

Methode zur Entwicklung von variablen Strukturkonzepten durch Kombination additiver und konventioneller Fertigungsverfahren

M.Sc. Michel Chamoun, Dipl.-Ing Gundolf Kopp, Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich
DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart

Dipl.-Ing Manuel Schuster
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Dipl.-Ing- Oliver Müllerschön
Trumpf Laser- und Systemtechnik GmbH, Ditzingen

Stuttgart, 21.02.2018



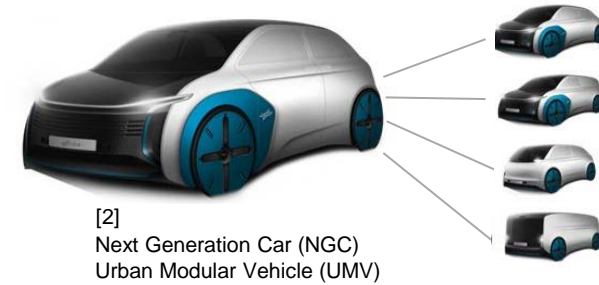
Wissen für Morgen

Additive Manufacturing (AM)

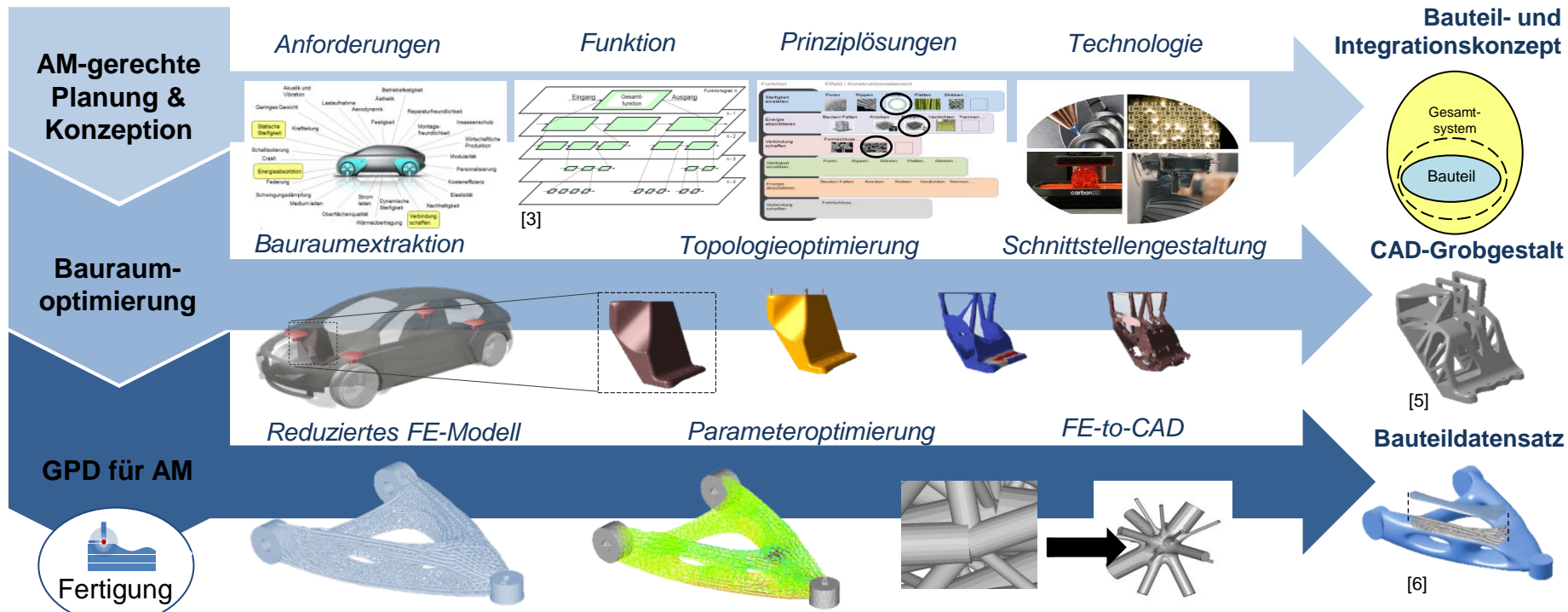
Leichtbauoptimierte und flexible Strukturen für den Fahrzeugbau

Warum Additive Manufacturing?

- ➔ Leichtbau und Funktionsintegration
- ➔ Neue Produktlösungen
- ➔ Individualisierung & Derivatevielfalt
- ➔ Digitale Prozesskette & schnelle Produktentstehung



Konzeptionsmethoden und *Generic Part Design (GPD)* für AM



[1] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping, Tooling, Produktion. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2013

[2] Next Generation Car – Urban Modular Vehicle (NGC-UMV): Urbanes, intelligentes Elektrofahrzeug mit modularer Bauweise

[3] Pahl,Beitz, Funktionsstruktur nach VDI 2221

[4] Vohrer, S.; David, C.; Ruff, M.: Fiber reinforced composite structures in the Next-Generation-Car – Interurban Vehicle (NGC IUV), Carbon Composites Magazin, Ausgabe 4, S. 41, 2016

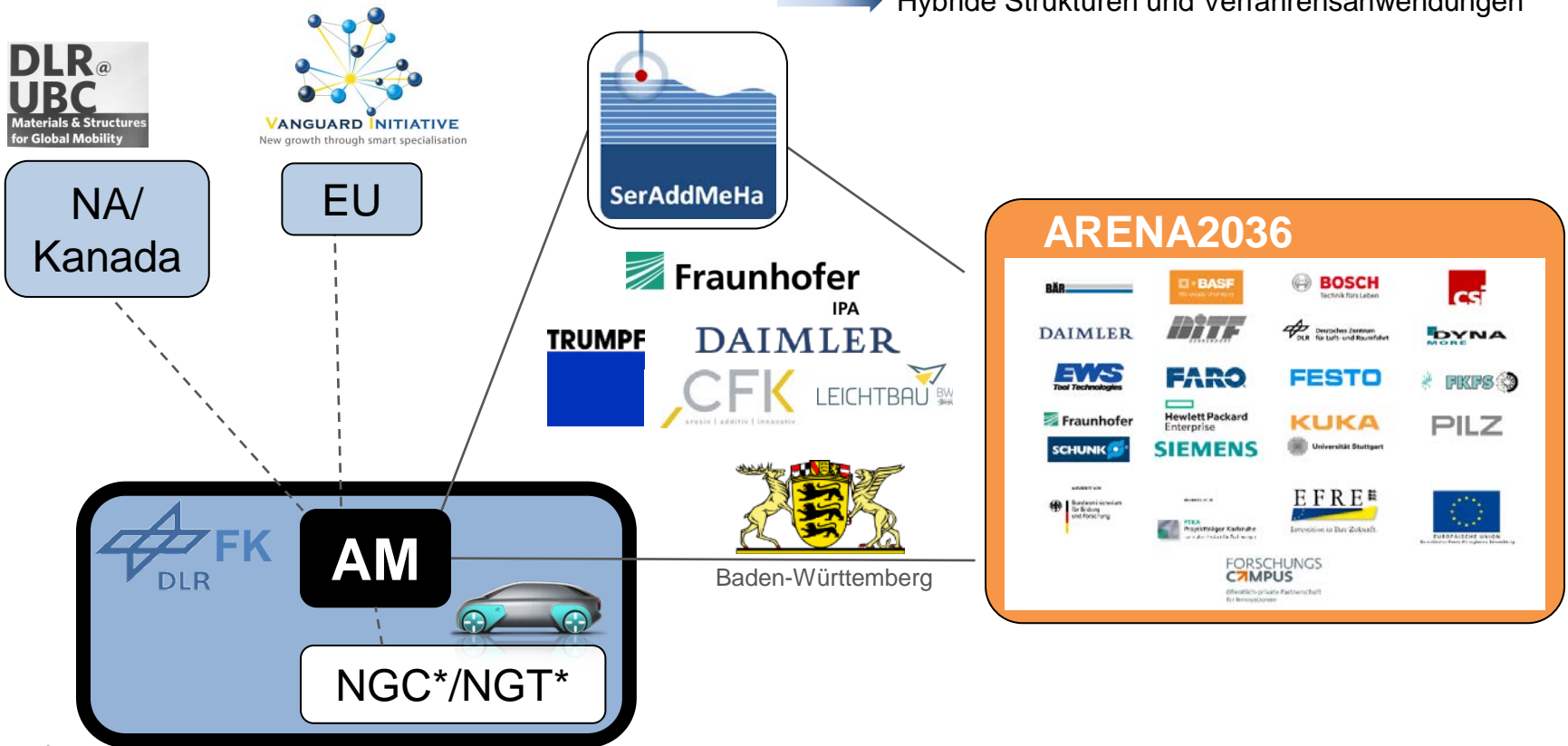
[5] Designstudie Topologieoptimierter Abstützung Federbeindom im Vorderwagenbereich des Next Generation Car – Interurban Vehicle (NGC-IUV)

[6] Designstudie Parameteroptimierter Querlenker mit inneren zellulären Strukturen nach dem Vorbild des Knochens

Additive Manufacturing (AM)

Vernetzung und Aktivitäten des DLR-FK im AM-Umfeld

- ➡ Generic Part Design und integrierte Entwicklung
- ➡ Disruptive Strukturkonzepte
- ➡ Flexible Prozesse und variable Architekturen
- ➡ Hybride Strukturen und Verfahrensanwendungen



*NGC
*NGT

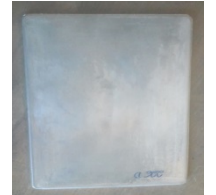
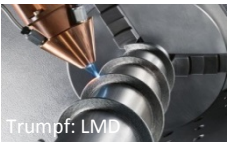
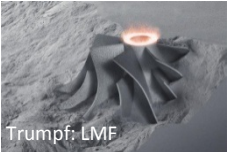
Next Generation Car
Next Generation Train



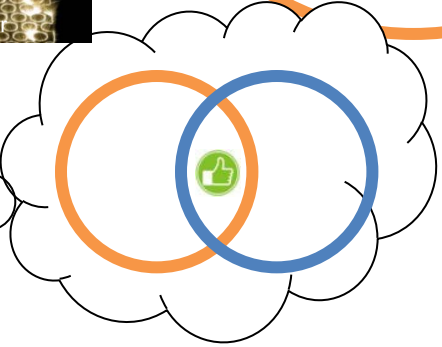
Additive Manufacturing (AM)

Aktueller Stand und Potenziale von AM

Additive Manufacturing



Konventionelle Fertigung



→ Hohe Flexibilität und Wirtschaftlichkeit?
→ Individualisierung und Verkürzung der Fertigungszeit?

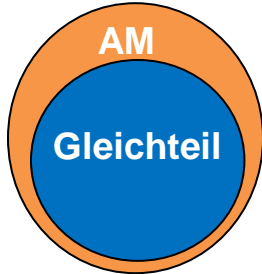
Lösungsansatz:
Hybride Struktur- und Verfahrensanwendungen



Hybride Strukturkonzepte und Fertigungsstrategien

Landesprojekt: „SerAddMeHa“

Variable Bauteildomäne

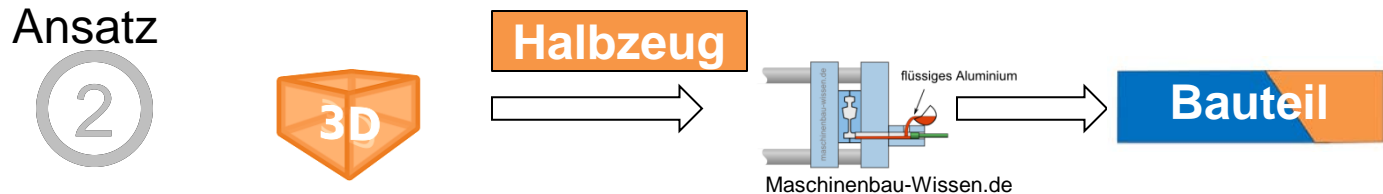
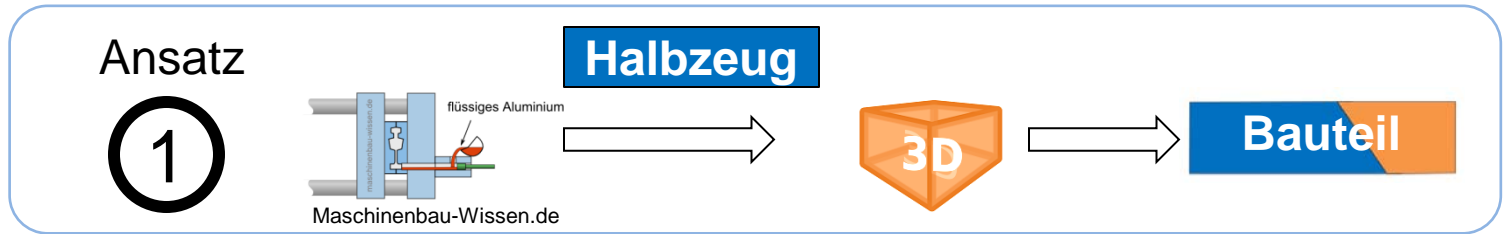


Fixe Bauteildomäne

Forschungsziel:

Entwicklungsmethoden für variable Strukturanwendungen auf Basis **additiver und konventioneller** Fertigungsverfahren

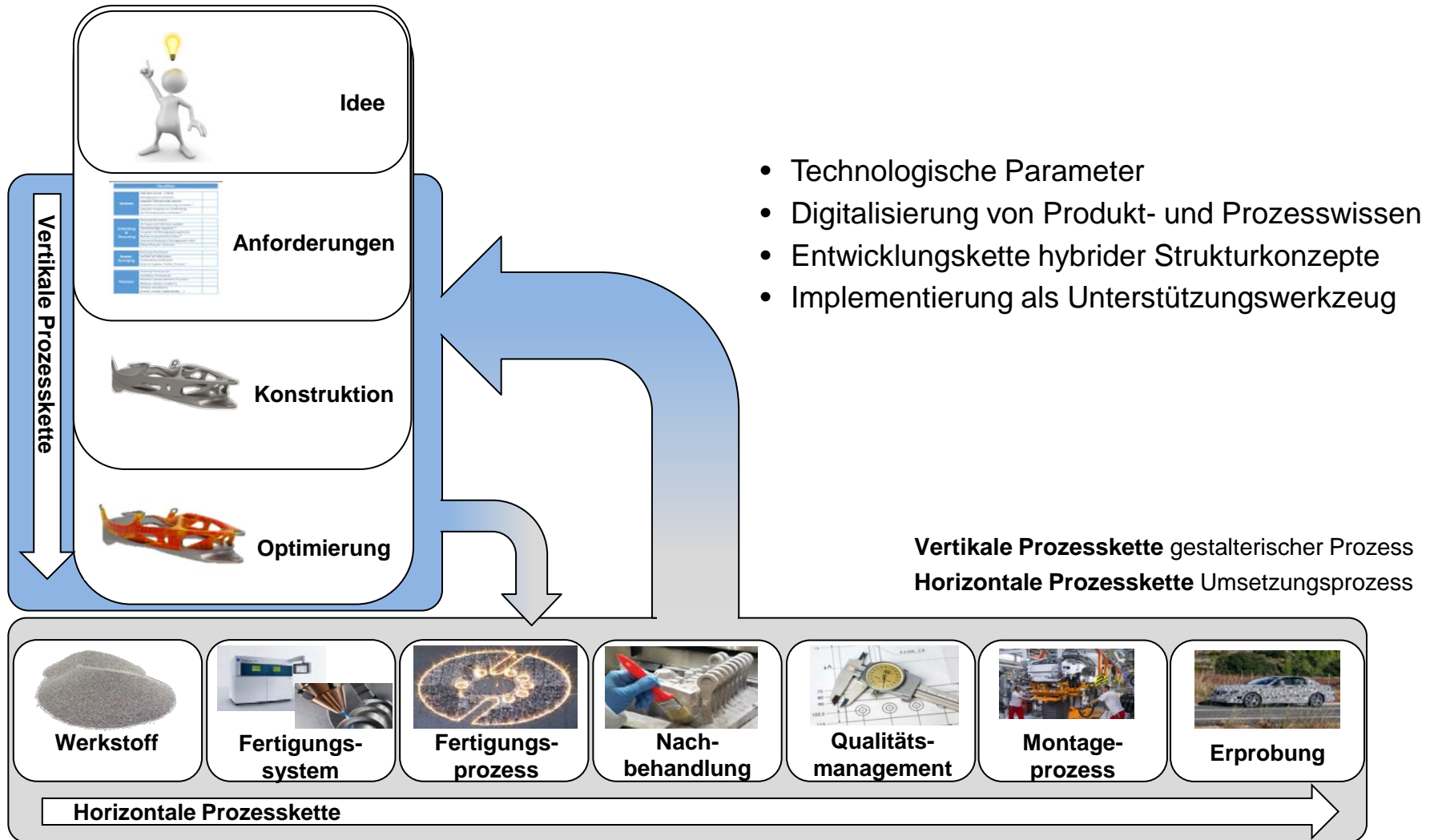
- Methodische Verfahrensauswahl
- Hybride Bauteil- und Prozesskonzepte
- Entwicklungsprozesskette



„SerAddMeHa“ - Serienfähigkeit additiver Drucktechnologien durch metallische Halbzeuge
 Gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg
 Partner: FhG.-IPA, DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Daimler, Trumpf (Beauftragung von C.F.K.), LeichtbauBW
 Assoziiert mit dem Forschungscampus ARENA2036

Hybride Strukturkonzepte und Fertigungsstrategien

Herausforderungen



Hybride Strukturkonzepte und Fertigungsstrategien

Methodisches Vorgehen

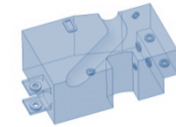
1 Planen und Klären der Aufgabe zur Erstellung eines hybriden Bauteilkonzeptes

Informationen

Ziele

Anforderungen

1



2 Entwicklung hybrider Bauteil- und Fertigungskonzeptvarianten

Produktanforderungen und
-randbedingungen

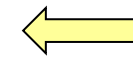
Fertigungstechnische
Randbedingungen

Konzeptvariante

Konventionell

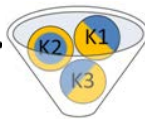
additiv

2



3 Bewertung und Auswahl geeigneter Konzeptvarianten

3



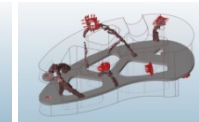
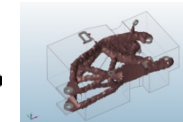
4 Entwurf der ausgewählten Bauteil- und Fertigungskonzepte

4

3D-Konstruktion

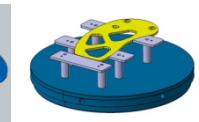
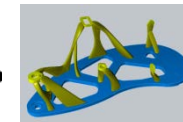
Konstruktionsrichtlinien

Strukturoptimierung
(FE-Analyse)



5 Ausarbeiten des hybriden Bauteil- und Fertigungsentwurfs

5



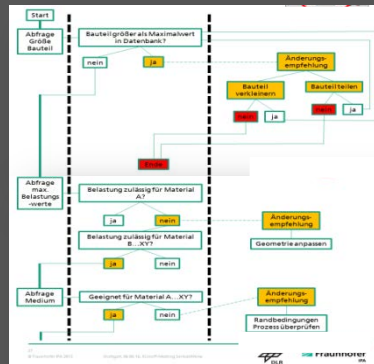
Hybride Strukturkonzepte und Fertigungsstrategien

Aufbau Prozess-Tool

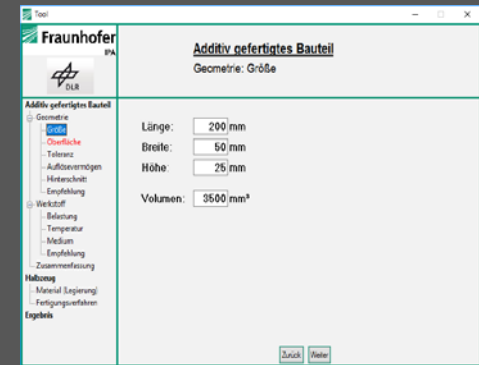
Input: Designvolumen, Anforderungen, Randbedingungen



Datenbank



Logik



GUI

Output: Fertigungsstrategie, Prozessempfehlung & Aufwandsabschätzung



Hybride Strukturkonzepte und Fertigungsstrategien

Aufbau Prozess-Tool

H	Hersteller 1		Hersteller 2	
	LMO			
V	Technologische Parameter			
V	Werkstoffdaten			
V	Expertenwissen			
Größe	von x bis x		von x bis x	
Temperaturbeständigkeit bis	1	2		
Festigkeit	A1	A2	A3	
Empfindlichkeit gegen MEDIUM	V		W	
Volumen Hohlstruktur	von x bis x	von x bis x	von x bis x	von x bis x
Dimension Oberflächenstrukturen	von x bis x	von x bis x	von x bis x	von x bis x

Eingabe Bauteildaten / Rahmenbedingungen
 Abfrage Fertigungsverfahren / Werkstoffe
 Abgleich der Fertigungsverfahren mit Datenbank
 Verfügbare Halbzeuge
 Prüfung von Kombinationsmöglichkeiten
 Ausgabefeld

- Frühzeitige Machbarkeitsprüfung
- Gestaltungsrahmen
- Prozesskonzept
- Aufwandsabschätzung
- Verfahrensempfehlung

Fraunhofer IPA
Version: 1.0.1.94

Konstruktion hybrider Bauteile

Additive Komponente: Auflösungsgenauigkeit

Geforderte Genauigkeit: µm

Halbzeug

Schlussart

Geometrie

Werkstoff

Additive Komponente

Geometrie

Werkstoff

Oberflächengüte

Auflösungsgenauigkeit

Nachbearbeitung

Prozessprotokoll

Ergebnis

SL

EBM

3DP

FDM

ohne Nachbearbeitung möglich

Nachbearbeitung erforderlich Erhöhung der Kosten

Nachbearbeitung kritischer Elemente

Zurück
Weiter

Noch in Betracht kommend: Verfahren: 4/7 Anlagen: 4/12

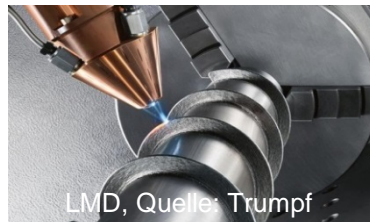


Technologische Parameter Fertigungsverfahren

- Pulverbettverfahren zur schichtweisen Verarbeitung pulverförmiger metallischer Werkstoffe



- Pulverauftragsverfahren zur auftragenden Verarbeitung von metallischen Werkstoffen



Verfahrensprinzip

Schichtgeometrie

Bauplattform/-kammer
[mm]

Auftragsbreite [mm]

Schichtdicke
/Auftragshöhe [µm]

Aufbaurrate [cm³/h]

Genauigkeit [mm]

Oberflächenqualität
[µm]

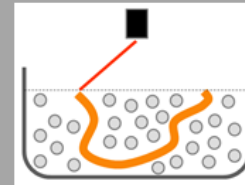
**Multimaterial-
verarbeitung**

Bauteilkomplexität

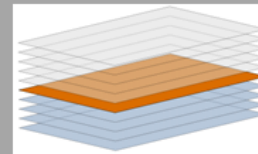
Anwendungen

SLM (Bsp. Truprint3000)

Pulverbett



2D



Ø 300 x 400

Gesamtes Pulverbett

30 - 100

10 - 20

< 0,1

Ra 5-10

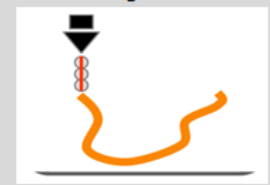
Nein



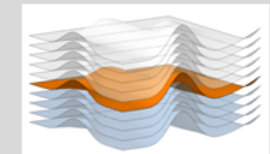
z.B. räumlich komplexe Strukturen, Topologie-optimierungen, kleines bis mittleres Bauvolumen

LMD (Bsp. TruLaserCell7040)

Pulverauftrag/-düse



3D



4000 x 1500 x 2000 (TruLaser Cell 7040)

0,4 – 25

Ca. 1/3 der Auftragsbreite

40-500

< 1 mm

Ra 10-20

Ja, gradierte Pulvermischung im Prozess

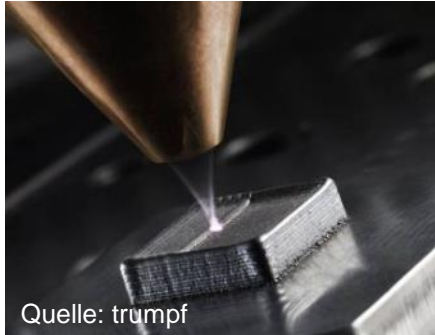


z.B. Verstärkungsrippen, lokale Aufdickungen von flächigen Strukturen, großes Bauvolumen



Technologische Parameter

Werkstoffe



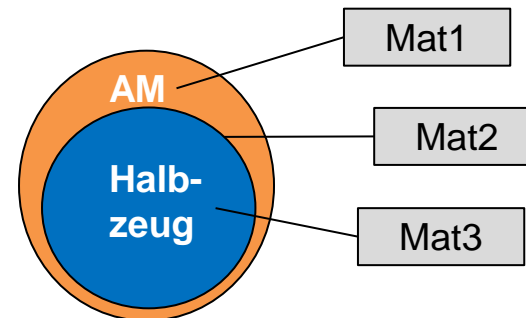
- Werkstoff entsteht während der Bauteilfertigung
- Werkstoff ist verfahrensbedingt anisotrop



- Richtungsabhängige Werkstoffuntersuchung für AM-Anteil
- Untersuchung von Grenzflächeneffekten bei hybrider Anwendung (u.a. durch thermischen Eintrag)
- Ein Werkstoff – 3 Materialmodelle

Einflussgrößen

- Pulverbeschaffenheit (für LMF/LMD)
 - Laserleistung/Temperaturführung
 - Belichtungsgeschwindigkeit
 - Belichtungsmuster
 - Durchmesser Laserfokus
 - Bauraumtemperatur
 - Bauraumtemperatur
 - Schichtdicke
- Nachbehandlung (Metalle)
 - Warmauslagern,
 - Heißisostatisches Pressen (HiP)
 - Spanende Bearbeitung
 - Oberflächenbehandlung



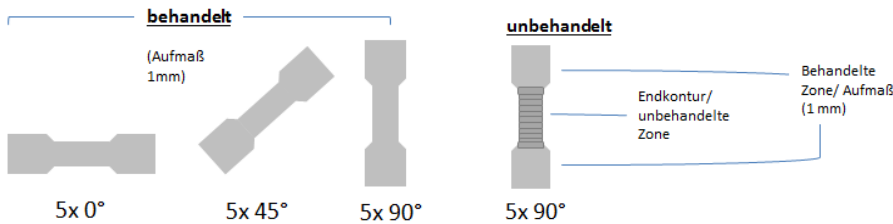
Technologische Parameter Werkstoffe

Zusammenstellung aus künftigen Einsatzszenarien

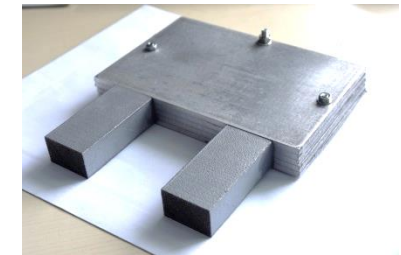
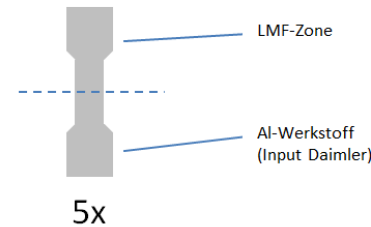
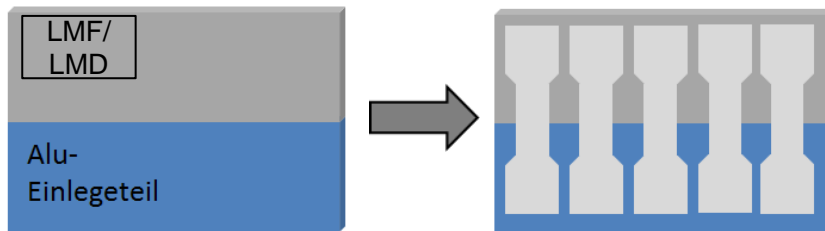
- z.B. Wärmebehandlung relevant/realistisch für Bauteil/Produktionsschritt?
- Z.B. Zugänglichkeit für spanende Nachbehandlung gegeben?

➔ Prüfkonzept

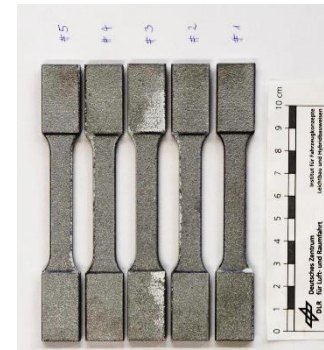
Richtungsabhängigkeit AM-Anteil



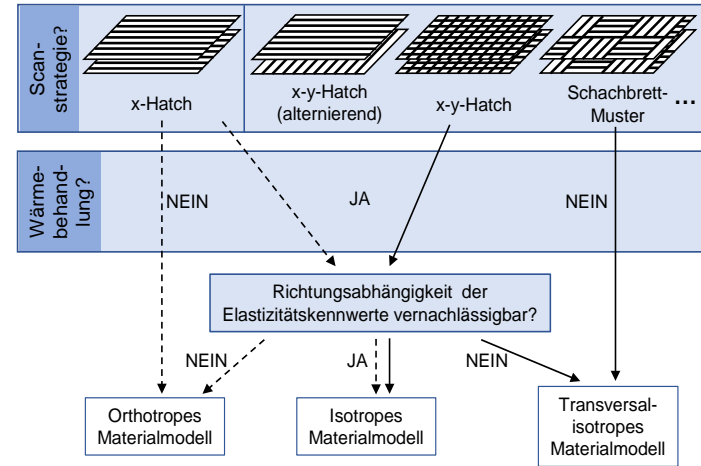
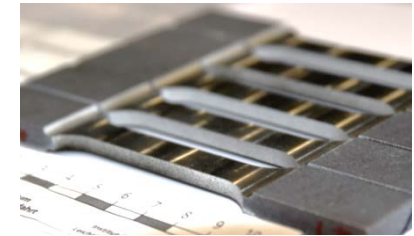
Grenzflächeneffekte (Festigkeitsverlust?)



Probenhalterzeug (LMF-Hybrid)

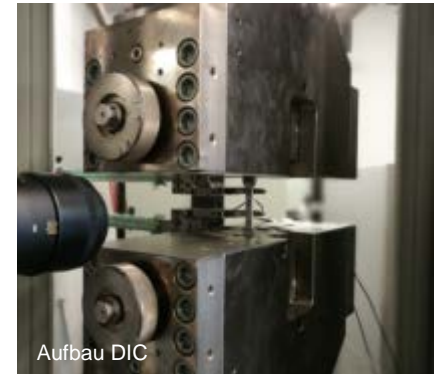
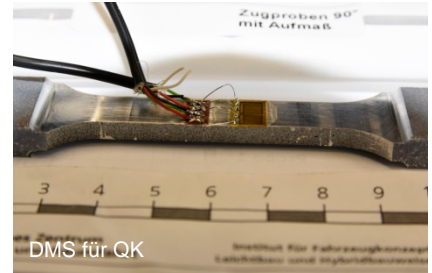
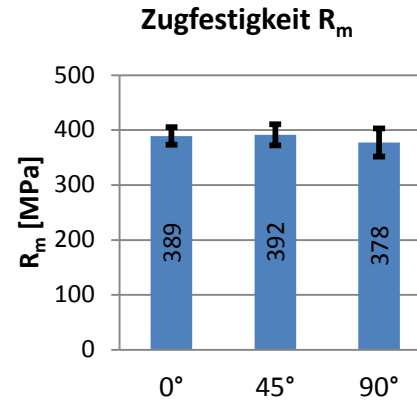
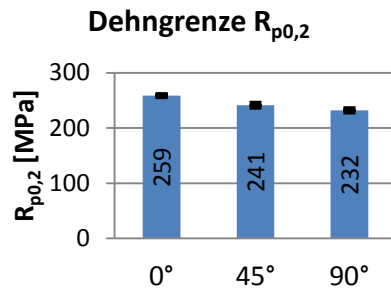
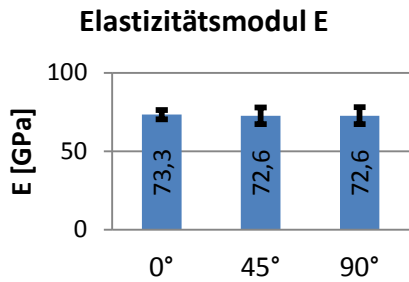


LMF-Werkstoffproben, unbehandelt (links), behandelt (rechts)

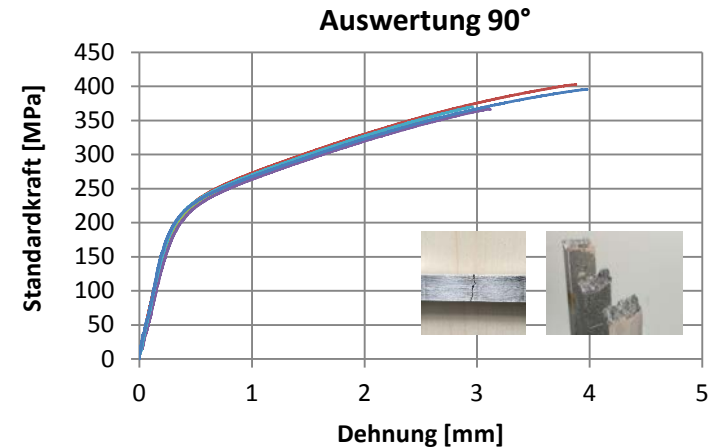
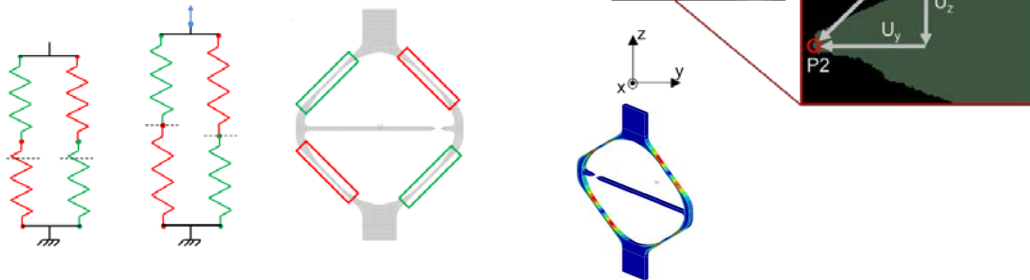


Technologische Parameter Werkstoffe

Probenausrichtung	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
0° behandelt	73,3	258,9	389,4
45° behandelt	72,6	241,5	391,6
90° behandelt	72,6	232,0	377,6
90° unbehandelt			354,4

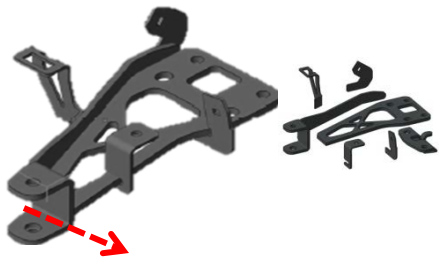


Methoden zur Validierung des Materialmodells

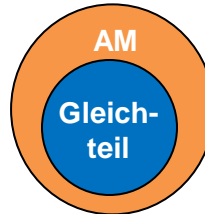


Methodenanwendung

Use-Case Dämpferhalterung



Variable Bauteildomäne



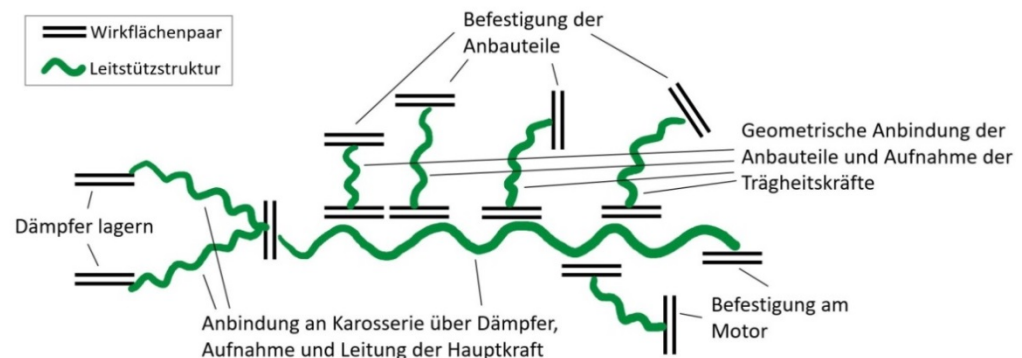
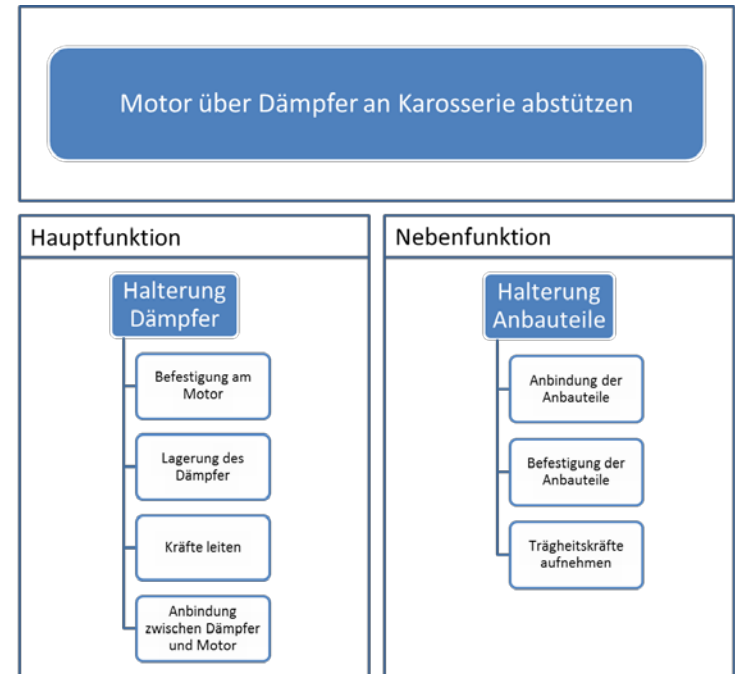
Fixe Bauteildomäne

Referenzkomponente

- Vorderwagenbereich
- Konventionelle Ausführung als Stanz-Biege-Schweißteil
- Niedrige Stückzahl (100-999)
- Differentialbauweise: 7 Einzelteilen
- Hauptfunktion: Kraftleitung (Hauptlast in der Ebene)
- Nebenfunktionen: Halterung von Anbauteilen
- Gewicht: 575g
- Geringes Bauvolumen


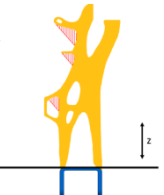


Optimierungspotenzial

- Teilereduktion
- Steifigkeit & Gewicht
- Flexibilisierung von Schnittstellen für Anbauteile



Methodenanwendung

Konzeptvarianten

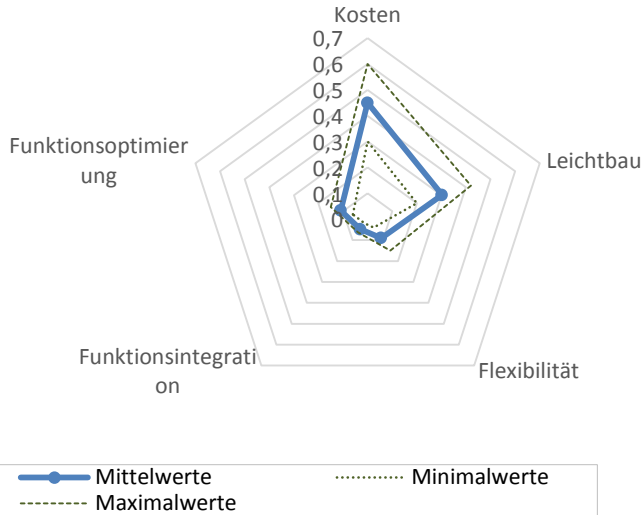
Konzeptvarianten	Halbzeug(e)		Additivanteil		Verbindung	Nacharbeit
	Struktur	Verfahren	Struktur	Verfahren		
Konzept 1 	Gabel, Mittelplatte, Halbleche f. Abdeckungen + Schläuche	Walzen, Stanzen, Biegeumformen	Halterung Ventil 1+2, Verstärkungen	Pulverauftrag (z.B. DMD, LMD)	Schweißen, additiv bedrucken	Spanend Oberflächenbehandlung, Bohrungen, Wirkflächen
Konzept 2 	Gabel	Walzen, Stanzen, Biegeumformen	Halter, topol. optimierter Mittelteil, Anbindungen	Pulverbettverfahren (z.B. LMF, SLM, EBM)	additiv bedrucken	Bohrungen, Wirk- und Fügeflächen
Konzept 3 	Mittelplatte	Walzen, Stanzen / Schneiden (Laser bzw. Wasserstrahl)	Halter, Gabel, topol. optimierter Mittelteil, Anbindungen	Pulverbettverfahren	additiv bedrucken	Bohrungen, Wirkflächen
Konzept 4 	Mittelplatte & Anbindungen zum Motor	Walzen, Stanzen, Biegeumformen	Halter, Oberer Teil der Gabel, topol. optimierter Mittelteil	Pulverbettverfahren	additiv Bedrucken	Bohrungen, Wirkflächen



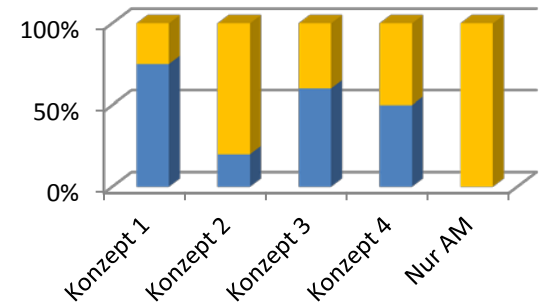
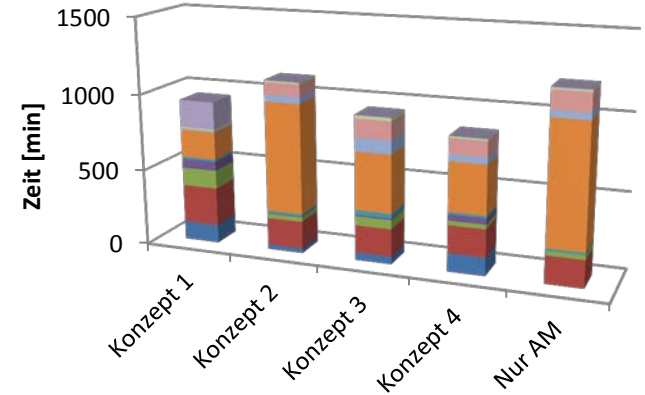
Methodenanwendung

Konzeptbewertung und -auswahl

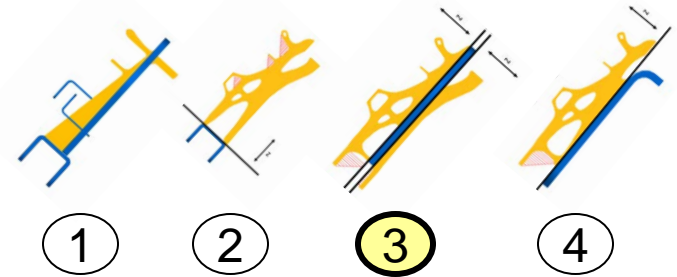
Gewichtung der Konstruktionsziele



- Oberflächenbehandlung
 - Cooldown
 - Entstützen
 - Entpacken
 - Bauzeit
 - Schutzgasaufbau
 - Halbzeug(e) fixieren
 - Maschinenvorbereitung
 - Datenvorbereitung
 - Halbzeugherstellung
-
- AM-Vol.-Anteil
 - Halbzeug-Vol.-Anteil



Kriterium	Gewichtung	Konzeptvariante							
		1		2		3		4	
		Wert	gewichtet	Wert	gewichtet	Wert	gewichtet	Wert	gewichtet
Investitionskosten	0,215	4	0,86	6	1,29	8	1,72	7	1,505
Prozesskosten	0,14625	5	0,73125	1	0,14625	4	0,585	4	0,585
Materialkosten	0,08875	7	0,62125	2	0,1775	5	0,44375	4	0,355
Leichtbau	0,3025	3	0,9075	9	2,7225	8	2,42	7	2,1175
Summe			3,12		4,33625		5,16875		4,5625
Rang		4		3		1		2	

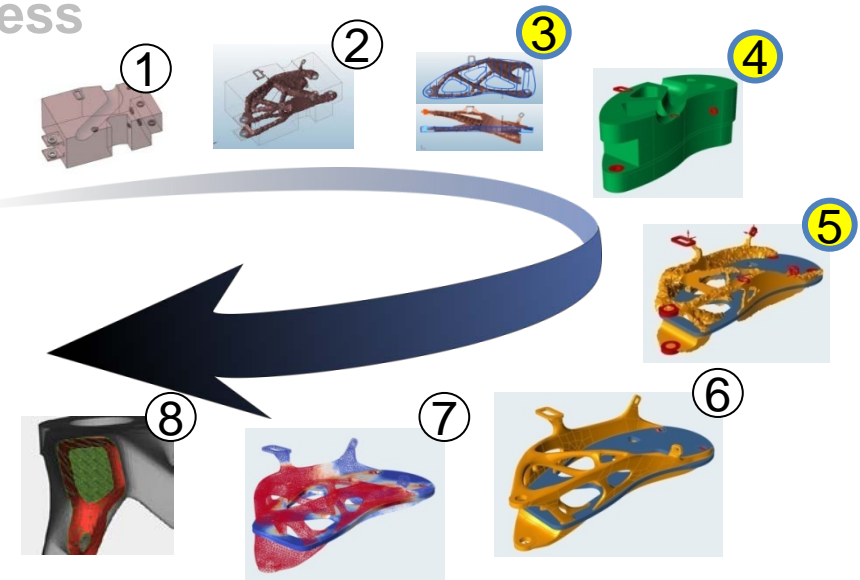


Methodenanwendung

Gestaltungs- und Optimierungsprozess

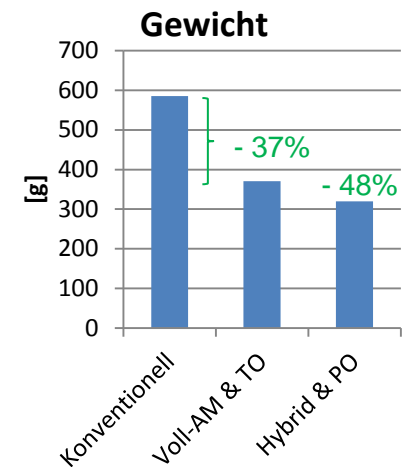
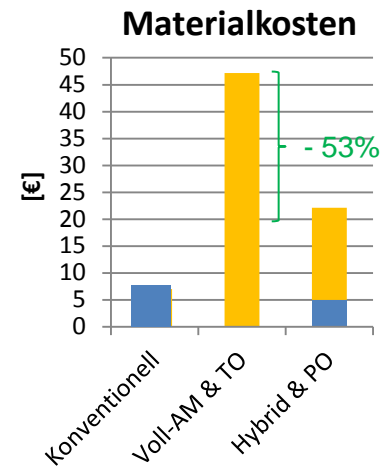
Prozess

1. Konstruktion des Designvolumens
2. 1. Topologieoptimierung & Halbzeugdefinition
3. Halbzeuggestaltung
4. Konstruktion des neuen Designräume
5. Hybride Optimierung
 - Halbzeug (Parameteroptimierung)
 - AM (Topologieoptimierung)
6. Oberflächengestaltung des AM-Anteils
7. Parameteroptimierung
 - Außenhaut (Parameteroptimierung)
 - Innere Strukturen (Parametereoptimierung)
8. Erstellung der Fertigungsdaten



Optimierungsziele

- Steifigkeit
- Gewicht
- Stützstrukturreduktion
- Materialkosten



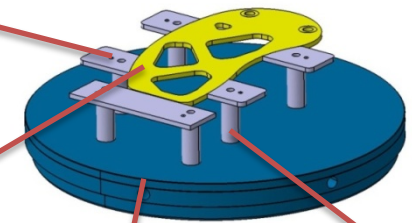
Fertigung

Halbzeug



Befestigungs-
laschen

Halbzeug



Abstands-
zylinder

Bauplatzform

AM-Anteil

	LMF	LMD
Verfahrensprinzip	Pulverbett	Pulverauftrag
Bauplatzform/-kammer [mm]	∅ 300 x 400 (Truprint3000)	4000 x 1500 x 2000 (TruLaser Cell 7040)
Auftragsbreite [mm]	Gesamtes Pulverbett	0,4 – 25 Stand.-parameter: 2 – 5)
Schichtdicke/Auftragshöhe [µm]	30 - 100	Ca. 1/3 der Auftragsbreite
Prozessgeschwindigkeit	↓	↑
Mögliche Bauteilgröße	↓	↑
Geometrische Details	↑	↓

Fertigungsparameter:

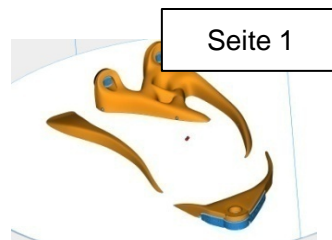
Schichtstärke = 0,1 mm
 Scangeschw. = 1400 mm/s
 Strategie = Schachbrett
 Laserleistung = 350W
 Focus-Dm. = 0,2 mm
 Aufbaurrate: 14,4 cm³ / h
 %-Dichte: 99,87

Halbzeugwerkstoff:

Al: Rest Mn: 0,45
 Si: 9 – 11 Mg: 0,2 – 0,45
 Fe: 0,55 Zn: 0,1
 Cu: 0,0 Ti: 0,15

Pulverwerkstoff:

AC-AISi10Mg(Fe) D bzw. AC-43400
 nach DIN EN 1706AlmgSi (FE)
 für LMD und LMF



Methodenanwendung

Use-Case Federbeindom

Konventionelle Integralbauweise in Druckguss

Optimierungspotenzial durch AM: Laststufengerechte Auslegung für verschiedene Derivate und Gewichtsklassen durch partielle Verstärkung Flexible Aufbringung von Anbindungen

Verfahrensauswahl

- Eignung: Einsatz zur partiellen Verstärkung
- Kriterien: Bauteilgröße, Werkzeugzugänglichkeit, Halbzeugzustand (*uneben!*), niedriger Detailgrad, Verf. Legierungen, hohe Prozessgeschwindigkeit

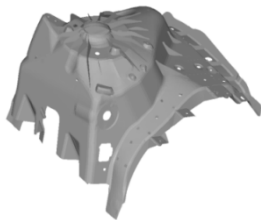
	LMF	LMD
Verfahrensprinzip	Pulverbett	Pulverauftrag
Bauplattform/-kammer [mm]	Ø 300 x 400 (Truprint3000)	4000 x 1500 x 2000 (TruLaser Cell 7040)
Auftragsbreite [mm]	Gesamtes Pulverbett	0,4 – 25 Stand.-parameter: 2 – 5)
Schichtdicke/Auftragshöhe [µm]	30 - 100	Ca. 1/3 der Auftragsbreite
Prozessgeschwindigkeit	↓	↑
Mögliche Bauteilgröße	↓	↑
Geometrische Details	↑	↓

Strukturkonzept

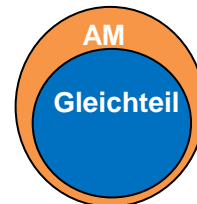
Aufteilung des Bauteils in fixe und variable Strukturbereiche

- Fix: Grundkörper als Halbzeug in Druckguss
- Variabel: Verstärkungsrippen und -patches mittels Pulverauftragsverfahren „aufgedruckt“

Konventionelle Anwendung

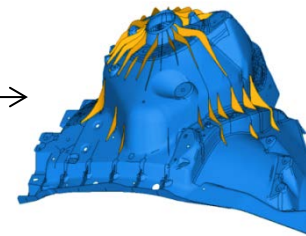


Variable Bauteildomäne



Fixe Bauteildomäne

Hybride Anwendung

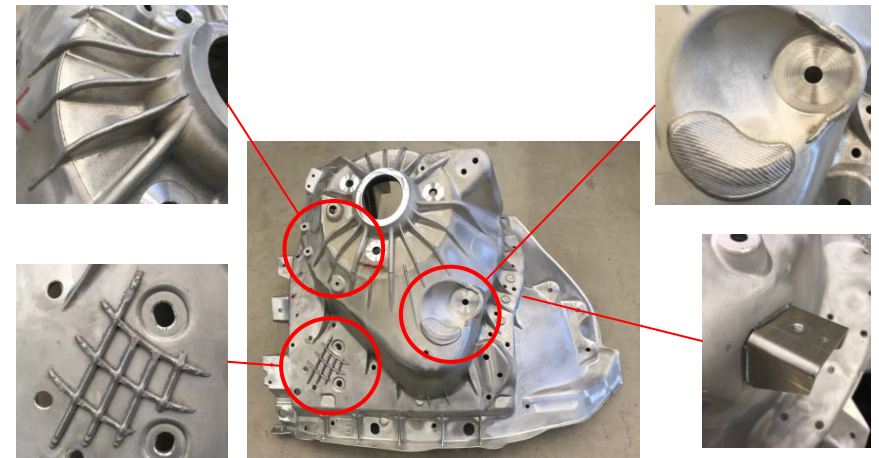
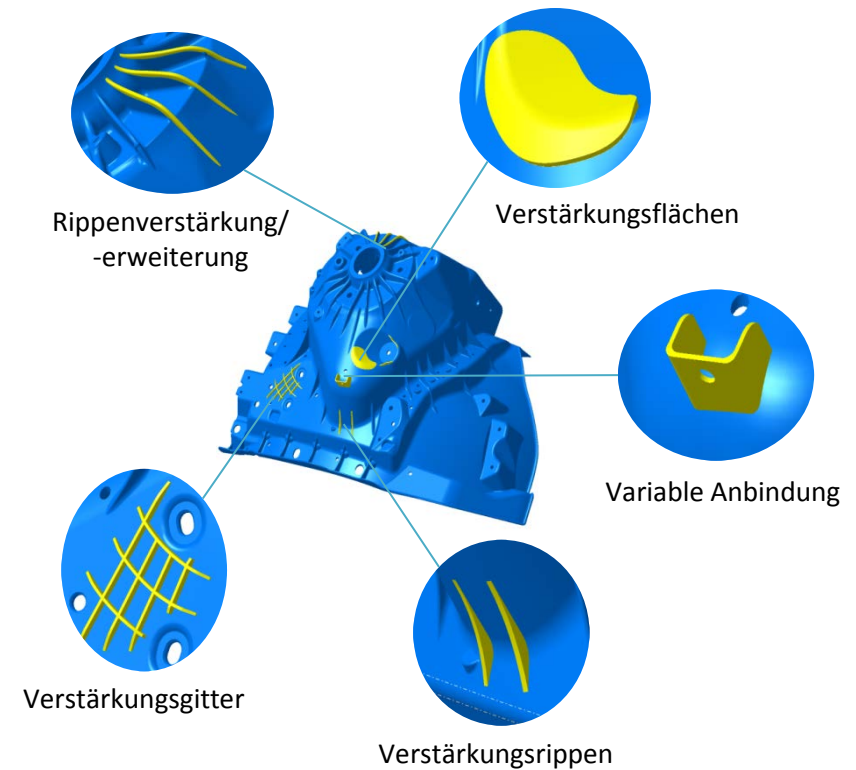


Methodenanwendung

Use-Case Federbeindom

Vorteile:

- Skalierbare und variable Konstruktionselemente
- Flexibilisierung von Gleichteilen durch AM-Anteil
- Lastgerechte Auslegung von Varianten
- Erhöhte Wirtschaftlichkeit (ggü. rein *additiv* hergestellte Strukturen)
- Kombinierte Herstellung von Strukturverstärkungen und Anbindungen



Zusammenfassung & Forschungsbedarf

- Methodes Vorgehen zur kombinierten Konzeption und Auslegung
- Hilfswerkzeug zur Verfahrensauswahl
- Verkürzte Prozesszeiten durch partiellen AM-Einsatz
- Reduzierte Materialkosten
- Hohe Flexibilität für variantenintensive Strukturen
- Erhöhte Effizienz und Materialauslastung
- Leichtbau



Forschungsbedarf:



- Prozessgerechte Halbzeug- und Gleichteilgestaltung
- Neue Strategien bei der Erstellung variabler Strukturkonzepte
- Digitalisierung und Bereitstellung technologischer Parameter für die Konstruktion
- Automatisierung der hybriden Konzepterstellung
- Automatisierung der hybriden Auslegung und Optimierung
- Bedarf an neuartigen Prozesshilfsmittel



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt: M.Sc. Michel Chamoun
Tel.: +49 711/ 6862 - 8268
Email: michel.chamoun@dlr.de



Wissen für Morgen

