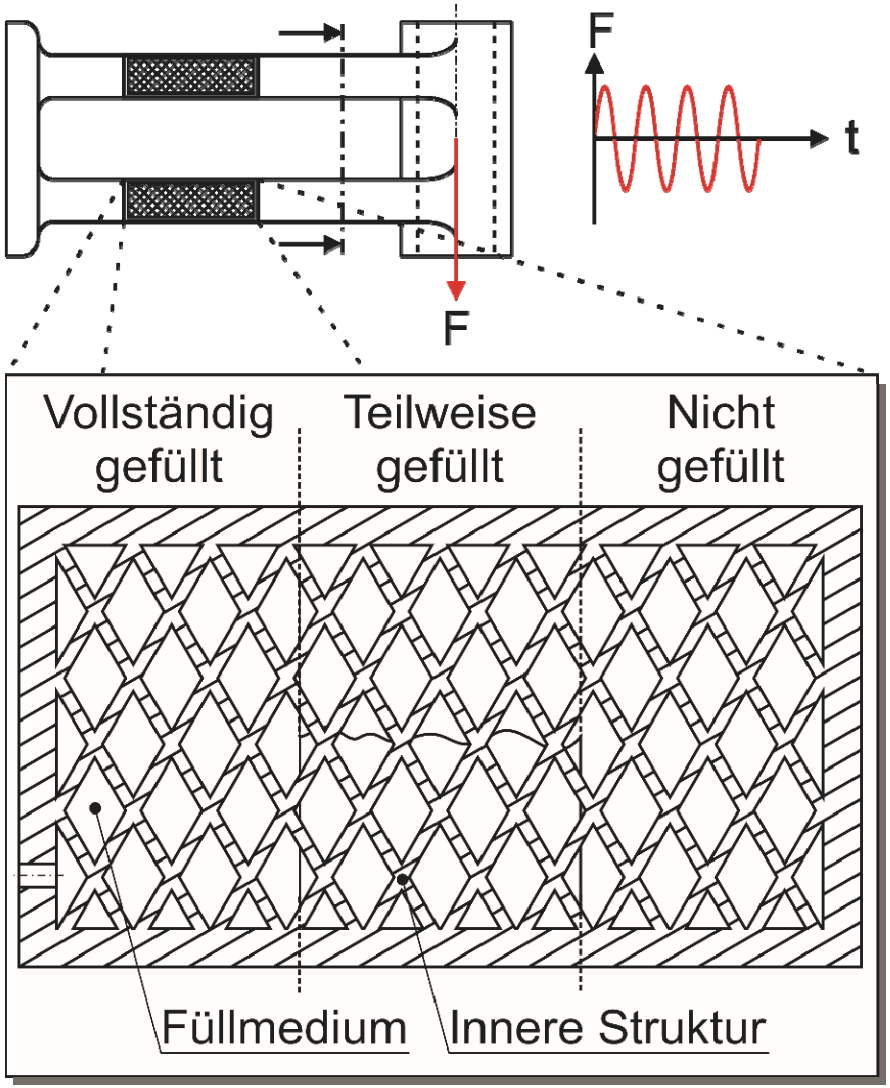
… die Form und Größe der inneren Struktur

… die verwendeten Füllmedien

Vorteile durch integrierte Dämpfungsfunktionen

- Kleinerer Bauraum
- Geringeres Gewicht
- Geringere Kosten

- Patentiert durch Siemens AG (DE 102010063725 A1)



[DMRC-KAt Künneke]

Potenziale: Topologieoptimierung
Anwendung von Softwarewerkzeugen

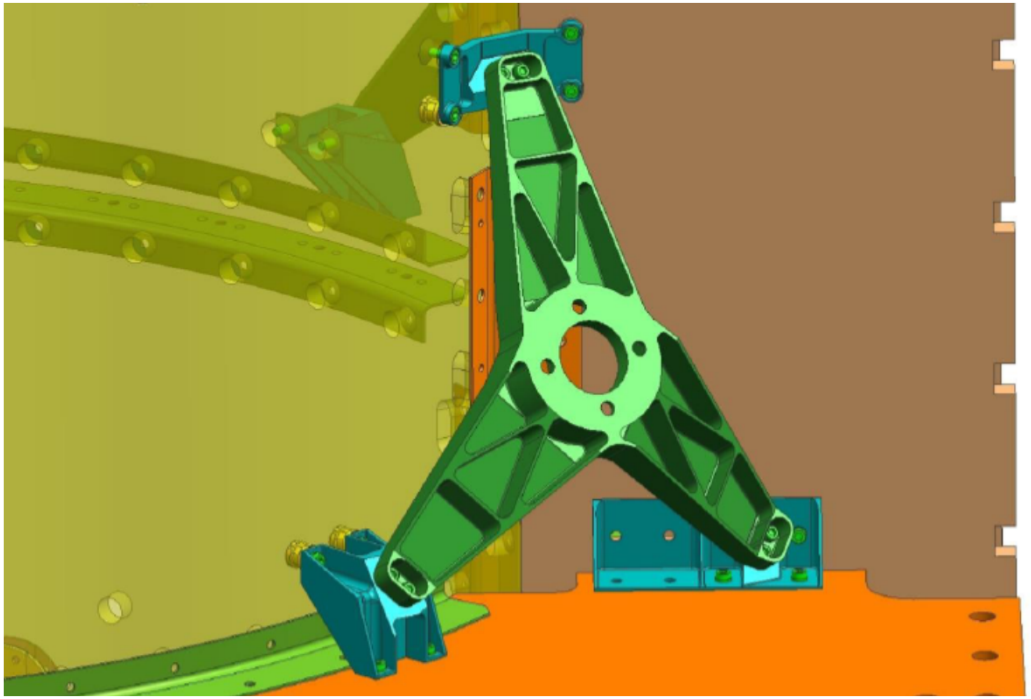
Konstruktions- und Antriebstechnik

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Schritt 1: Klären der Aufgabe

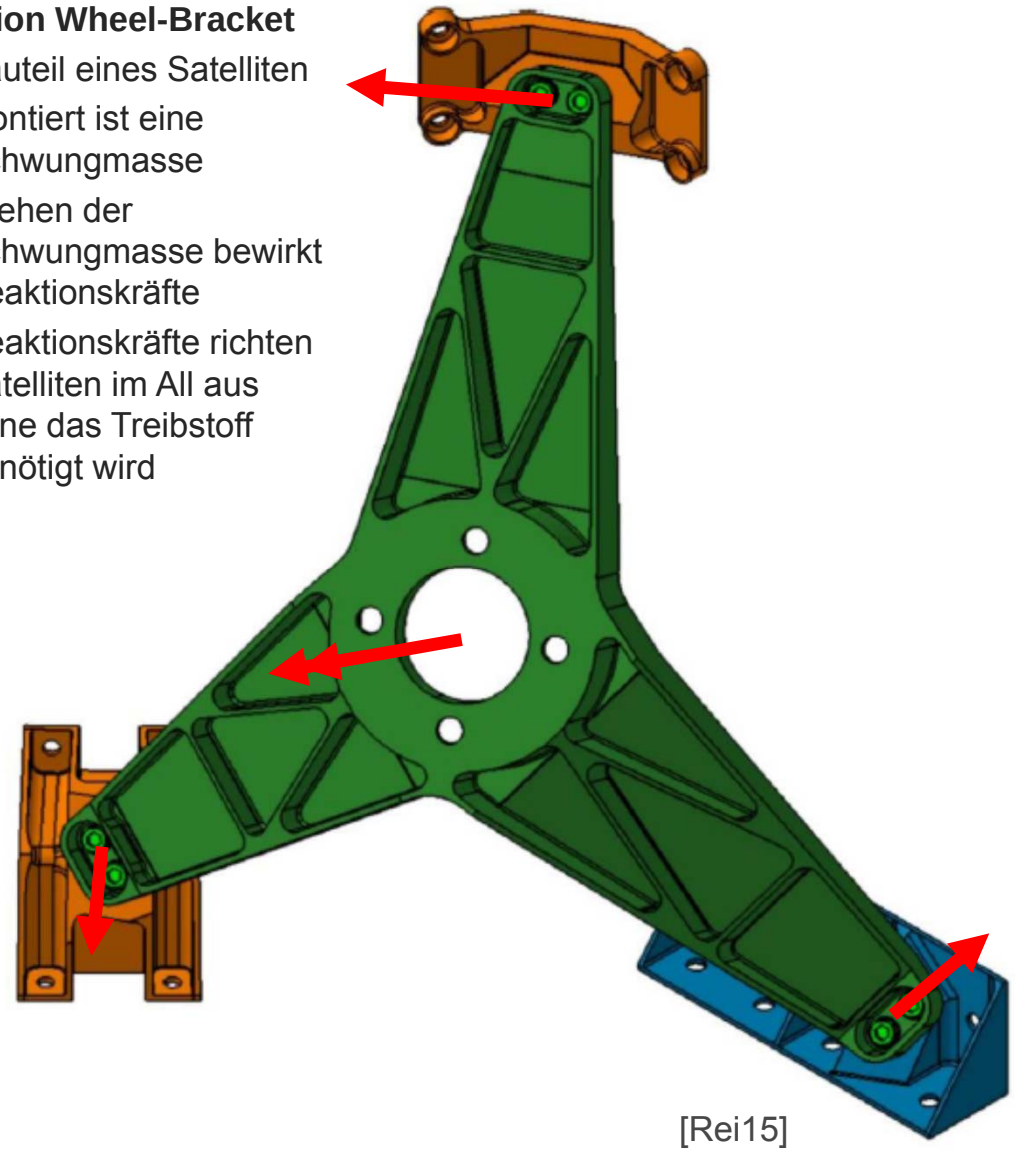
- Welche Kräfte greifen an?
- Maximal zulässiges Gewicht?
- Maximal zulässige Verformung?
- Welche Werkstoffkennwerte?
- …

➔ Übergabe an die CAx-Software



Reaction Wheel-Bracket

- Bauteil eines Satelliten
- Montiert ist eine Schwungmasse
- Drehen der Schwungmasse bewirkt Reaktionskräfte
- Reaktionskräfte richten Satelliten im All aus ohne das Treibstoff benötigt wird

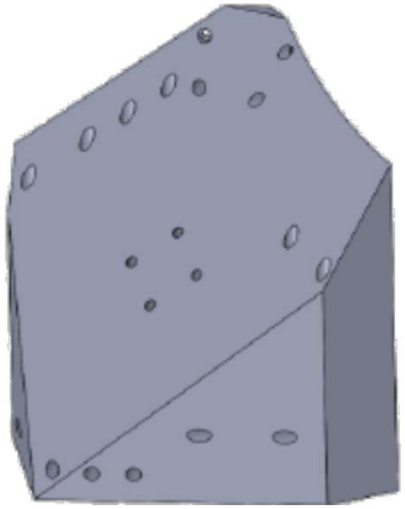


[Rei15]

Schritt 2: Bauraum festlegen

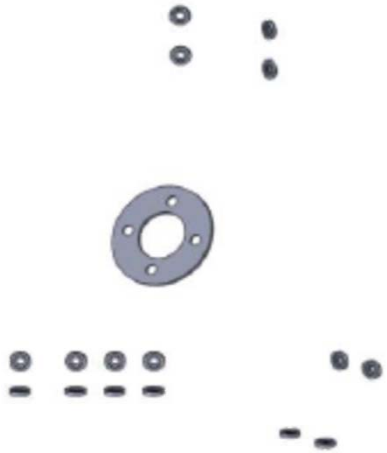
- Umgebungskonstruktion analysieren
- Maximalen Bauraum definieren
- Anbindungspunkte und Schnittstellen analysieren
- Einschränkungen definieren
- Verfügbaren Bauraum ableiten

Maximaler Bauraum



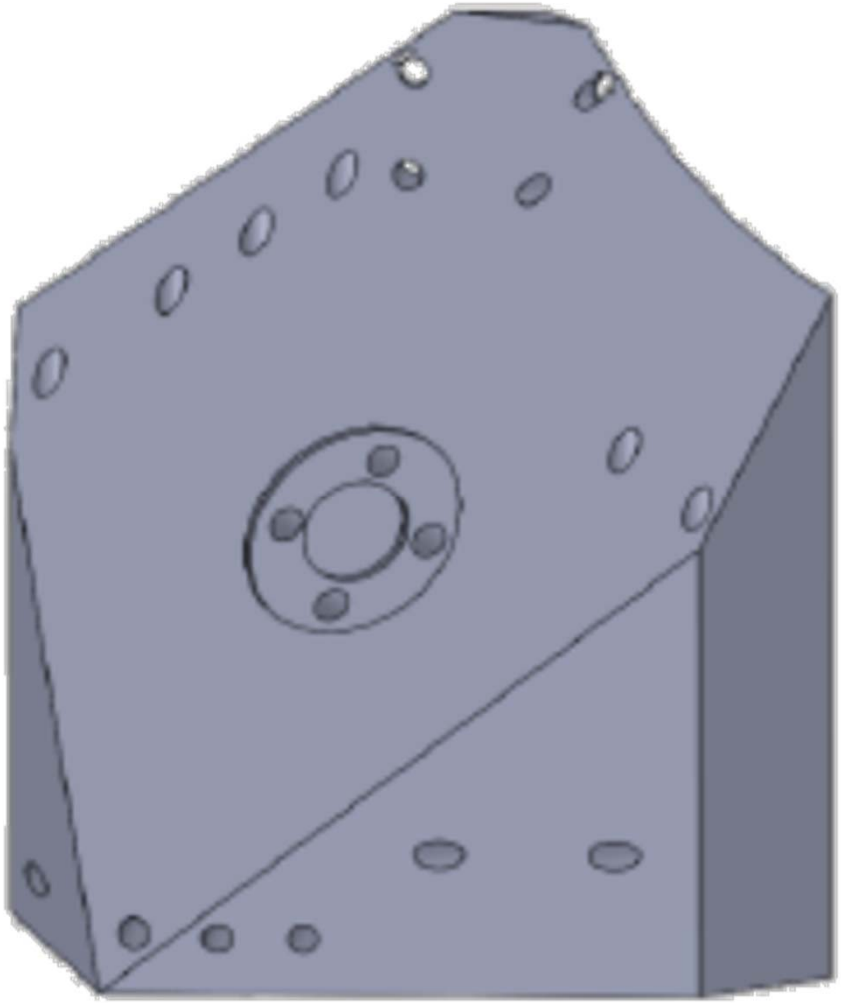
+

Einschränkung



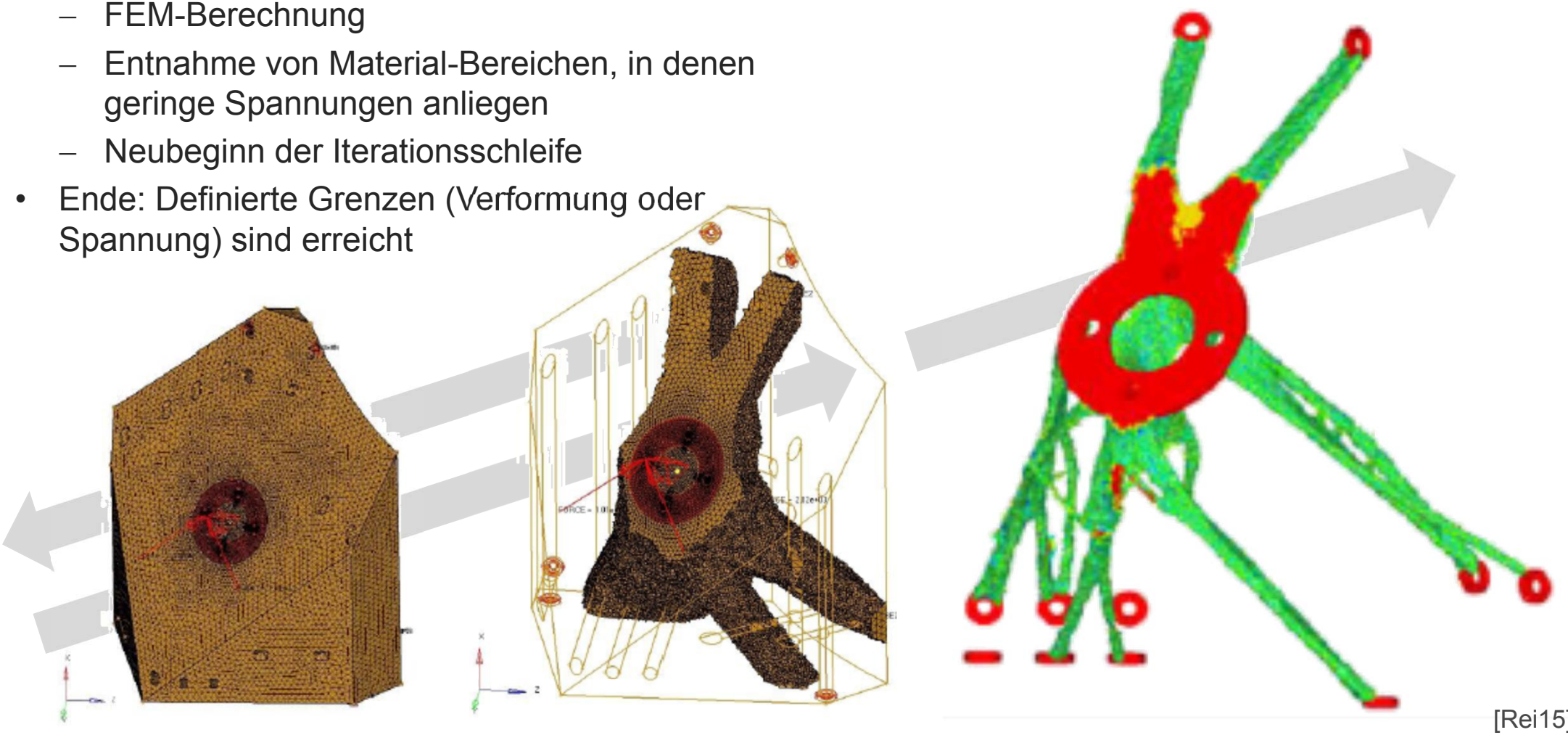
=

Verfügbarer Bauraum



Schritt 3: Geometrie berechnen

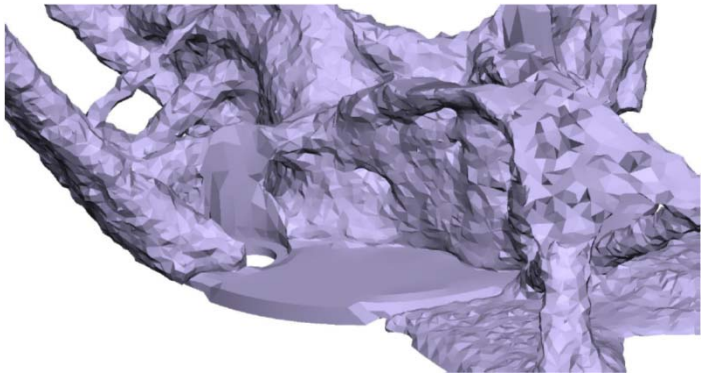
- Iterationsschleife:
  - FEM-Berechnung
  - Entnahme von Material-Bereichen, in denen geringe Spannungen anliegen
  - Neubeginn der Iterationsschleife
- Ende: Definierte Grenzen (Verformung oder Spannung) sind erreicht



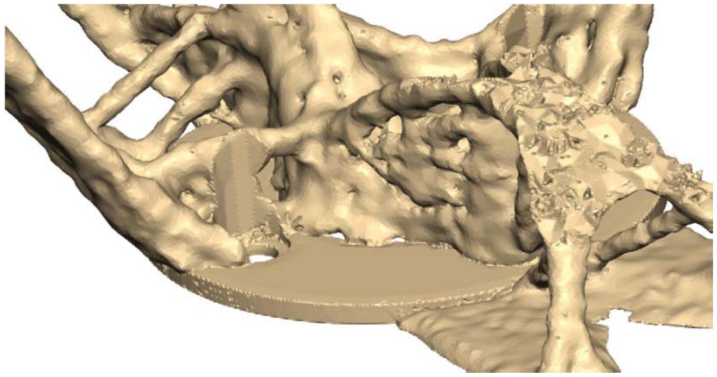
[Rei15]

Schritt 4: Aufbereiten des FEM-Ergebnisses

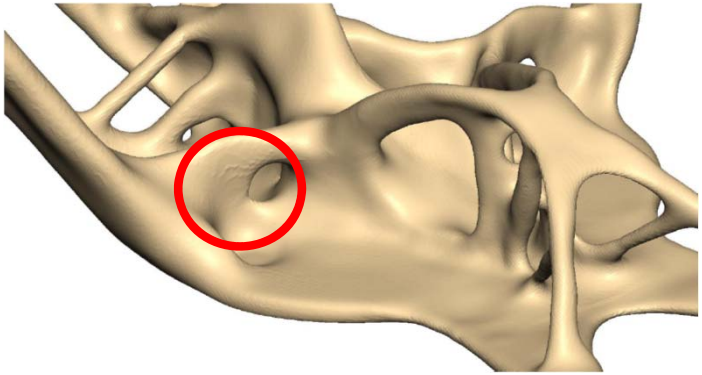
FE-Gitter als Polygon-Modell



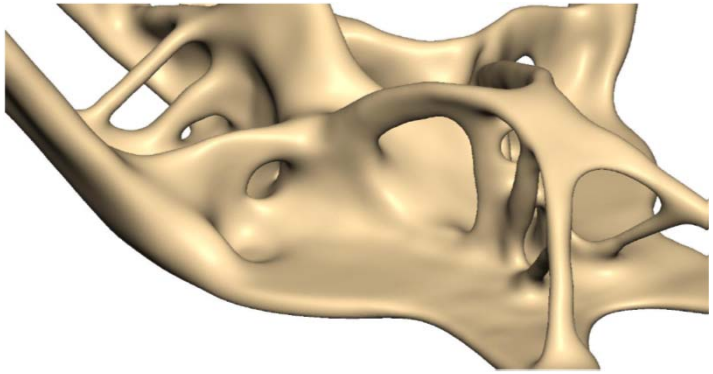
Überführung in Voxel-Modell



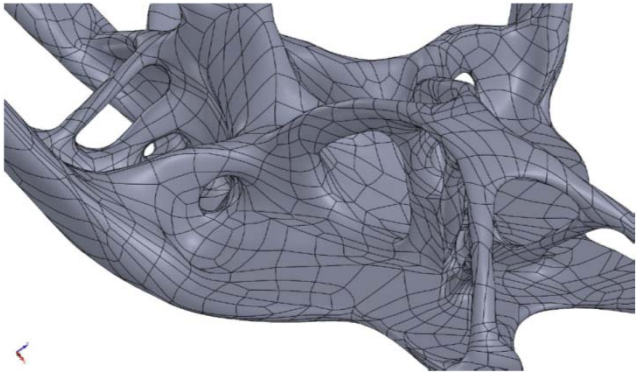
Details löschen und Glätten



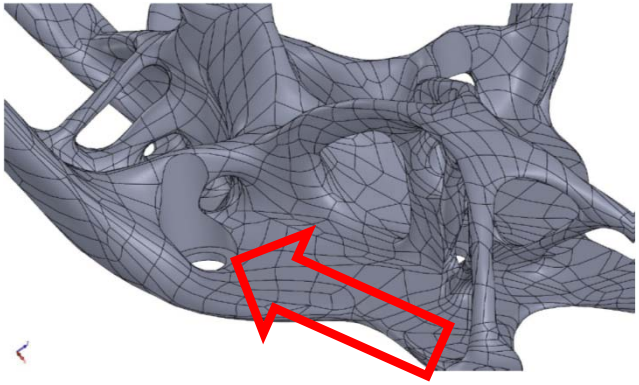
Gitter glätten



Überführung in Nurbs-Modell



Kombination mit CAD-Elementen



[Rei15]

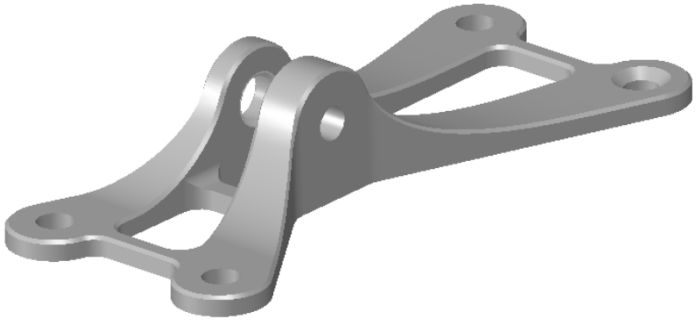
Potenziale: Topologieoptimierung
Beispiel

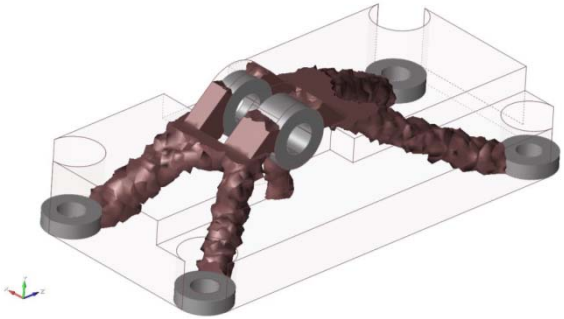
Konstruktions- und Antriebstechnik

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Bracket

- Anschluss für Dämpfer
- Anschluss für Tragstruktur

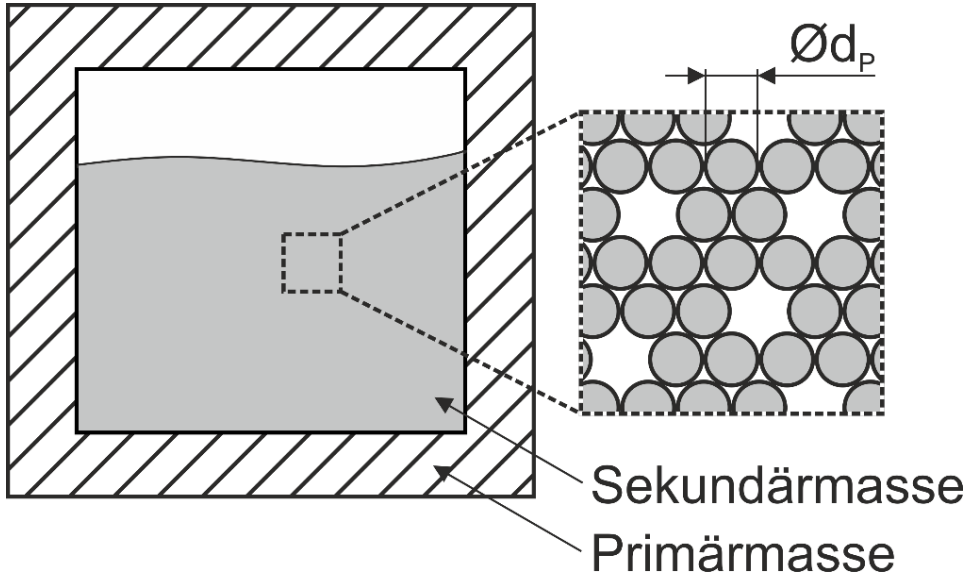


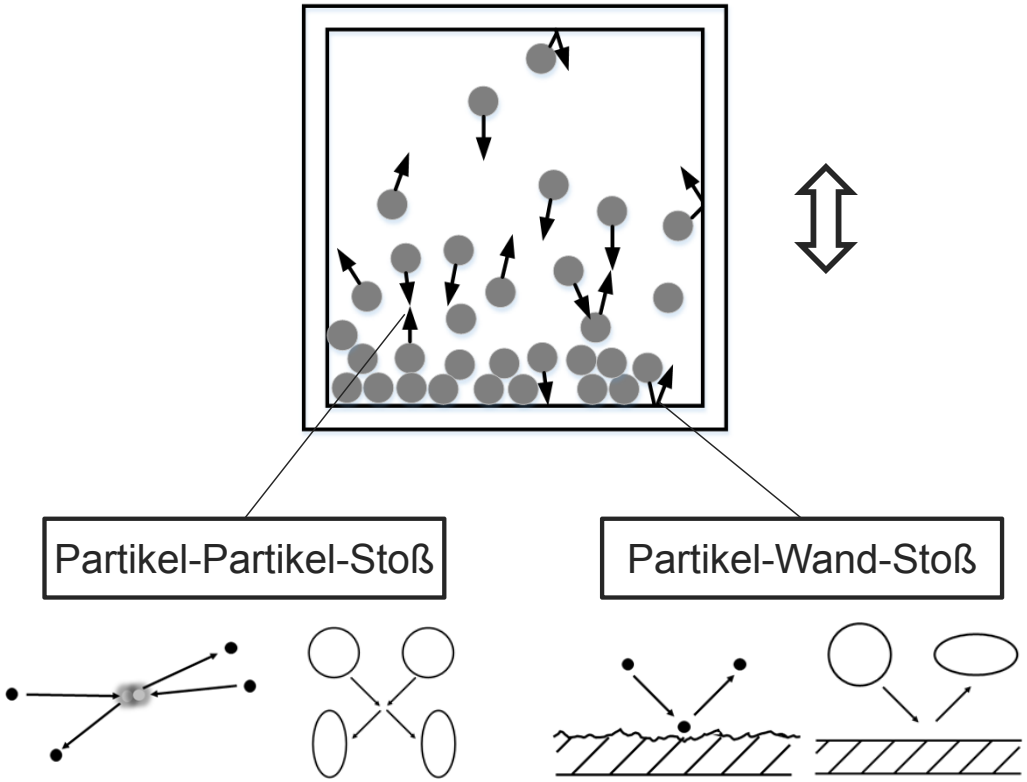


- Gefertigt mit Laserschmelzen
- Nachbearbeitet im Bereich der Schnittstellen

- Bauteilgewicht
  - Frästeil 29,98 g
  - SLM Teil 16,13 g (-46,2 %)
- Fertigungskosten
  - Frästeil 66,11 €
  - SLM Teil 92,19 € (+39,47 %)
- Betriebskosten (10 Jahre):
  - Frästeil 845,59 €
  - SLM Teil 511,57 € (-39,50 %)

Potenziale: Funktionsintegration
Dämpfung





- Hohlräume im Bauteil (Primärmasse) gefüllt mit Pulverpartikeln (Sekundärmasse)
- Dissipation der kinetischen Energie durch:
  - → Reibung Partikel - Partikel
  - → Reibung Partikel - Wand
  - → Stöße Partikel - Partikel
  - → Stöße Partikel -Wand
- Plastische Verformung infolge der Stöße

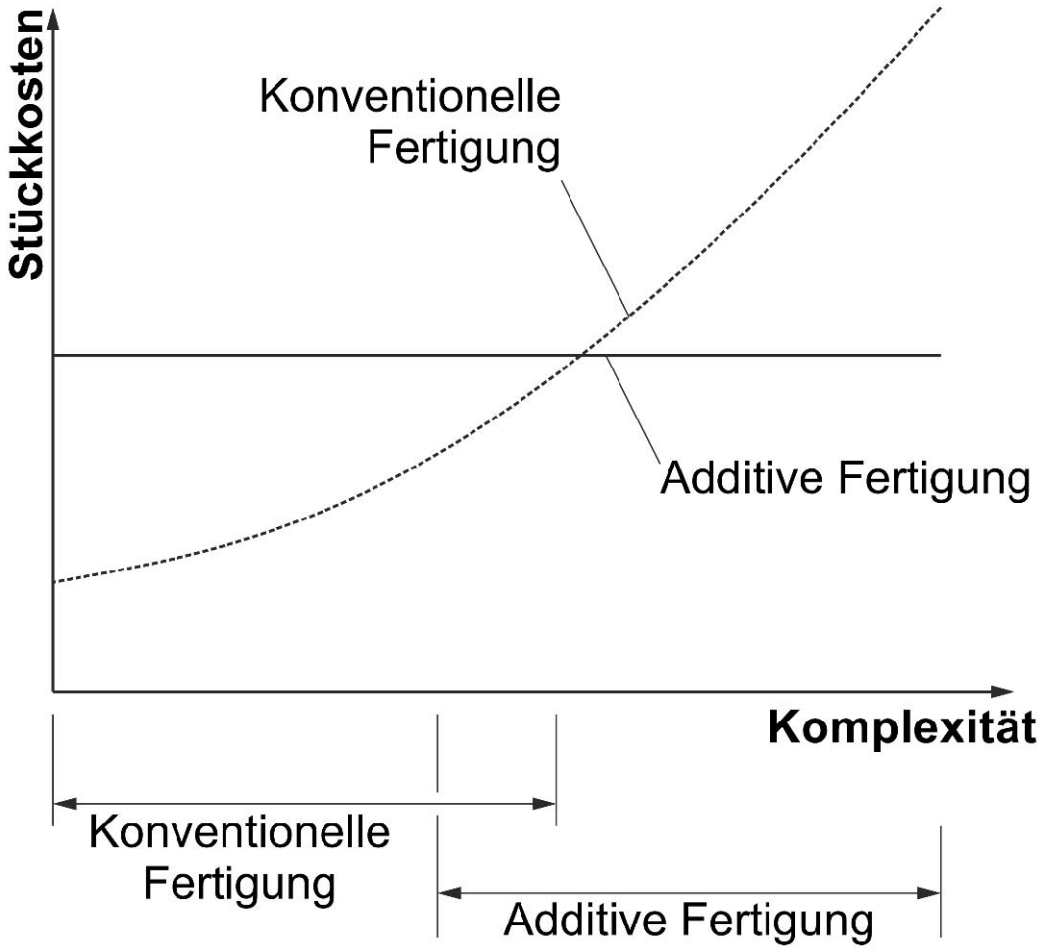
Potenziale: Gestalterische Freiheit
Wirtschaftliche Aspekte

Konstruktions- und Antriebstechnik

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

- Zerlegung dreidimensionaler fertigungstechnischer Herausforderungen in „zweidimensionale“
- Gestalt der Bauteilschichten beeinflusst Fertigungskosten nur gering
- Entkopplung der Stückkosten von der Bauteilkomplexität

➔ **Anwendung additiver Fertigungsverfahren bei komplexen Bauteilen**



[Ada15, Kad10, MHS+12, Zäh06]