

Industriearbeitskreis Light Alliance

2. Light-Design



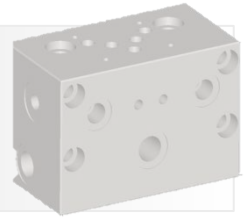
Light Alliance

In 5 Schritten zum Light-Produkt



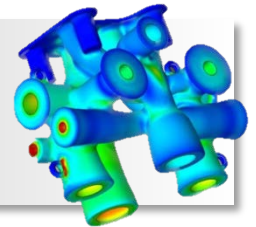
Step 1 Light-Functionality

- Hinterfragung und Optimierung des bisherigen Funktionsumfangs
- Erweiterung des Funktionsspektrums
- Funktionsintegration



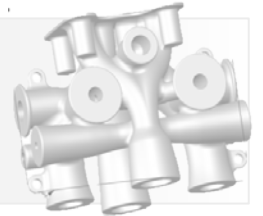
Step 2 Light-Design

- Umsetzung und Bewertung mehrerer Bauteilkonzepte
- Minimierung des Bauteilgewichts und Sicherstellung aller Funktionalitäten



Step 3 Light-Prototyping

- Prototypenfertigung aus Kunststoff
- Überprüfung von Haptik und Handling
- Finalisierung des Designs



Step 4 Light-Manufacturing

- CAD Fertigungszeichnungen
- CAM Anbindung
- Gestaltung Fertigungsprozess
- Fertigung von Realbauteilen



Step 5 Light-Factory

- Benchmark
- Herstellungsverfahren
- Maschinen
- lasertechnische Aspekte
- Werkstofffragen
- Herstellkosten

► Inhaltsübersicht



Themenschwerpunkt: Konstruktion
Potentiale und Designrichtlinien

Light-Design:
Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

Nächste Schritte

► Workshop und Ergebnisse



Themenschwerpunkt: Konstruktion Potentiale und Designrichtlinien

Light-Design:
Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

Nächste Schritte

LAM – Werden des Designers Wünsche war?



LZN



Airbus Innovation Cell & LZN



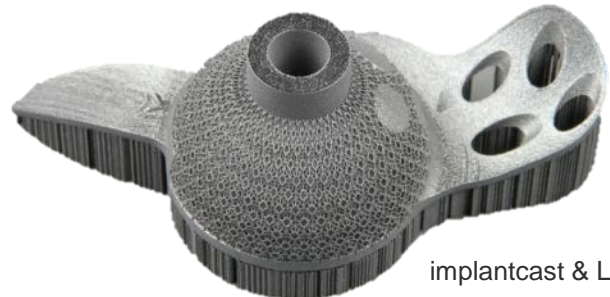
iLAS TUHH



iLAS TUHH

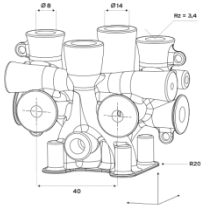


iLAS TUHH



implantcast & LZN

Vorteile der laseradditiven Fertigung bergen verschiedene Potentiale



- **Einfache Datenvorbereitung** direkt aus den CAD-Daten mit hohen Automatisierungsgraden möglich



- **Simultane Fertigung** von verschiedenen, **individuellen** Bauteilen ermöglicht flexible Fertigung und Berücksichtigung von spezifischen Kundenwünschen mit geringen Mehrkosten



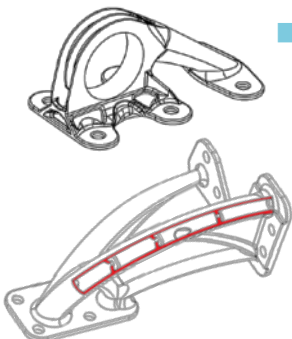
- **Endkonturnahe Fertigung** reduziert den Aufwand in der Nachbearbeitung



- **Nachhaltigkeit in der Produktion** durch hohe Wiederverwertbarkeit des nicht genutzten Pulvers (ca. 95% abhängig von Material, Maschine und Baujob)



- **Reduktion der time-to-market** u.a. durch **werkzeugfreie Fertigung** bietet entscheidende Wettbewerbsvorteile



- **Hohe geometrische Gestaltungsfreiheiten** ergeben Optimierungspotentiale für die Produkte hinsichtlich
 - Gewichtsreduktion
 - Funktionsoptimierung und –integration
 - Integraler Bauteilgestaltung und damit Reduktion von Montageaufwand

Auswahl geeigneter Bauteile entlang von drei Bereichen notwendig

1

Kosten / Zeit

- Hohe Bauteilkomplexität
- Konventionell schwierige Herstellung
- Geringe Stückzahlen bzw. individuelle Produkte

Herstellungskosten/-zeit

2

Leichtbau

- Mögliche Gewichtsreduktion durch Topologieoptimierung

Leichtbaupotential

3

Funktion

- Mögliche Zusatzfunktionen des Bauteils
- Funktionsoptimierungen

Funktionspotential

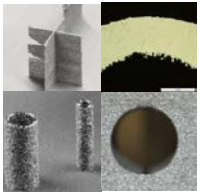
**Gesamtbewertung
 der Wirtschaftlichkeit
 notwendig**

- Abschätzung des **monetären Gegenwerts** für Zeitersparnis sowie Leichtbau- und Funktionspotentiale
- **Sekundäre Effekte**, d.h. Auswirkungen auf weitere Prozesse zu berücksichtigen, z.B. einfache Logistik, Steigerung der Flexibilität

▶ Gegenwärtige Herausforderungen der laseradditiven Fertigung

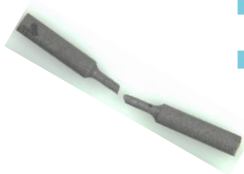
Fokus

Fehlende Designrichtlinien



- Know-how begrenzt auf Experten
- Konstruktionen bislang durch konventionelle Restriktionen getrieben
- Umfassende Richtlinien kaum verfügbar

Verfügbare Werkstoffe



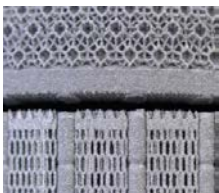
- Noch nicht alle Standardwerkstoffe für LAM verfügbar
- Fehlende Materialkennwerte besonders für Ermüdungsbeanspruchung

Fehlende Qualitätssicherung



- Großzahl an Prozessparametern
- Prozessinstabilität verursacht Qualitätsmängel
- Derzeit keine in-process Regelung

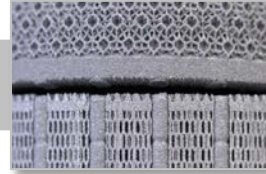
Eigenspannungen im Bauteil



- Thermisch induzierte Eigenspannungen
- Hohe Spannungen können Risse im Bauteil verursachen
- Supportablösung verursacht Prozessabbrüche
- Verzug verursacht Bauteilausschuss

Einteilung der Designrichtlinien in sieben Kategorien

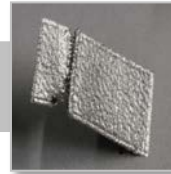
1 Eigenspannungen



2 Supportstrukturen



3 Minimale Wandstärken



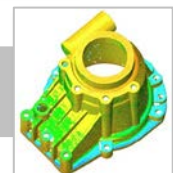
4 Bohrungen und Zylinder



5 Bauraumabmessungen



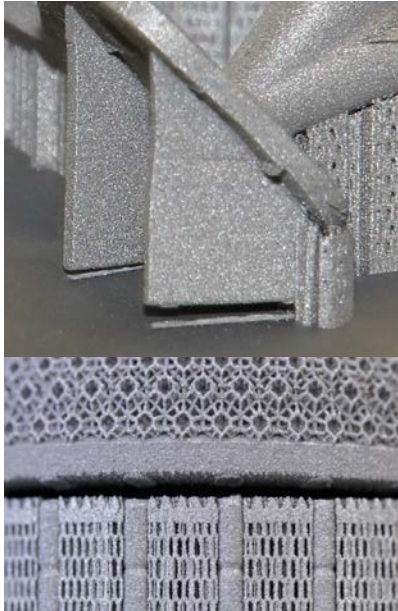
6 Genauigkeit und Oberflächenqualität



7 Fertigungskosten



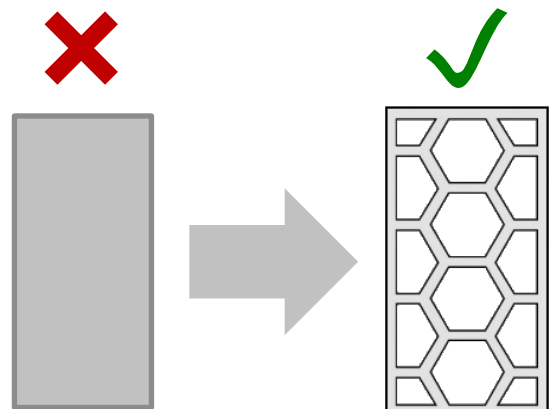
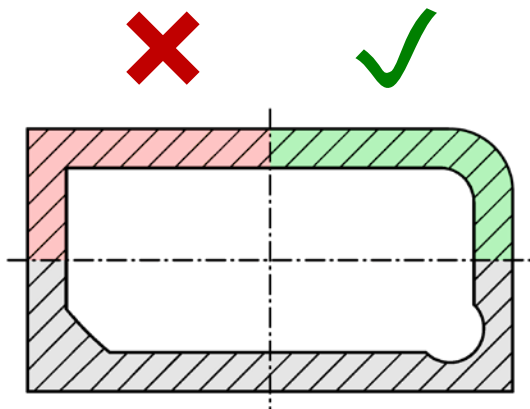
Eigenspannungen



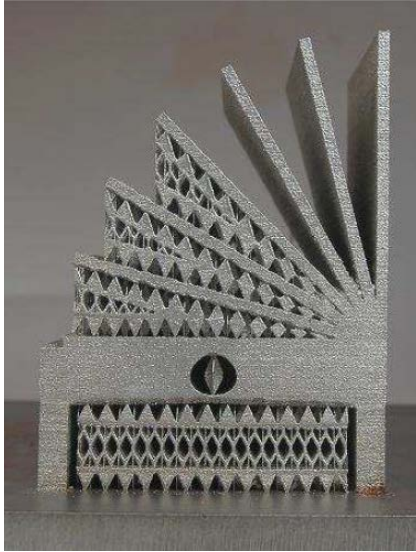
Durch lokale Energieeinbringung entstehen Eigenspannungen im Bauteil, die zu Verzug und zum Bauteilversagen führen können

- Energieeinbringung durch den Laser in bereits erstarrte Schichten und abkühlungsbedingtes Schrumpfen erzeugt Eigenspannungen
- Scharfe Kanten können Kerbspannungen hervorrufen, die das Risiko von Bauteilversagen im Prozess erhöhen
- Durch geeignete Bauteilgestaltung sollten Kerbspannungen vermieden werden

Durch geeignete Bauteilgestaltung können Eigenspannungen und Verzug verringert werden



Supportstrukturen

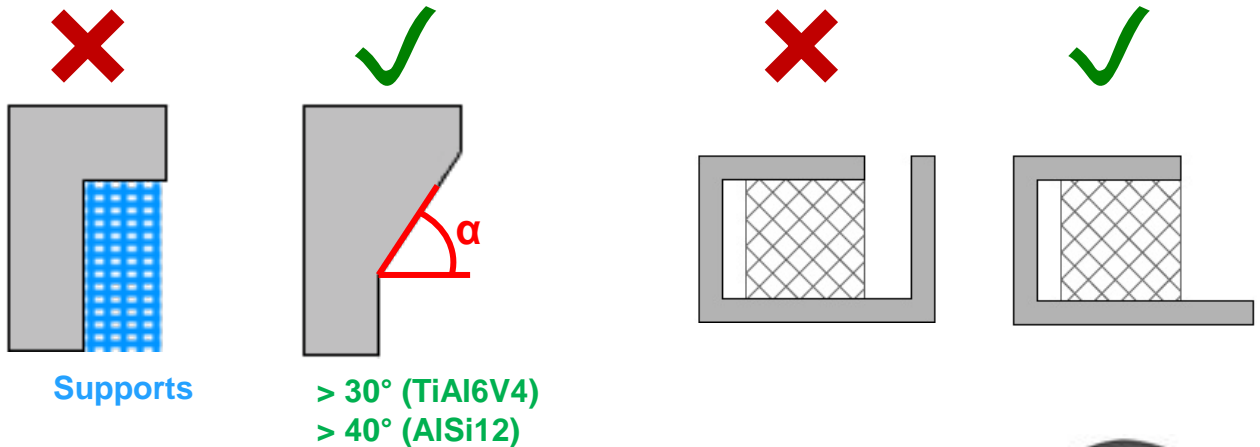


Supportstrukturen dienen zur **Aufnahme der Eigenspannungen** des Bauteils und verbessern die **Wärmeableitung** innerhalb des Bauteils

Supportstrukturen sind notwendig bei:

- Horizontalen Überhängen
- Ebenen mit Überhangwinkel
 $> 30^\circ$ (TiAl6V4) $> 40^\circ$ (AlSi12)
- Horizontalen Bohrungen
 $\varnothing > 8$ mm (TiAl6V4) $\varnothing > 4$ mm (AlSi12)

Supportstrukturen müssen manuell entfernt werden!



Bauteilausrichtung und Supportstrukturen schon im frühen Designstadium beachten!

Mögliche Zielgrößen:

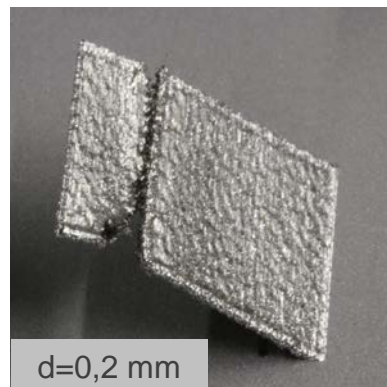
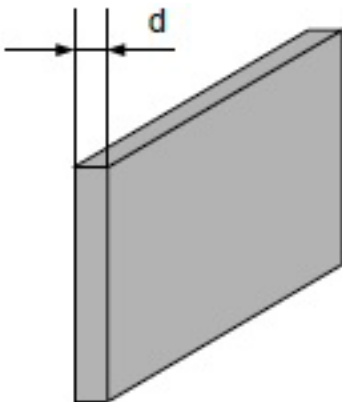
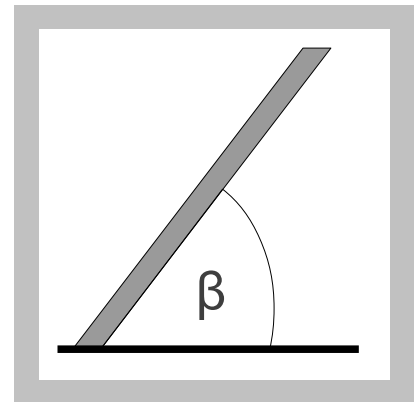
- Minimales Supportvolumen
- Geringe Nacharbeit, einfaches Entfernen der Supportstrukturen
- Optimale Oberflächenqualität



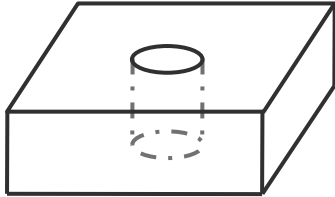
► Minimale Wandstärken

Wandstärken < 0,4mm sollten vermieden werden

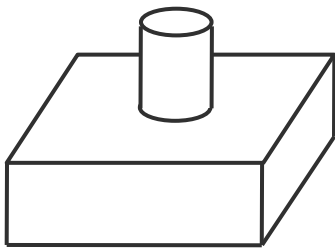
- Anwendbar auf alle Orientierungen
- Durch geeignete Geometriegestaltung können unter Umständen auch dünnere Wandstärken erreicht werden, z.B. selbststützende Strukturen (Gitter)



▶ Bohrungen und Zylinder



Bohrung > 2mm



Zylinder > 1mm

Bohrung > 2mm

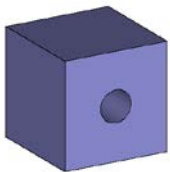
- Ansonsten Pulveranhaftung in der Bohrung
- Bei sehr kurzen Bohrungen können auch kleinere Durchmesser realisiert werden

Zylinder > 1mm

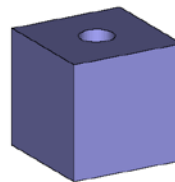
- Ansonsten wird die Konturgenauigkeit stark beeinträchtigt

Möglichkeit der Nachbearbeitung bei hohen Anforderung an Geometriegenauigkeit zu berücksichtigen

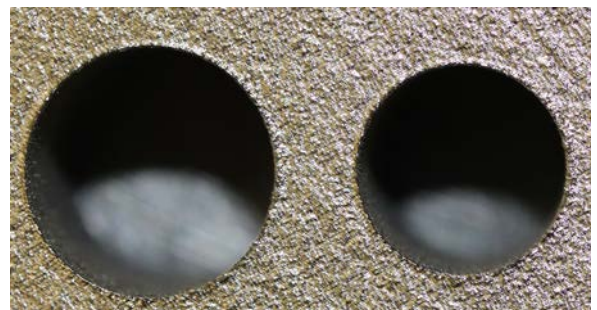
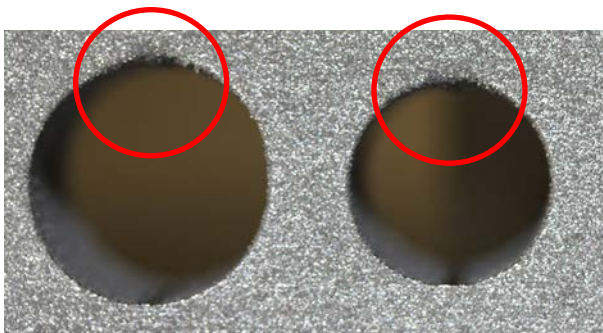
Features < 1 mm sollten vermieden werden



horizontal



vertikal



Horizontale Bohrungen weisen Prozessfehler an der Oberseite auf

► Bauraumabmessungen

Da die **Herstellung** der Bauteile **unter Schutzgasatmosphäre** durchgeführt werden muss, sind die Abmessungen des Bauteils an die Bauraumgröße der Maschine gebunden.

- Bauraumgrenzen:
 - Typisch 250 x 250 x 250 mm³
 - Maximum 630 x 400 x 500 mm³ (Concept Xline 1000R)
- Größere Bauteile durch Teilung fertigbar
- Hybride Fertigung sollte für große Bauteile in Betracht gezogen werden

Bauraumgrößen begrenzen die maximalen Bauteilabmessungen!

Beispiele für Bauraumabmessungen

SLM 500^{HL}
 by *SLM Solutions*



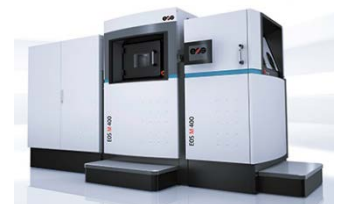
Bauraum:
 500x280x325 mm³

X 1000R
 by *Concept Laser*



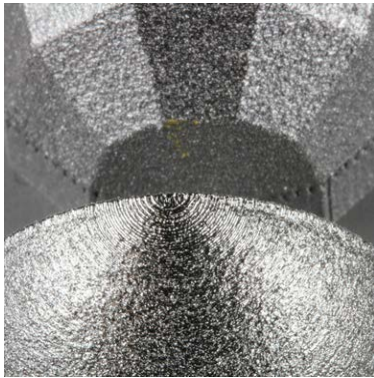
Bauraum:
 630x400x500 mm³

EOS M 400
 by *EOS*

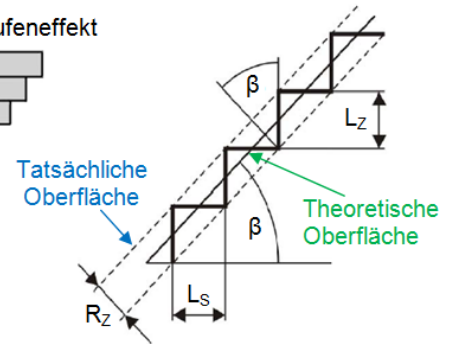
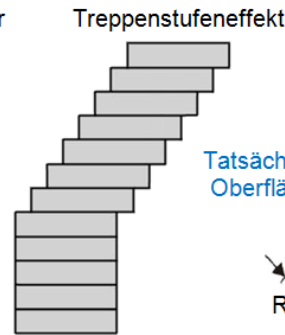
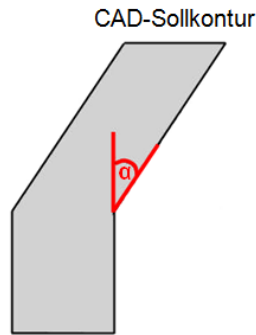


Bauraum:
 400x400x400 mm³

Oberflächenqualität I

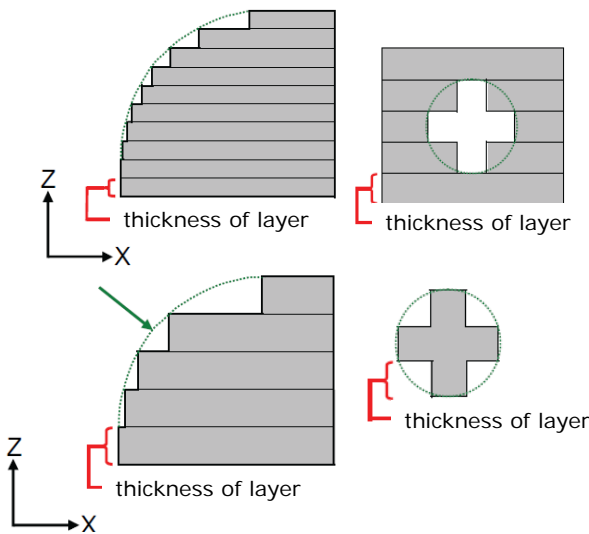


Kugeloberfläche



Treppenstufeneffekt durch schichtweisen Bauteilaufbau

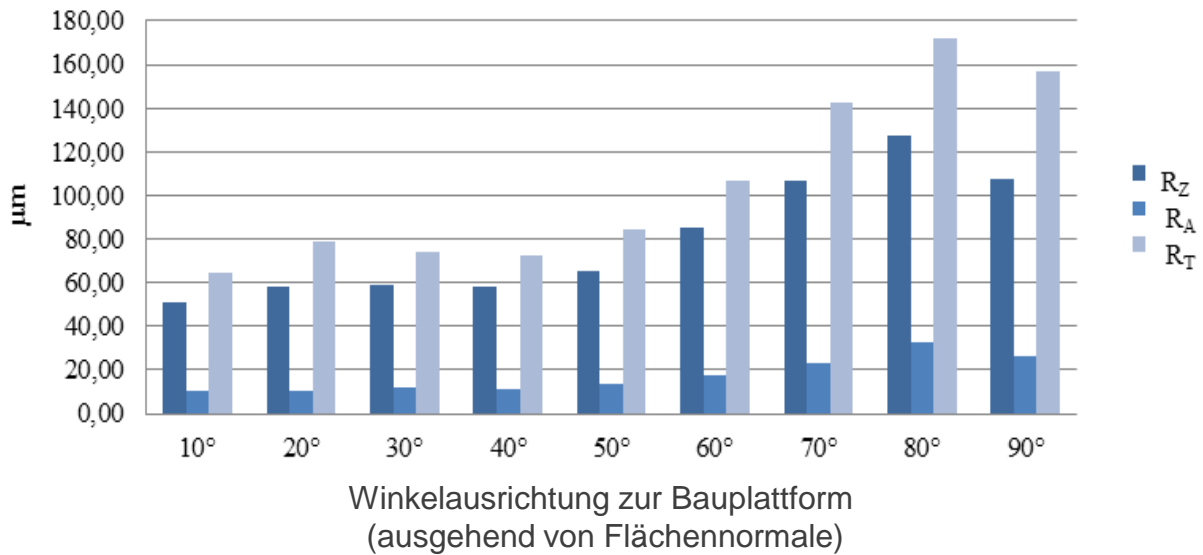
- Erreichbare Auflösung hängt von Schichtstärke ab
- Typische Schichtstärken für Metall: 30 – 60 µm
- **Höchste Oberflächenqualität** bei Oberflächen, die **vertikal** (in z-Richtung) orientiert sind
 - Kein Treppenstufeneffekt
 - Geringe Pulveranhaftung



Oberflächenqualität ist abhängig von der Orientierung der Oberfläche, sowie dem Material und den Belichtungsparametern

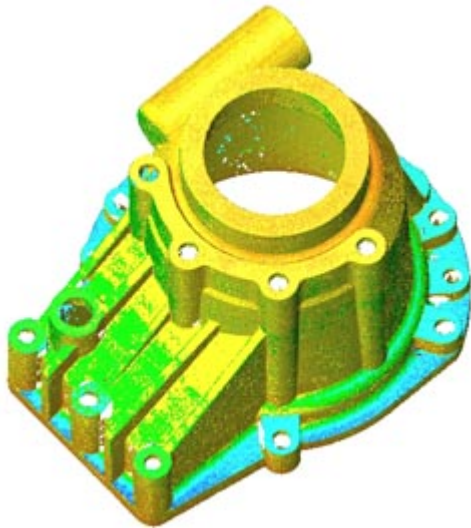
Oberflächenqualität II

Oberflächenrauheit für TiAl6V4



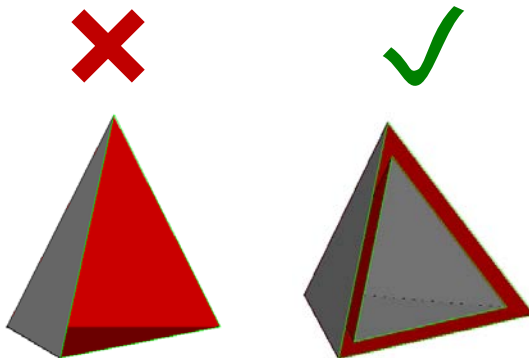
Manufacturer	Material type	Minimum wall thickness	Surface quality	
			horizontal	vertical
EOS	Stainless steel 15-5 (hardenable)	0.3 – 0.4 mm		
	Stainless steel 17-4	0.3 – 0.4 mm		
	CoCrMo Superalloys	0.3 mm	R _Z = 40-50 µm (R _a = 10 µm)	
	MaragingSteel / 18 Mar 300	0.3 – 0.4 mm		
	TiAl6V4	0.4 mm	R _Z = 50-90 µm (R _a = 9-14 µm)	
	Bronze-based mixture (EOS DirectMetal 20)	0.2 mm	R _Z = 40-50 µm (R _a = 9 µm)	
MCP	Tool steel (1.2344)		13 (± 2) µm	34 (± 4) µm
	Stainless steel (1.4404)		16 (± 2) µm	38 (± 4) µm
	Aluminum (AlSi12)		15 (± 2) µm	34 (± 4) µm
	CoCr ASTM F75		17 (± 2) µm	29 (± 4) µm
	Titanium and alloys		14 (± 2) µm	36 (± 4) µm

► Genauigkeit



- **Erreichbare Genauigkeiten:**
 - in z-Richtung: ± 1 Schichtstärke
 - in x/y-Ebene: $\pm 0,05$ mm
- Die Genauigkeit der Geometrie ist u.a. abhängig von:
 - Material
 - Fokussdurchmesser des Lasers
 - Bauteilabmessung
 - Bauteilgeometrie bzw. Ausrichtung der Bauteiloberflächen

► Fertigungskosten



- **Bauteilkosten primär volumenabhängig**
- Geringes Bauteilvolumen als Hauptzielgröße, z.B. Schalenbauweise, Gitterstrukturen
- Hohe Ausnutzung des Bauraums der Maschine als weitere Zielgröße (meist mit mehreren Bauteilen parallel)

Maschinenstundensatz ist maßgeblicher Kostentreiber

► Workshop und Ergebnisse



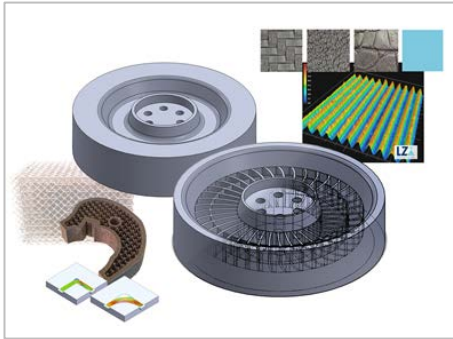
Themenschwerpunkt: Konstruktion
Potentiale und Designrichtlinien

Light-Design:
Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

Nächste Schritte

► Fortschritt der Demonstratoren

1 Multifunktions-3D-Druck



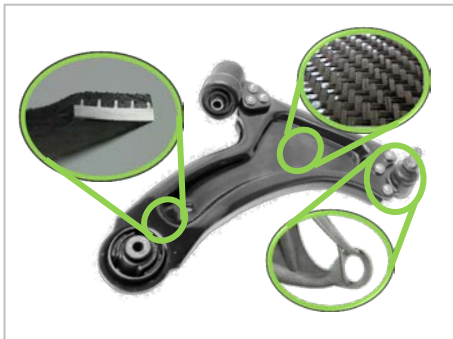
Prägewalze

Der Multifunktions-3D-Druck von Prägewalzen zur Oberflächenstrukturierung verschiedener Materialien bietet die Möglichkeit unterschiedlichste Funktionen in ein einzelnes Bauteil zu integrieren. Durch den Einsatz der laseradditiven Fertigung können nun neuartige, vorher nicht dagewesene Prägewalzen entwickelt werden.

Workshop-Schwerpunkt

Der Schwerpunkt des Workshops zu dem Thema Light-Design lag in der Entwicklung eines Prototypendesigns für eine Prägewalze unter Berücksichtigung der Restriktionen der laseradditiven Fertigung.

2 Hybrider 3D-Druck



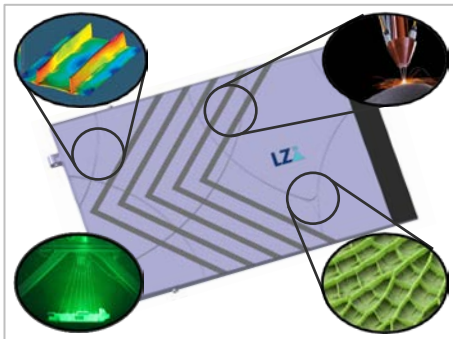
Hybrider Querlenker

Die Verbindungstechnik ist eine der zentralen Herausforderungen bei hybriden Strukturen. Ohne eine kosten- und gewichtseffiziente Verbindungstechnik können die Vorteile von Hochleistungswerkstoffen nicht genutzt werden.

Workshop-Schwerpunkt

Der Schwerpunkt des Workshops lag auf der Konzeption eines hybriden Querlenkers auf Grundlage eines morphologischen Kastens. Vier Konzepte wurden mittels Punktwertmethode bewertet. Das ausgewählte Konzept wird in den folgenden Schritten weiterentwickelt.

3 3D-Blechleichtbau



Laderampe

Rampe und Klappe als Spezialform einer tragenden Bodenstruktur kommen in vielfältigen Varianten im Fahrzeug-, Schwermaschinen-, Schiff- und Ingenieurbau vor. In der Vorbereitung des Workshops wurden drei gegensätzliche Konstruktionskonzepte für die Baugruppe erarbeitet, die mit den Teilnehmern analysiert und bewertet wurden.

Workshop-Schwerpunkt

Der Schwerpunkt des Workshops lag in der Vorstellung und in der Bewertung von konstruktiven Lösungskonzepten unter Betrachtung funktionaler und wirtschaftlicher Aspekte sowie der abschließenden Festlegung des finalen Baugruppenkonzeptes mit den Teilnehmern.

Ziele und Vorgehen der Workshops

1 Multifunktions-3D-Druck

Ziele des Workshops

Im zweiten Workshop mit dem Thema Light-Design sollte unter dem Gesichtspunkt von Fertigungsrestriktionen der laseradditiven Fertigung ein Prägewalzenentwurf von den Teilnehmern entwickelt werden.

Vorgehensweise

Für das Design einer multifunktionalen Prägewalze wählten die Teilnehmer in der ersten Hälfte des Workshops Einzelfunktionen mit Hilfe eines Funktionskatalogs, gemäß des Anforderungsprofils ihres Walzeneinsatzszenarios, aus und entwickelten, sowie präsentierten ihre Walzenidee. In der zweiten Hälfte des Workshops diskutierten die Teilnehmer nach einer Vorstellung der Fertigungsrestriktionen der laseradditiven Fertigung ihre Walzenentwürfe und von der LZN GmbH bereits vorbereitete Entwürfe hinsichtlich dieser Restriktionen und erarbeiteten einen finalen Entwurf ihrer Prägewalze.

2 Hybrider 3D-Druck

Ziele des Workshops

Im zweiten Workshop mit dem Thema Light-Design sollten zwei Lösungskonzepte für einen hybriden Querlenker durch die Teilnehmer entwickelt werden. Abschließend sollte ein Lösungskonzept mittels Punktwertmethode für das weitere Vorgehen ausgewählt werden.

Vorgehensweise

Die im Workshop 1 gewonnenen Teilkonzepte und Anforderungen sollen herangezogen werden, um mit den Workshop-Teilnehmern verschiedene Gesamtkonzepte zu erarbeiten. Hierfür können die Teilkonzepte im Rahmen eines morphologischen Kastens miteinander kombiniert werden. Anschließend sollen die Konzepte von den Workshop-Teilnehmern bewertet und ein Gesamtkonzept für das weitere Vorgehen definiert werden.

3 3D-Blechleichtbau

Ziele des Workshops

Im zweiten Workshop sollten drei vorkonzipierte Gestaltungsmöglichkeiten einer Leichtbau-Bodenstruktur mit den Teilnehmern diskutiert, gegenübergestellt und nach verschiedenen Kriterien bewertet werden, um so zu einem finalen Designentwurf zu kommen, der in den folgenden Workshops weiter ausgearbeitet und umgesetzt wird.

Vorgehensweise

Auf Basis der Ideen des ersten Workshops wurde den Teilnehmern ein abgeleiteter Morphologischer Kasten sowie das Vorgehen und das Ergebnis einer Topologieoptimierung der Leichtbaubodengruppe vorgestellt. Darauf basierend wurden 3 Bauteilkonzepte präsentiert, die grundsätzlich unterschiedliche Konstruktions- und Fertigungsphilosophien beinhalten. Diese wurden von den Teilnehmern bewertet und ein finaler Entwurf ausgewählt, der in den weiteren Workshops ausgestaltet und aufgebaut wird.

Einleitung

Mit Hilfe des Multifunktions-3D-Drucks wird die Kombination von bestehenden Funktionen mehrerer Komponenten eines Systems in einem einzelnen Bauteil möglich. So kann unter Einsatz additiver und abtragender Lasertechnik eine Einzelkomponente durch Funktionserweiterung zu einem multifunktionalen Bauteil werden. Hinsichtlich der immer weiter zunehmenden Komplexität einzelner Baugruppen, der gleichzeitig verschärften Einsatzbedingungen der Komponenten sowie der hohen Anforderungen an Leistungsmerkmale, Werkstoffe und Konstruktion, zeigt die laseradditive Fertigung neue Perspektiven auf, die Grenzen der konventionellen Fertigungsverfahren zu überwinden und mit Verzicht auf zusätzliche Fertigungsschritte den Kosten- und Fertigungsaufwand hochkomplexer Baugruppen zu minimieren.

In Rahmen der Light Alliance wird der Einsatz additiver und abtragender Lasertechnik zur Herstellung multifunktionaler Bauteile am Beispiel einer konventionellen Prägewalze, analysiert.

Prägewalzen kommen in den unterschiedlichsten Branchen und Produktionsbereichen, u.a. in der Papier-, Lebensmittel- und Kunststoffindustrie sowie in der Metalltechnik, zum Einsatz. Je nach Einsatzgebiet werden an diese Werkzeuge unterschiedlichste Anforderungen an Eigenschaften und Funktionen gestellt.

Im vorangegangenen Workshop zum Thema Light-Functionality wurden von den Teilnehmern in einem Brainstorming sämtliche Funktionen einer Walze identifiziert, in einem Ideenpool gesammelt und bewertet. Die genannten Einzelfunktionen wurden sechs Hauptkategorien zugeordnet und entsprechend der Interessen der Teilnehmer nach ausführlicher Diskussion priorisiert.

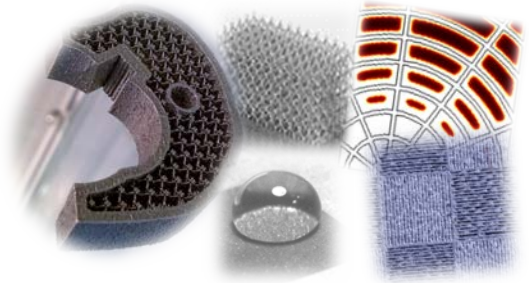


Abbildung 1: Möglichkeiten der laseradditiven Fertigung

Die Hauptkategorien bildeten die Funktionen Temperierung der Walze, Führung von Fluiden, Leichtbau, hybride Fertigung, Oberflächenstrukturierung/-funktion und Plagiatenschutz. Diese Funktionen sollten bei der zukünftigen Ausgestaltung der multifunktionalen Walze Berücksichtigung finden. Das Hauptinteresse der Teilnehmer des ersten Workshops lag vor allem auf der Integration von medienführenden Systemen und Kanälen in die Walze. Ebenso wurde in der Oberflächenstrukturierung und dem Schutz vor Fälschung sowie in einer möglichen Kombination dieser beiden Merkmale ein großes Potential zur Realisierung durch die laseradditive Fertigung gesehen.

Multifunktions-3D-Druck

Funktionskatalog

Im Anschluss an den ersten Workshop wurden von den Mitarbeitern der LZN GmbH die sechs Funktionen der Hauptkategorien in unterschiedlichen Ausprägungen für die laseradditive Fertigung aufbereitet und in einem Funktionskatalog (vgl. Tabelle 1) zusammengefasst.

Tabelle 1: Funktionskatalog des Multifunktions-3D-Drucks

Hauptfunktion		Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
A	Temperierung	A.1 Aktive Temperierung	A.2 Passive Temperierung	A.3 Aktive und passive Temperierung
B	Führung von Fluiden	B.1 Druckluftauswurf	B.2 Reinigungsfunktion	B.3 Zufuhr von Funktionsmedien
C	Leichtbau	C.1 Bionische Struktur	C.2 Stabwerksstruktur	C.3 Topologieoptimierte Struktur
D	Hybrid	D.1 Segmentierung	D.2 Funktionsmodularisierung	D.3 Hybride Fertigung
E	Oberflächenstruktur/-funktion	E.1 Nanostrukturen	E.2 Mikrostrukturen	E.3 Makrostrukturen
F	Plagiatschutz	F.1 QR-/Barcode	F.2 RFID	

Mit Hilfe des Funktionskatalogs kann im Designprozess das Bauteil modular aus den gewünschten Einzelfunktionen zusammengestellt werden.

Die unterschiedlichen Ausprägungen der sechs Hauptfunktionen werden im Folgenden ausführlich dargestellt und erläutert.

Multifunktions-3D-Druck

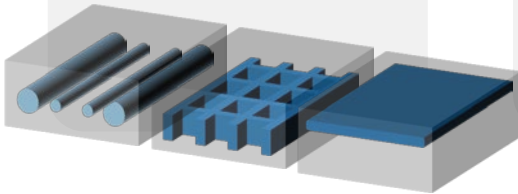
Funktionskatalog

A

Temperierung

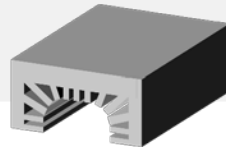
Aktive Temperierung

mit Hilfe von netzartigen Kühlkanälen



Passive Temperierung

mit Hilfe einer vergrößerten Oberfläche



Aktive + passive Temperierung

mittels Kombination von Kühlkanälen und einer vergrößerten Oberfläche



Zu der Hauptfunktion **Temperierung** wurden drei Ausprägungen entwickelt. Mit Hilfe der **aktiven Temperierung** kann eine gewünschte Temperatur der Prägewalze erreicht werden. Die **passive Temperierung** erleichtert die Wärmeableitung z.B. bei Prozessen mit heißen Prägeprodukten. Bei sehr hohen Arbeitstemperaturen eignet sich eine Kombination der **aktiven und passiven Temperierung** zur Kühlung der Prägewalze.

B

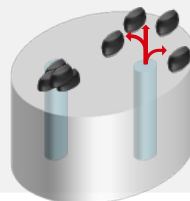
Führung von Fluiden

Druckluftauswurf

mit Hilfe einer luftdurchlässigen Lamellenstruktur

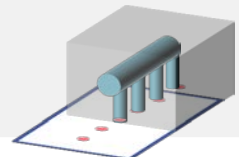


Reinigungsfunktion



Zufuhr von Funktionsmedien

z.B. Farben, Pulver, Leim, etc.



Für die Hauptfunktion **Führung von Fluiden** wurden drei Ausprägungen vorgeschlagen. Mittels Kanälen und einer luftdurchlässigen Lamellenstruktur kann ein **Druckluftauswurf** realisiert werden. Mit Hilfe einer Kanalstruktur lassen sich ebenso eine **Reinigungsfunktion** sowie die **Zufuhr von Funktionsmedien** verwirklichen. Auf diese Weise können Fluide wie Farben und Leim, aber auch pulverförmige Substanzen auf das Prägeobjekt aufgebracht werden. Zudem kann nach einem Wechsel des Funktionsmediums die Prägewalze gereinigt werden.

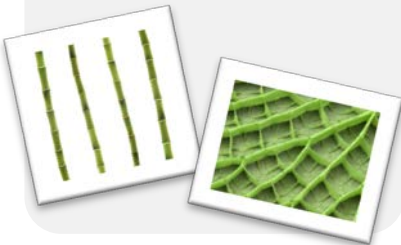
Multifunktions-3D-Druck

Funktionskatalog

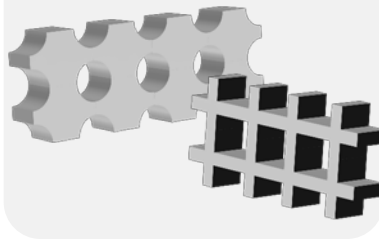
C

Leichtbau

Bionische Struktur



Stabwerksstruktur



Topologieoptimierte Struktur

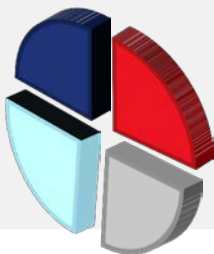


Die Hauptfunktion **Leichtbau** kann in unterschiedlichen Variationen in ein Bauteil integriert werden. Dabei ist es mit der laseradditiven Fertigung möglich, **bionische Strukturen**, z.B. in Anlehnung an einen bambusartigen oder astartigen Aufbau zu realisieren. Ebenso können durch den schichtweisen Aufbau 2-dimensionale und 3-dimensionale **Stabwerksstrukturen** hergestellt werden. Eine **topologieoptimierte Struktur** bietet eine zusätzliche Material- sowie Gewichtseinsparung.

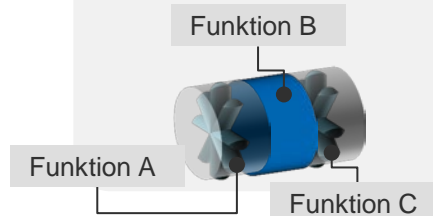
D

Hybrid

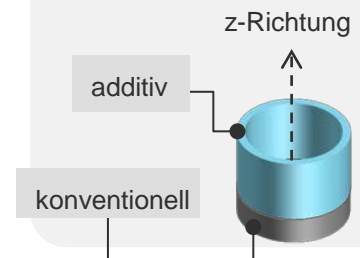
Segmentierung



Funktionsmodularisierung



Hybride Fertigung



Die Hauptfunktion **Hybrid** kann durch eine **Segmentierung**, eine **Funktionsmodularisierung** oder durch eine **hybride Bauteilfertigung** umgesetzt werden. Mit Hilfe der **Segmentierung** ist die Fertigung von Bauteilen möglich, welche die Bauraumgröße überschreiten. Die **Funktionsmodularisierung** bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Einzelfunktionen in Längsachse der Walze zu kombinieren. Mit der **hybriden Fertigung** können Zusatzstrukturen auf ein konventionell gefertigtes Bauteil aufgebaut werden. So können einfache Geometrien konventionell hergestellt und mit komplexen, laseradditiv gefertigten Strukturen kombiniert werden.

Multifunktions-3D-Druck

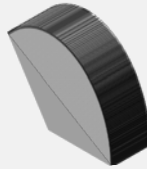
Funktionskatalog

E Oberflächenstruktur/-funktion

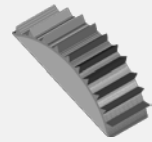
Nanostrukturen
 durch
 Laserstrahlabtragen



Mikrostrukturen
 durch
 Laserstrahlabtragen



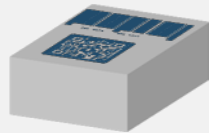
Makrostrukturen
 durch laseradditive
 Fertigung bzw.
 Verfahrenskombination



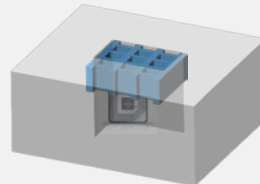
Die Hauptfunktion **Oberflächenstruktur/-funktion** ist nach der Größe der Strukturierung in Nano-, Mikro- und Makrostrukturen zu unterteilen. Mit dem Laserstrahlabtragen können **Nanostrukturen**, z.B. eine Anti-Haft-Oberfläche, und **Mikrostrukturen** auf eine Prägwalze aufgebracht werden. **Makroskopische Strukturen** können auf der Walzenoberfläche mit einer Verfahrenskombination aus abtragender und additiver Lasertechnik realisiert werden.

F Plagiatschutz

QR-/Barcode
 durch
 Laserstrahlabtragen



RFID
 Einbau in einem
 auslesbaren Hohlraum



Für Hauptfunktion **Plagiatschutz** bieten sich durch die Verwendung der laseradditiven Fertigung zwei Ausprägungen. Mittels Laserstrahlabtragen ist es möglich, einen **QR- bzw. Barcode** auf der Oberfläche aufzubringen. Außerdem kann die **RFID**-Technik durch Einbringung eines RFID-Chips in einem auslesbaren Hohlraum zum Plagiatschutz genutzt und durch die laseradditive Fertigung umgesetzt werden.

► Multifunktions-3D-Druck

Einsatzszenarien

Den Teilnehmern wurden im Rahmen des Workshops Light-Design die nachfolgend zusammengefassten, fiktiven Szenarien für einen möglichen Einsatz von Prägewalzen vorgestellt. Zur Auswahl standen zum einen die Papierverarbeitung am Beispiel der Herstellung eines Küchenpapiers und zum anderen das aus der Kunststoffverarbeitung stammende Szenario der Herstellung einer Kunststoffmatte mit Antirutschseigenschaften.

1 Papierverarbeitung - Küchenpapier

Eine Prägewalze zur Herstellung eines mit Werbung versehenen Küchenpapiers ist auszugestalten. Dabei ist das Firmenlogo am Rand des Papiers als Farbdruck und in der Papiermitte als Prägung aufzubringen. Da geprägtes Küchenpapier schlecht von den Prägewalzen zu lösen ist, muss das Prägeobjekt mit Hilfe von Druckluft ausgeworfen werden. Bei der konstruktiven Neugestaltung einer konventionellen Prägewalze ist die Möglichkeit zur Materialeinsparung zu prüfen, da insgesamt nur geringe Kräfte auf die Walze wirken. Außer-

dem ist aufgrund der automatisierten Produktion und der vorhandenen Produktvielfalt eine eindeutige Kennzeichnung auf der Prägewalze aufzubringen.

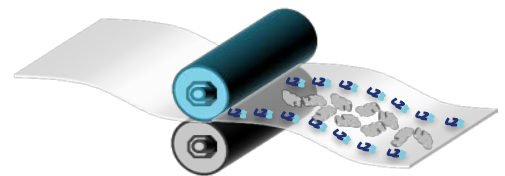


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Prägevorgangs von Küchenpapier

2 Kunststoffverarbeitung - Kunststoffmatte

Zur Herstellung von Kunststoffmatten sollen die Möglichkeiten der Lasertechnik genutzt werden. Ein bereits gewalzter und noch heißer (ca. 100 °C) Kunststoffstrang wird von einer Prägewalze geprägt, um auf diese Weise Antirutschseigenschaften zu realisieren. Dazu darf die Walze den Kunststoffstrang nur geringfügig abkühlen. Zum leichteren Loslösen des Kunststoffstranges von der Walze nach dem Prägevorgang wird diese vor ihrem Kontakt mit dem Strang mit einem Funktionsmedium

benetzt. Bei der konstruktiven Umgestaltung der Walze ist die zum Prägen benötigte Steifigkeit des Werkzeuges, trotz des Versuchs Material einzusparen, beizubehalten.

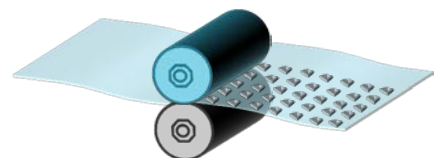


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Prägevorgangs einer Kunststoffmatte

Multifunktions-3D-Druck

Design der Multifunktionswalzen

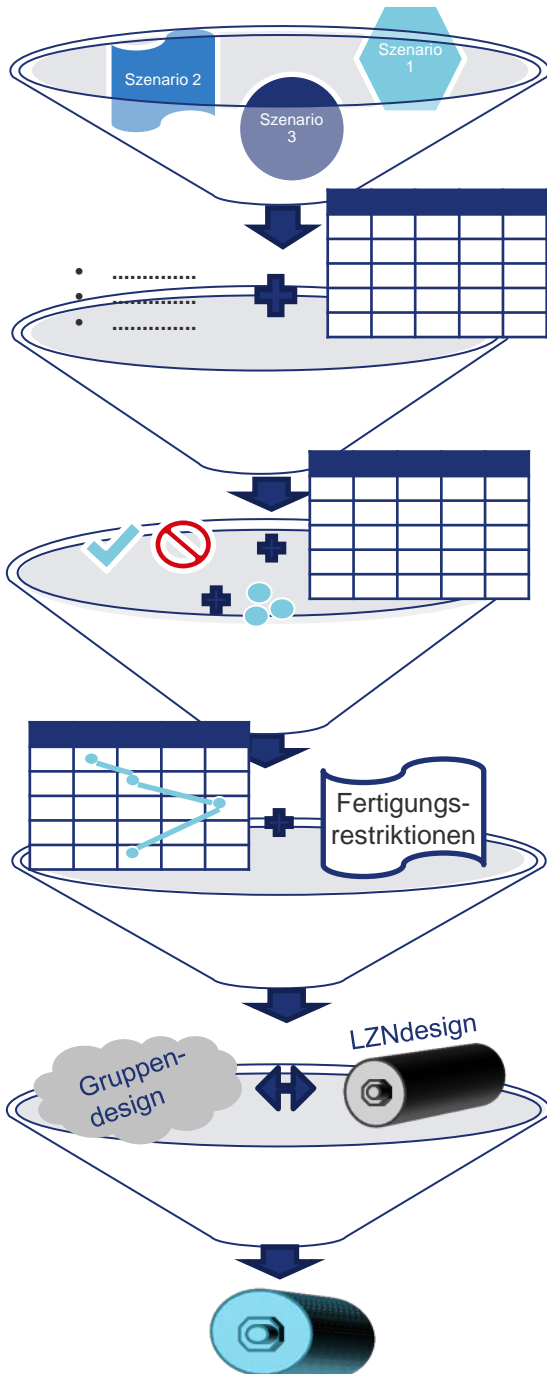


Abbildung 4: Ablaufschema des Workshops

Der zweite Workshop unter dem Titel Light-Design hatte die Ausgestaltung eines Prototypen der Prägewalze entsprechend ihres Einsatzes unter Berücksichtigung der Design-Restriktionen der laseradditiven Fertigung zum Ziel.

Aus den zwei vorgestellten Einsatzszenarien sollten von den Teilnehmern des Workshops in Kleingruppen zunächst die Anforderungen an die Prägewalzen abgeleitet werden. Danach sollten diese Anforderungen den Hauptfunktionen des Funktionskatalogs zugeordnet werden. Ferner waren die Einzelfunktionen zur Erfüllung der Anforderungen auszuwählen und eine erste Walzenidee von den Teilnehmern zu entwickeln und vorzustellen.

Nach Diskussion der Design-Restriktionen der laseradditiven Fertigung wurden die Teilnehmer in Kleingruppen aufgefordert, aus den Einzelfunktionen einen Walzenentwurf zu konstruieren. Das von den Kleingruppen vorgeschlagene Design wurde anschließend mit einem vom der LZN GmbH bereits vorbereiteten Walzenentwurf verglichen und die jeweiligen Vor- und Nachteile wurden diskutiert.

Die Teilnehmer brachten dabei ihre Ideen und Vorstellungen mit großer Initiative ein und stellten zum Ende des Workshops einen finalen Entwurf der Prägewalze für das jeweilige Szenario vor.

Die Ergebnisse des Workshops sind nachfolgend dargestellt:

Multifunktions-3D-Druck

Design der Multifunktionswalzen

Im Rahmen des ersten Einsatzszenarios zur Herstellung eines bedruckten sowie geprägten Küchenpapiers erarbeiteten die Teilnehmer des Workshops Light-Design folgende Anforderungen an die Prägewalze heraus und wählten die nachstehende Einzelfunktionen aus dem Funktionskatalog zur Realisierung dieser Anforderungen aus.

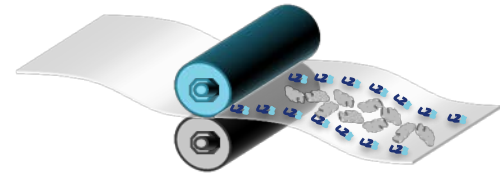


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Prägevorgangs von Küchenpapier



Im Laufe des Workshops brachte die angeregte und lebhafte Diskussion der Teilnehmer viele Ideen und Ansätze für ein Walzendesign hervor. Die Teilnehmer entschieden sich gemäß des Anforderungsprofils für einen dreiteiligen Aufbau der Prägewalze mit der Prägefunktion und kombinierten Druckluftauswurf außen und einem mittigen Farbauftrag (vgl. Abbildung 6).

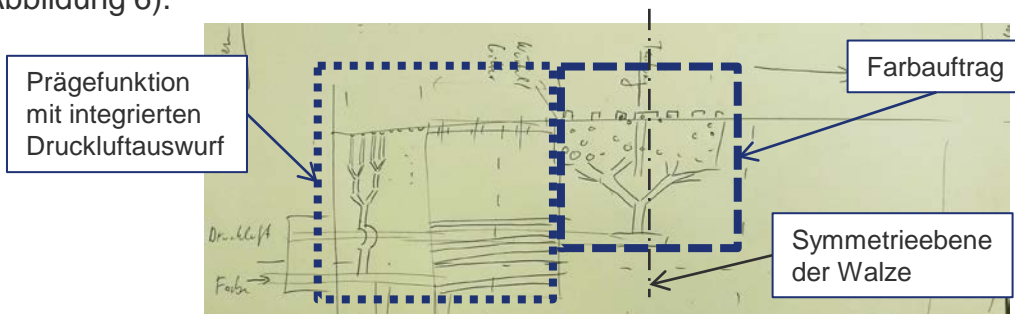


Abbildung 6: Teilnehmerzeichnung des Walzenentwurfs

Multifunktions-3D-Druck

Design der Multifunktionswalzen

Nachdem der Entwurf der LZN GmbH (vgl. Abbildung 7) eingebracht wurde, diskutierten die Teilnehmer die offene Gestaltung des Grundkörpers. Um die Gefahr des Zerreißens des Papiers zu vermeiden, entschieden sie sich gegen eine offene und für eine komplett geschlossene Oberflächentopologie.

Die Ausgestaltung des Druckluftauswurfs durch die LZN GmbH (vgl. Abbildung 8) wurde ebenfalls analysiert. Von den Teilnehmern wurde eine Veränderung hin zu einer schwammartige Struktur mit einer feinen Verästelung vorgeschlagen. Dabei erörterten die Teilnehmer die Möglichkeit, aufgrund der Stabwerksstruktur auf Supportstrukturen verzichten zu können.

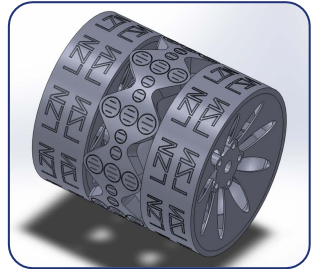


Abbildung 7: Entwurf der LZN GmbH der Papierprägewalze

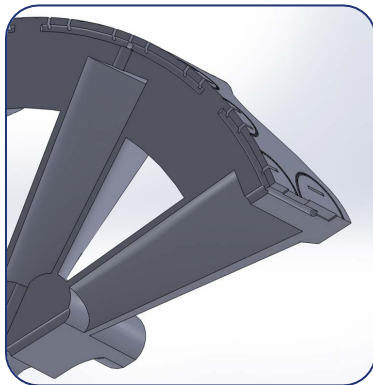


Abbildung 8: Ausgestaltung der Druckluftkanäle der LZN GmbH

Die Teilnehmer des Workshops debattierten auch über die Möglichkeiten der laseradditiven Fertigung beim Farbauftrag und entwickelten eine reliefartige Ausführung des Farbauftrags der LZN GmbH weiter zu einem Farbauftrag über Näpfe aus Düsenpunkten (vgl. Abbildung 9).

Um die Prägewalze eindeutig zuzuordnen, versahen die Teilnehmer ihren Walzenentwurf mit einem durch Laserstrahlabtragen aufgetragenen Barcode (vgl. Abbildung 11).

Die Ideen der Teilnehmer werden im Anschluss an den Workshop von der LZN GmbH unter Berücksichtigung der Restriktionen der laseradditiven Fertigung in einen finalen Prägewalzenentwurf vereint und zur Herstellung ausgestaltet.

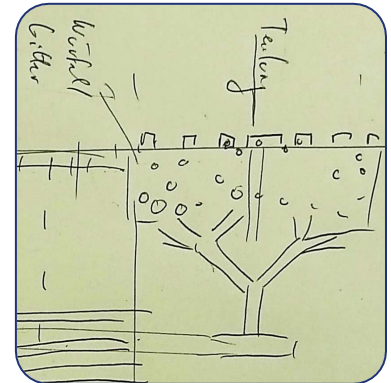


Abbildung 9: Ausgestaltung des Farbauftrags der Teilnehmer

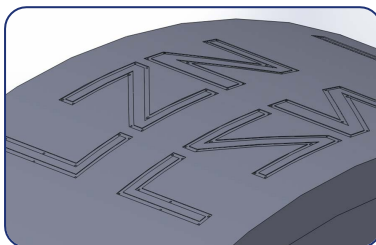


Abbildung 10: Design des Farbauftrags der LZN GmbH

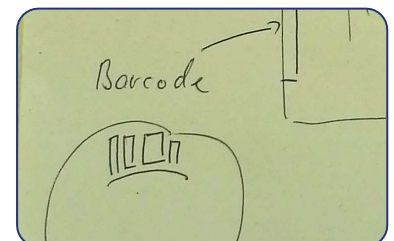


Abbildung 11: Aufbringung des Barcodes

Multifunktions-3D-Druck

Design der Multifunktionswalzen

Die Teilnehmer des Workshops, die sich mit dem zweiten Einsatzszenario einer Kunststoffprägewalze befassen, erarbeiteten gleichfalls die nachfolgenden Anforderungen an ihre Prägewalze und leiteten die daraus resultierenden Funktionen ab.

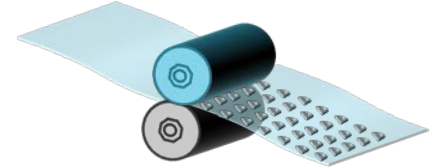


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Prägevorgangs einer Kunststoffmatte



Im Laufe des Workshops Light-Design entwarf die Kleingruppe zur Realisierung des Prägevorgangs einer Kunststoffmatte eine Walze aus den ausgewählten Einzelfunktionen. Auch hier entstand der finale Walzenentwurf durch einen Vergleich der eigenen Lösungsidee mit dem Gestaltungsvorschlag der LZN GmbH.

Der eingebrachte Walzenentwurf der LZN GmbH fand bei den Teilnehmern des Workshops großen Anklang und bot ausreichend Möglichkeit, die eigens erarbeiteten Ideen einzubringen.

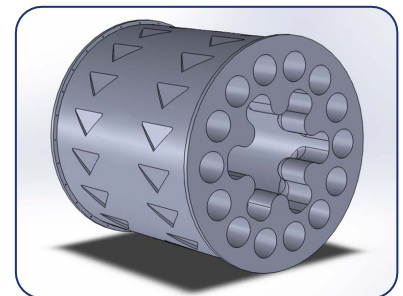


Abbildung 13: Entwurf der LZN GmbH der Kunststoffprägewalze

Multifunktions-3D-Druck

Design der Multifunktionswalzen

Für ihre Prägewalze zur Herstellung einer Kunststoffmatte mit Anti-Rutsch-Eigenschaften entwarfen die Teilnehmer eine Sandwichstruktur mit bionischen Elementen, in die ebenfalls Kanäle zur Temperierung der Prägewalze integriert wurden (vgl. Abbildung 14). Die Prägefunktion wurde mit Nöpfchen in der Oberflächentopologie realisiert. Um das Ablösen des Prägeprodukts zu erleichtern, wurde die Zufuhr eines Trennmediums über ein feines Düsensystem entwickelt.

Die Oberfläche sollte semipermeable Eigenschaften haben, um ein Eindringen von Kunststoffrückständen in die Zufuhrdüsen des Trennmedium zu verhindern.

Die Teilnehmer schlugen zur Material- und Kosteneinsparung vor, das Trennmedium auch als Heizmittel zur Temperierung der Prägewalze zu nutzen.

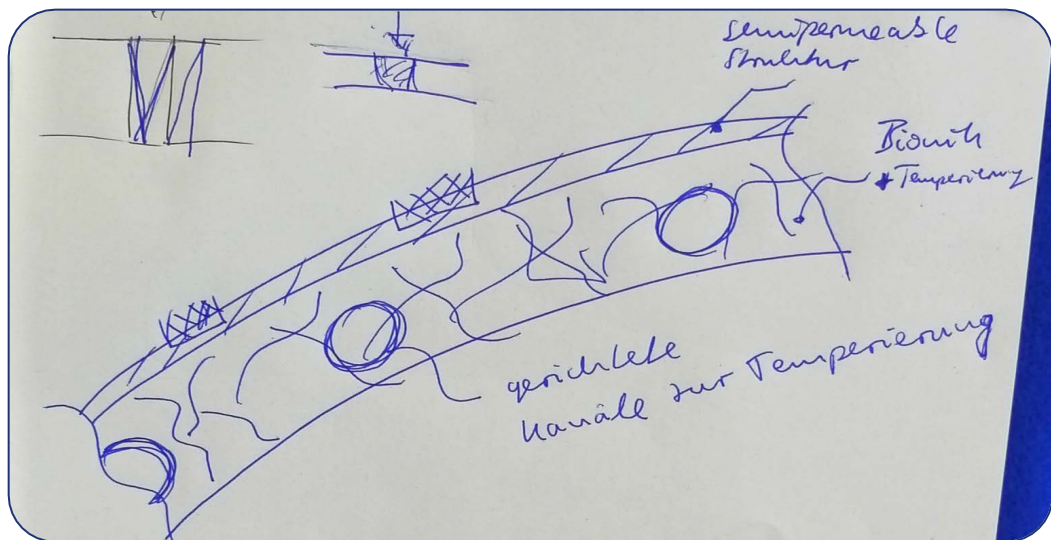


Abbildung 14: Teilnehmerzeichnung der Heizstruktur mit äußerer Prägefunktion

Alle Teilnehmer der beiden Kleingruppen erarbeiteten engagiert und konstruktiv an ihren Walzenentwürfen und lieferten den Mitarbeitern der LZN GmbH viele Anregungen und Ideen für das weitere multifunktionale Design der Prägewalzen und den weiteren Verlauf des Industriearbeitskreises Light Alliance im Workshop Multifunktions-3D-Druck.

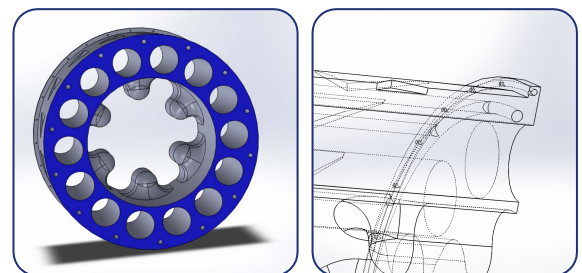


Abbildung 15: Konstruktive Ausgestaltung der Kanäle zur Temperierung der Walze durch die LZN GmbH

Hybrider 3D-Druck

Fortschritt der Demonstrators

Für die Entwicklung des Demonstrators sind die folgenden fünf Entwicklungsstufen vorgesehen:

1. **Functionality**
2. **Design**
3. **Prototyping**
4. **Manufacturing**
5. **Factory**

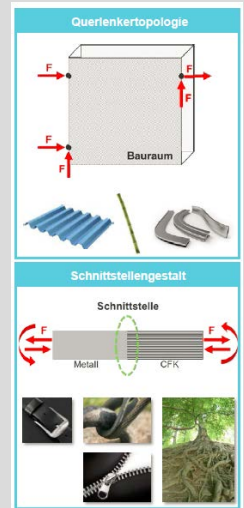
Im Rahmen des ersten Workshops (Step 1) wurden Anforderungen auf Grundlage verschiedener Einsatzfälle für den materialhybriden Querlenker festgelegt. Anschließend wurde eine Lösungssuche durchgeführt, um Lösungsprinzipien für die Gestaltung des Demonstrators zu identifizieren. Durch den Step 1 sind Anforderungen sowie Lösungsprinzipien für die Ausgestaltung der Schnittstelle und Bauteiltopographie bekannt.

Im Rahmen des zweiten Workshops (Step 2) wurde ein Bauteilkonzept definiert, welches nun für den nächsten Step ausgelegt und zunächst als Prototyp realisiert wird. Anschließend folgt die endgültige Ausgestaltung und der Bauteiltest, sowie die Planung einer industriellen Fertigung und Wirtschaftlichkeitsanalyse.



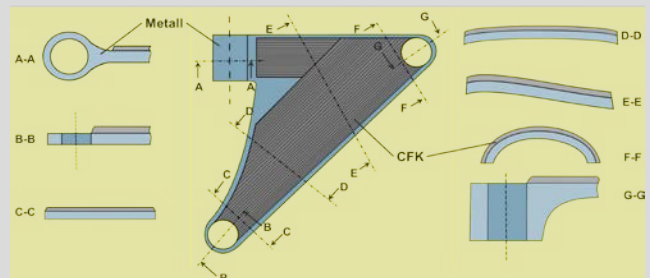
Step 1: Light- Functionality

- Definition von Anforderungen auf Grundlage verschiedener Einsatzfälle
- Lösungssuche und Konzeption der Bauteiltopologie und der Schnittstellengestalt



Step 2: Light-Design

- Konzeption und Bewertung mehrerer Bauteilkonzepte
- Auswahl des zu entwickelnden Konzepts mittels Punktwertmethode



► Hybrider 3D-Druck

Vorgehensweise

Das Ziel des 2. Workshops *Hybrider 3D-Druck* war die Definition eines Gesamtlösungskonzepts für den material-hybriden Querlenker. Dieses Konzept soll als Grundlage für die weitere Entwicklung einer hybriden Schnittstelle als auch für die Ausarbeitung eines Prototyps dienen.

Hierfür wurden die in Workshop 1 gewonnenen Teilkonzepte und Anforderungen an den material-hybriden Querlenker als Ausgangsbasis herangezogen, um mit den Workshop-Teilnehmern verschiedene Gesamtkonzepte zu erarbeiten. Anschließend wurden diese Konzepte von den Workshop-Teilnehmern bewertet und ein Gesamtkonzept für das weitere Vorgehen definiert.

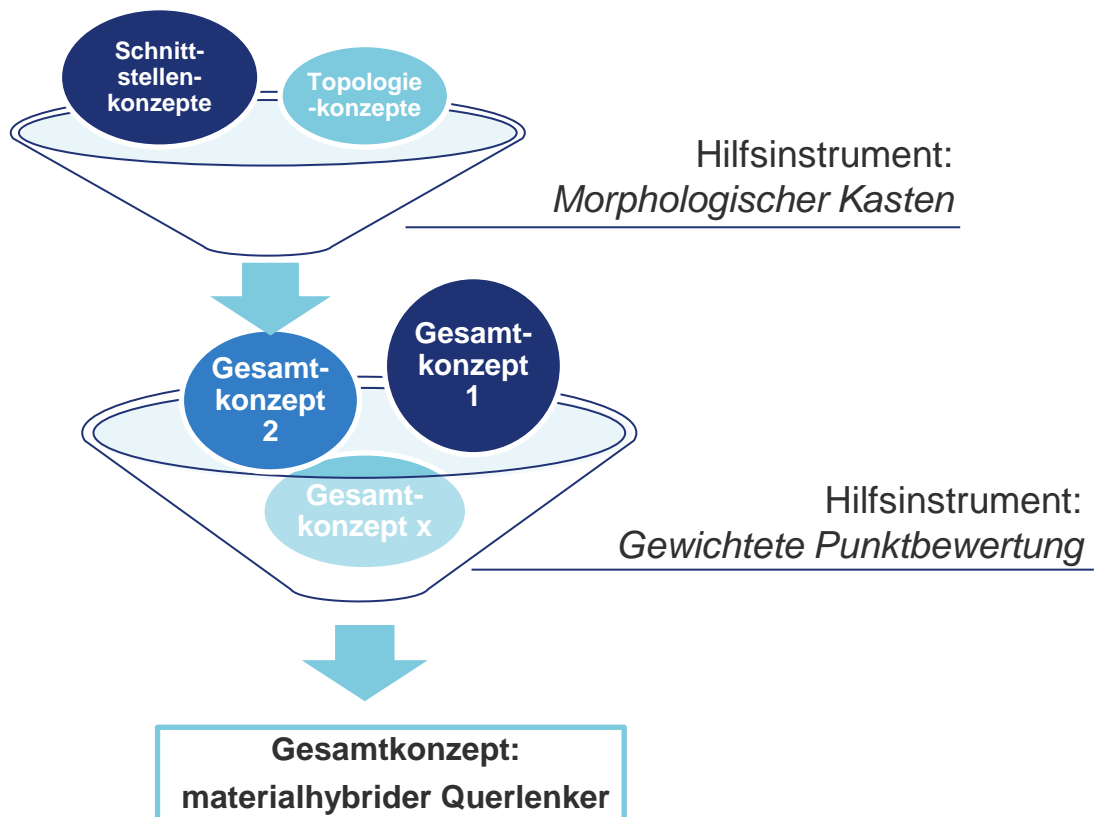


Abbildung 16: Ablaufschema des Workshops *Hybrider 3D-Druck*

Hybrider 3D-Druck

Vorgehensweise

Für die Entwicklung der Gesamtkonzepte wurde den Workshop-Teilnehmern ein morphologischer Kasten (s. Abbildung 17) mit den in Workshop 1 erarbeiteten Teilkonzepten zur Verfügung gestellt. Hierfür wurden die entwickelten Konzepte aufbereitet und in Kategorien gegliedert. Die ursprüngliche Gliederung in Schnittstellenkonzepte und Bauteil-Topologie wurde aufgrund der vielen Ideen der Workshop-Teilnehmer im Bereich der Bauteil-Topologie in die folgenden Kategorien unterteilt: Gesamttopologie, Materialtopographie und Bauteilquerschnitt.

Durch Kombination der einzelnen Teillösungen jeder Kategorie können mehrere Gesamtlösungskonzepte erarbeitet werden.

MORPHOLOGISCHER KASTEN								
Bauteil-Topologie	Topologie	Fachwerk Faserkunststoffverbund 	Ast-Artig FKV, flächig Metallöse 	Flächig Faserkunststoffverbund Metallöse 				
	Material-Topographie	Material-separation FKV, flächig Metallöse 	Materialkombination 					
	Bauteilquerschnitt	geschlossen				offen		
		Rohrstruktur 	Knochenstruktur LAM-Struktur 	Grashalmstruktur Faserkunststoffverbund LAM-Metalstruktur 	Gitterstruktur Faserkunststoffverbund LAM-Fachwerkstruktur 	klassische Profile 	Knochenstruktur LAM-Struktur 	Wabenstruktur Faserkunststoffverbund LAM-Wabenstruktur
Schnittstellenkonzepte	Schlaufe Faserkunststoffverbund Metall Metall Klemmstift, verschraubt Faserkunststoffverbund 	Pins Faserkunststoffverbund Metall Faserkunststoffverbund Metall 	Klebung Metall Klebung Faserkunststoffverbund Metall Faserkunststoffverbund 	Bolzen Metall Faserkunststoffverbund Seerosenplatte Hülse Mutter Faserkunststoffverbundplatte 	Klemmung Metall Faserkunststoffverbund Metall Faserkunststoffverbund Metallprofilen 			

Abbildung 17: Morphologischer Kasten zur Gesamt-Lösungsfindung

Hybrider 3D-Druck

Vorgehensweise

Eine häufig angewendete Methode, um aus mehreren Lösungskonzepten ein finales auszuwählen, ist die gewichtete Punktbewertung. Bei dieser Methode werden zunächst Bewertungskriterien aufgestellt, anhand derer die unterschiedlichen Konzepte bewertet werden sollen. Anschließend wird jedes dieser Kriterien, gegen die anderen bewertet und als „wichtiger“ (1 Punkt) bzw. „unwichtiger“ (0 Punkte) eingestuft. Durch Addition der Punkte ergibt sich eine „Wertigkeit“ für jedes Kriterium, anhand derer eine Gewichtung festgelegt werden kann (vgl. Abbildung 18).

Für alle Lösungskonzepte wird anschließend eine Erfüllung (E) für jedes Bewertungskriterium festgelegt. Je nach Erfüllung können Werte zwischen 10 Pkt. (volle Erfüllung) bzw. 0 Punkte (keine Erfüllung) festgelegt werden.

Durch Multiplikation der Erfüllungsgrade (E) mit der jeweiligen Gewichtung der Kriterien (G), sowie Addition dieser Produkte für alle Kriterien ($\sum G \cdot E$), ergibt sich eine Wertigkeit (W) für alle Lösungskonzepte. Das Lösungskonzept mit der höchsten Wertigkeit wird anschließend für die weitere Ausarbeitung ausgewählt.

	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	...
K1		1	1	0
K2	0		0	0
K3	0	1		1
...	1	1	0	
Σ	1	3	1	1
Gewichtung	0,17	0,6	0,17	0,17

Abbildung 18: Beispiel einer Bewertungsmatrix

Kriterien	Gewichtung G_i	Erfüllungsgrade E_i (0...10)			
		Gesamt-Konzept1	Gesamt-Konzept 2	Gesamt-Konzept 3	Gesamt-Konzept 4
1. Leichtbaupotential	0,25	27	13	27	17
2. Kriterium 2	0,25	15	24	9	17
3. Kriterium 3	0,05	3	11	6	3
4. Kriterium 4	0,2	27	15	17	15
5. ...	0,15	11	27	15	21
6. ...	0,1	6	24	6	22
0...10 = $\Sigma G_i \cdot E_i$		18,30	19,25	15,55	17,00
Wertigkeit $W_T = \frac{\Sigma G_i \cdot E_i}{10}$		1,83	1,93	1,56	1,70

Abbildung 19: Beispiel-Matrix zur Ermittlung der Erfüllungsgrade

Hybrider 3D-Druck

Lösungspfade im morphologischen Kasten

Mit Hilfe des erarbeiteten morphologischen Kastens wurden vier Lösungspfade für ein Designkonzept identifiziert und Gesamtlösungskonzepte des hybriden Querlenkers abgeleitet. Lösungspfad 1 und 2 wurden im Vorfeld durch die LZN GmbH definiert und in Lösungskonzepte überführt. Die Lösungspfade 3 und 4 wurden im Rahmen des Workshops durch die Teilnehmer ausgearbeitet. In Abbildung 20 sind die Lösungspfade der unterschiedlichen Designkonzepte im morphologischen Kasten dargestellt.

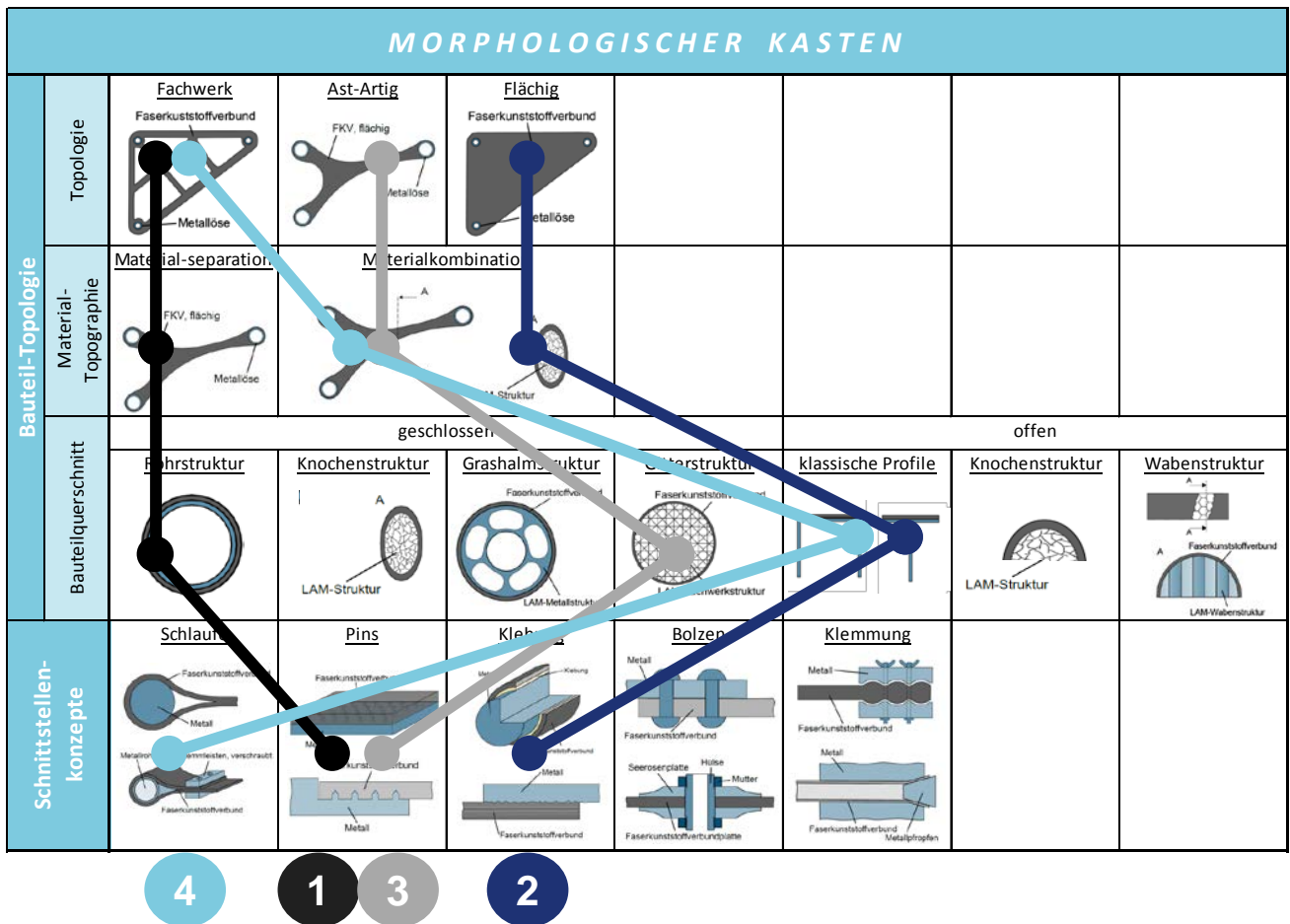


Abbildung 20: Morphologischer Kasten mit Lösungspfaden für die vier Gesamt-Lösungskonzepte

Die aus dem morphologischen Kasten abgeleiteten Gesamtlösungskonzepte sind mit ihren Vor- und Nachteilen auf den folgenden Seiten detailliert beschrieben.

Hybrider 3D-Druck

Gesamtlösungskonzepte

Lösungskonzept 1: Pins

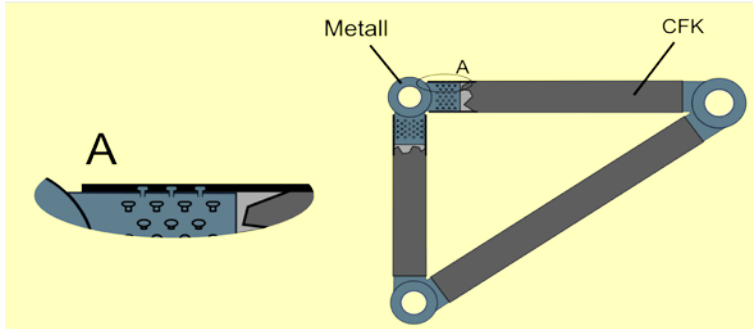


Abbildung 21: Skizze des Lösungskonzeptes 1

Lösungskonzept 1 basiert auf einer Fachwerkstruktur, bei der die externe Krafteinleitung durch metallische Anschläge und die interne Kraftleitung über CFK-Rohre realisiert wird. Zur verbesserten Kraftübertragung zwischen Metall und CFK werden die Schnittstellen mit Pins ausgestaltet, um einen Formschluss zu realisieren.

Vorteile:

- konsequenter Leichtbau
- lastgerechte Faserorientierung
- hohe Schnittstellenfestigkeit am Materialübergang

Nachteile:

- hoher Fertigungsaufwand (CFK)
- Rohrkern erforderlich (CFK)
- Pins an 360° Umfang erfordert aufwendige Fertigungspositionierung

Lösungskonzept 2: Klebung

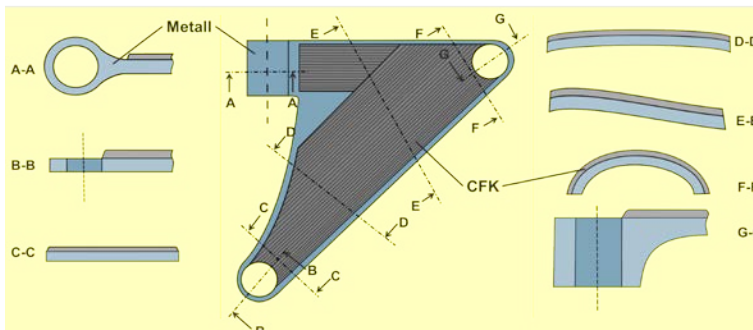


Abbildung 22: Skizze des Lösungskonzeptes 2

Beim Lösungskonzept 2 dient ein flächiger Metallkörper als kraftleitende Struktur und Fertigungsform. Lokal wird die Metallkomponente in Lastrichtung mit Fasergelegen verstärkt. Eine erhöhte Steifigkeit und optimierte Struktur wird durch lokale Geometrieangepassung und variable Gelegedicke erzielt.

Vorteile:

- lastgerechte Faserorientierung
- unkompliziertes Drapieren der Fasern
- Fügen und Infusion simultan
- Komplexität nur im 3D-Druck Bauteil

Nachteile:

- kein konsequenter Leichtbau
- kein optimaler Kraftfluss an den Gelenken

Hybrider 3D-Druck

Gesamtlösungskonzepte

Lösungskonzept 3: Ast-Gitter-Pins

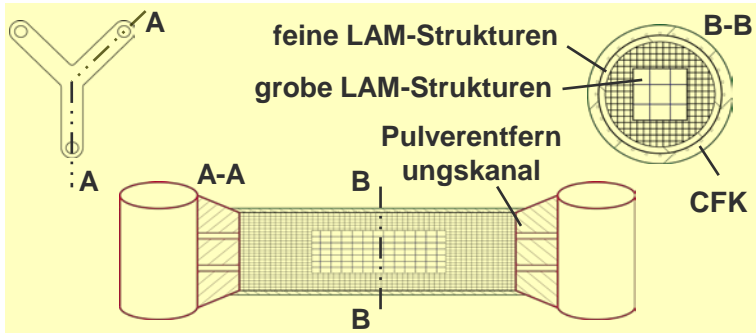


Abbildung 23: Skizze des Lösungskonzeptes 3

Die Kräfteinleitungspunkte sowie die astartige Grundstruktur des Lösungskonzeptes 3 bestehen aus einer metallischen Struktur. Die einzelnen Äste sind hohl gestaltet, wobei sie im Inneren durch eine Gitterstruktur und außen durch Fasergelege verstärkt sind. Wie in Designkonzept 1 wird die Schnittstelle Metall-CFK mit formschlüssigen Pins gestaltet.

Vorteile:

- konsequenter Leichtbau
- lastgerechte Faserorientierung
- Zug-/Druckkräfte und Biegung übertragbar

- großflächige Kontaktierung
- keine Faserschädigung

Nachteile:

- Fertigung mit Vakuuminfusion schwierig

Lösungskonzept 4: Gestützte Schlaufe

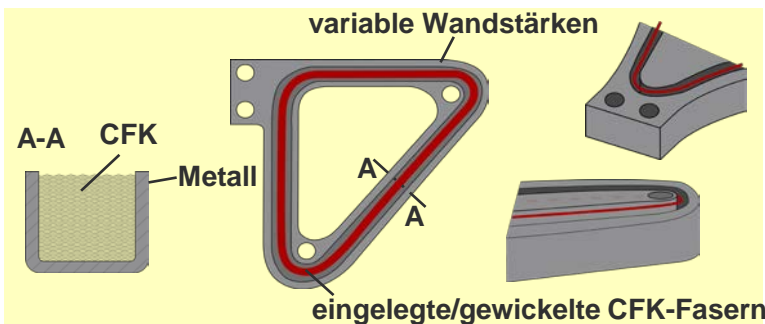


Abbildung 24: Skizze des Lösungskonzeptes 4

Im Lösungskonzept 4 wird die kraftleitende CFK-Schlaufe durch einen Metallrahmen zur Aufnahme von Zug- und Druckkräften gestützt. Der Metallrahmen fungiert zusätzlich als Form im Fertigungsprozess.

Vorteile:

- keine Fügstellen
- Metallrahmen dient als Fertigungsform
- CFK Fasern werden durch Metallrahmen geschützt

Nachteile:

- Metallrahmen erfordert große Fertigungsdimensionen im 3D-Druck

Hybrider 3D-Druck

Bewertung der Konzepte nach Kriterien

Die unterschiedlichen Lösungskonzepte wurden nach 6 Kriterien bewertet, auf die sich die Teilnehmer des Workshops abgestimmt haben. Diese orientieren sich an den Anforderungen, die im ersten Workshop für das Szenario Supersportwagen (1000 Stk./Jahr) definiert wurden.

Die Bewertungskriterien teilen sich in die Bereiche Funktion und Aufwand auf:

Funktion

1. Leichtbaupotential (werkstoffgerechte Belastungssituation, Gewicht)
2. Möglichkeit der Schadensdetektion (Fertigung & Betrieb)
3. Reparaturmöglichkeit (Lösbarkeit der Verbindung)

Aufwand

4. Fertigungsaufwand LAM (ges. Volumen, Bauhöhe, Support-Bedarf)
5. Fertigungsaufwand CFK (Halbzeug-Handling, Werkzeug & Form, Infusion)
6. Automatisierbarkeit der Herstellung



- Supersportwagen
- Stückzahl: 1.000 pro Jahr

Um den Kriterien eine unterschiedliche Gewichtung zu geben, werden diese in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt. Das jeweils wichtigere Kriterium wird mit 1 bewertet, das unwichtigere mit 0. Die Summe der Punkte wird prozentual umgerechnet, wodurch sich die Gewichtung G der Bewertungskriterien ergibt.

Gewichtung der Kriterien über Bewertungsmatrix

	1	2	3	4	5	6	Σ	G
Leichtbaupotential 1	1	0	0	0	0	0	1	0,25
Möglichkeit der Schadensdetektion 2	0	1	0	0	0	0	1	0,25
Reparaturmöglichkeit 3	0	0	1	0	0	0	1	0,05
Fertigungsaufwand LAM 4	0	0	0	1	0	0	1	0,2
Fertigungsaufwand CFK 5	0	0	0	0	1	0	1	0,15
Automatisierbarkeit der Herstellung 6	0	0	0	0	0	1	1	0,1

Abbildung 25: Bewertungsmatrix der Bewertungskriterien für die gewichtete Punktbewertung

► Hybrider 3D-Druck

Bewertung der Kriterien gemäß Punkteskala

Die Bewertung der einzelnen Konzepte wird mittels einer Punkteskala gemäß VDI 2225 vorgenommen. 0 Punkte entsprechen einer ungenügenden Erfüllung des Kriteriums, 10 Punkte einer idealen Erfüllung. Die Erfüllungsgrade werden mit der Gewichtung multipliziert und aufsummiert.

Punkteskala nach VDI 2225

Erfüllungsgrad E_i	Definition
10	ideal
7	gut
5	durchschnittlich
3	schlecht
0	ungenügend

Ergebnis der Bewertung

Das Ergebnis der Bewertung zeigt, dass sich das Konzept *Klebung* gegenüber den anderen 3 Konzepten durchsetzen konnte.

Kriterien	Gewichtung G_i	Erfüllungsgrade E_i (0...10)			
		Pins	Klebung	Ast-Gitter-Pins	Gestützte Schlaufe
1. Leichtbaupotential	0,25	27	13	27	17
2. Möglichkeit der Schadensdetektion	0,25	15	24	9	17
3. Reparaturmöglichkeit	0,05	3	11	6	3
4. Fertigungsaufwand LAM	0,2	27	15	17	15
5. Fertigungsaufwand CFK	0,15	11	27	15	21
6. Automatisierbarkeit der Herstellung	0,1	6	24	6	22
0...10 = $\Sigma G_i \cdot E_i$		18,30	19,25	15,55	17,00
Wertigkeit $W_T = \frac{\Sigma G_i \cdot E_i}{10}$		1,83	1,93	1,56	1,70

Abbildung 26: Gewichtete Punktbewertung für die vier Gesamt-Lösungskonzepte

Hybrider 3D-Druck

Ergebnisse des Workshops sowie nächste Schritte

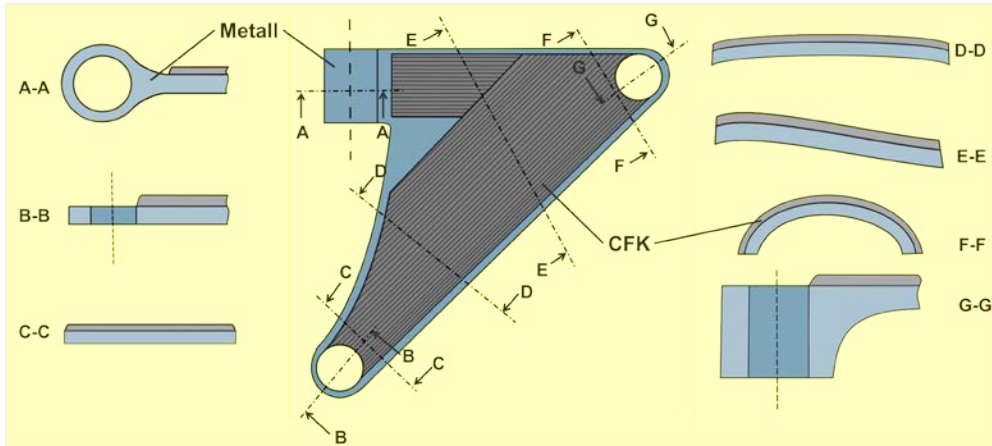


Abbildung 27:
 Schematische Darstellung des ausgewählten Konzeptes für den hybriden Querlenker

Mit Hilfe der gewichteten Punktbewertung, wurde das Konzept 2 *Klebung* ausgewählt, da es insgesamt die beste Bewertung durch die Workshop-Teilnehmer erhielt. Besonders positiv bewertet wurde der geringe Herstellungsaufwand sowie die vergleichsweise einfachen Schadensdetektion. Auf Grundlage des ausgewählten Konzeptes, wird bis zum nächsten Workshop ein Entwurf des materialhybriden Querlenkers ausgearbeitet sowie ein Prototyp gefertigt.

Als Grundlage für den Entwurf des Querlenkers dient eine Topologieoptimierung, welche es ermöglicht, Lastpfade zu identifizieren und eine optimierte Gestalt für den Querlenker auszuarbeiten. Entscheidend wird es sein, die Bereiche des Querlenkers zu identifizieren, bei denen durch die Materialhybrid-Bauweise besonders viel Gewicht eingespart werden kann.

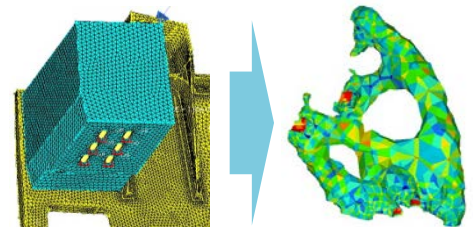


Abbildung 28: Ergebnisgeometrie einer Topologieoptimierung

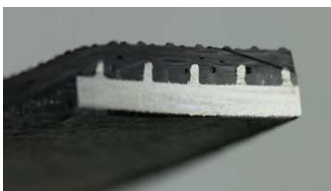


Abbildung 29:
 Material-hybride Struktur

Um das Leichtbaupotential optimal auszunutzen, ist es zusätzlich wichtig eine hochbelastbare Verbindung zwischen dem metallischen Grundkörper und dem CFK zu realisieren. Zu diesem Zweck wird untersucht, wie durch unterschiedliche Strukturierungen der Oberfläche des metallischen Grundkörpers die Festigkeit der Klebeverbindung maximiert werden kann.

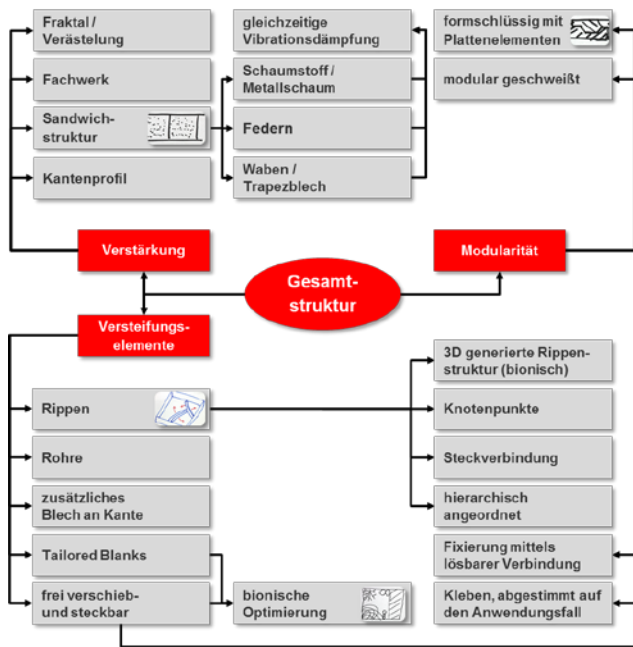
Die zu ermittelnden mechanischen Kennwerte werden für die spätere Auslegung des materialhybriden Querlenkers genutzt.

3D-Blechleichtbau

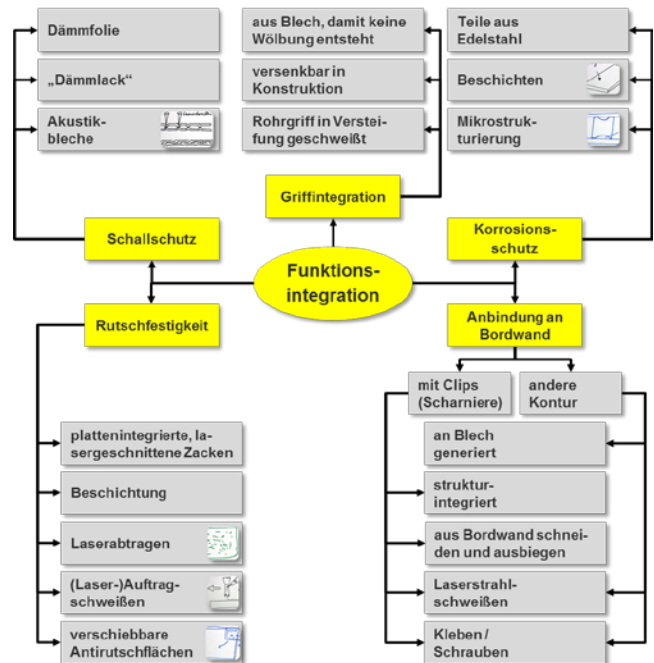
Strukturierung der Lösungsideen

Das Ergebnis des ersten Workshops im Januar 2014 war eine Vielzahl an Lösungsideen der Teilnehmer zu den verschiedenen Funktions- und Gestaltanforderungen der Gesamtbaugruppe. Diese sind in der folgenden Abbildung beispielhaft für die Funktionsintegration und die Gesamtbaugruppenstruktur gegliedert.

Gesamtstrukturlösungsbaum:



Funktionslösungsbaum:



Um daraus Konstruktionskonzepte ableiten zu können, wurden diese Lösungsideen in einem Morphologischen Kasten (vgl. Abbildung auf der folgenden Seite) aufbereitet. Dieser gliedert sich horizontal nach den einzelnen Teilfunktionen der Baugruppe sowie vertikal nach den unterschiedlichen, dazugehörigen Lösungsvarianten. Aus diesem Morphologischen Kasten können nun die drei Bauteilkonzepte abgeleitet werden, indem für jede Einzelfunktion eine geeignete Einzellösung ausgewählt wird und diese zu einem Gesamtbaugruppenkonzept kombiniert wird. Dies ist mit den drei farbigen Verbindungslinien in der folgenden Darstellung für die anschließend beschriebenen Bauteilkonzepte dargestellt.

3D-Blechleichtbau

Ableitung der drei Lösungskonzepte aus Morphologischem Kasten

	Struktur				Funktionen			
	Gesamtstruktur	Aufbau / Versteifung	Anbindung	Lasteinleitung	Rutschfest	Kantenschutz / Stoßfest	Korrosionsschutz / Spaltschluss	Schallschutz
Variante 1	<p>Sandwich</p>	<p>Regelmäßig: - Waben - Schaum</p>	<p>externe Scharniere (Standard): - geschraubt - verschweißt - gelötet - Formschluss</p>	<p>überlappende Strukturelemente</p>	<p>Punktuell Laserabtragen</p>	<p>Kanten Bördeln</p>	<p>Beschichten</p>	<p>Druck</p>
Variante 2	<p>Platte Verstärkung</p>	<p>Streben: - Mittel-Struktur mit 90° Knotenpunkt - verknüpft über Hülse / Generierte Knoten</p>	<p>in Bauteil geschnittene Aufnahme</p>	<p>Aufnahme in Hülse die ohnehin als Kantenabstreifer (Laserschweiß) Struktur vorhanden sind</p>	<p>Zusätzliches Schutzprofil</p>	<p>Edelstahl</p>	<p>Dämmfolie</p>	
Variante 3	<p>gefügte Strukturbleche</p>	<p>Wellblech (Last passt)</p>	<p>Angewinkelte / Auftrages verschweißte Anbindungspunkte</p>	<p>Beschichtung</p>	<p>Gummaufsatz</p>	<p>Akustikbleche</p>		
Variante 4	<p>gekannte Regelmäßige Struktur</p>	<p>Rohr / Rahmen</p>	<p>Aus Struktur herausgekannte Anbindungselemente</p>	<p>lokale Beschichtung</p>	<p>Beschichtung</p>	<p>Dämpfende Stege</p>		
Variante 5		<p>Sicken</p>	<p>Als Kern verwendete Rohre zur Anbindung</p>	<p>Gekantete Oberfläche mit Trittschall dämmung</p>	<p>Austauschbarkeit realisieren</p>			

Konzepte:



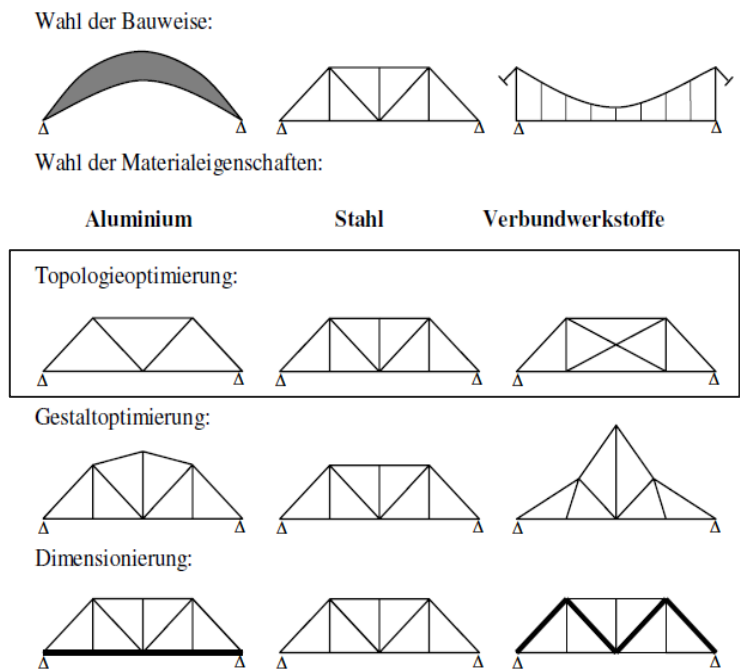
3D-Blechleichtbau

Grundlagen der Topologieoptimierung

Nicht allein die intuitive Lösungsfindung der beteiligten Workshop-Teilnehmer und LZN-Mitarbeiter (vgl. Morphologischer Kasten / Ergebnisse Workshop 1) soll Grundlage der Bauteilauslegung sein, sondern auch eine systematische Topologieoptimierung, die numerisch gestützt zu einer optimalen Leichtbaustruktur führt. Dieses Instrument bietet auf Basis der auftretenden Lasten einen Vorschlag für eine geometrisch optimale Bauteilgestalt.

Einordnung der Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung ist neben der Gestaltoptimierung und der Dimensionieren ein Verfahren der Strukturoptimierung, das zur systematischen Findung einer optimalen Leichtbaustruktur beiträgt. Sie steht am Anfang des Konstruktionsprozesses und hilft dem Konstrukteur die optimale Bauteilgestalt auch bei komplexen Last- und Bauraumsituationen zu finden, bei denen eine intuitive Lösungsfindung auch mit viel Erfahrung nicht mehr möglich ist. Die Ausgangsbasis hierfür ist allein die Kenntnis der Last- und der Einbausituation sowie der Eigenschaften des gewählten Materials. Als Ergebnis erhält man unter den definierten Randbedingungen einen Vorschlag für die optimale Bauteilgestalt, die dann vom Konstrukteur zu einer fertigungsgerechten Konstruktion überführt werden muss und ggf. noch mittels Gestaltoptimierung oder Dimensionierung verfeinert werden kann, um Lastspitzen zu minimieren. Die Topologieoptimierung wird genutzt, um den iterativen und intuitiven Prozess aus Erstdesign, Nachweisrechnung, iterativer Bauteiloptimierung etc. zu verkürzen und von Beginn an mit einem systematischen Vorgehen und Bauteildesign zu starten.

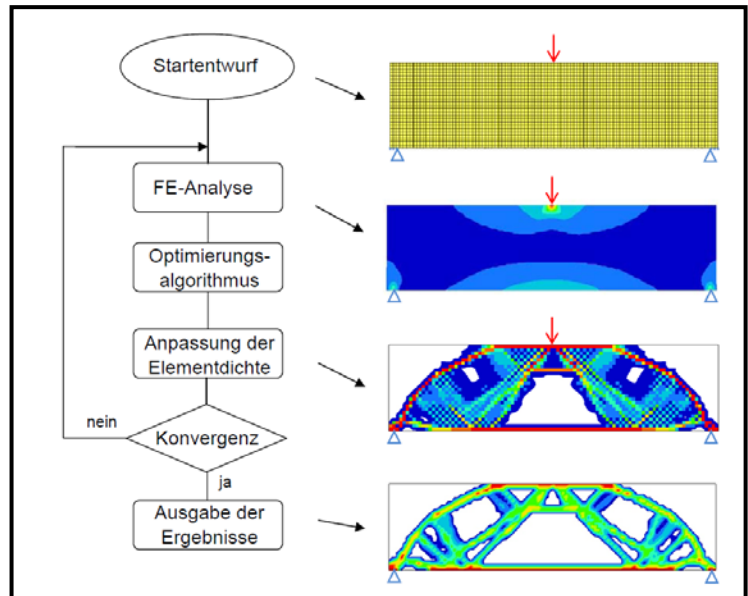


Quelle: Schumacher

3D-Blechleichtbau

Grundlagen der Topologieoptimierung – Ablauf

Ausgangspunkt der Topologieoptimierung ist eine CAD-Modellierung des Bauraumes, also des maximal zur Verfügung stehenden Platzes bis zu den angrenzenden Nachbarteilen. Dieser wird mit finiten Elementen vernetzt und in dem entstehenden FE-Modell die äußeren Kräfte und Auflager definiert. Für diesen sogenannten Startentwurf wird eine erste Spannungsberechnung durchgeführt und dabei die Elemente identifiziert, die einen geringen Anteil an der Lastübertragung haben. Diese werden über eine Hilfsvariable, die fiktive Elementdichte geschwächt und die hochbelasteten Elemente gestärkt. In einem iterativen Prozess aus Spannungsberechnung und Elementdichteanpassungen nähert sich die numerische Simulation sukzessive der optimalen Bauteilgestalt an, bei der nur noch Elemente mit hoher fiktiver Dichte und somit hochbelastete Elemente vertreten sind.



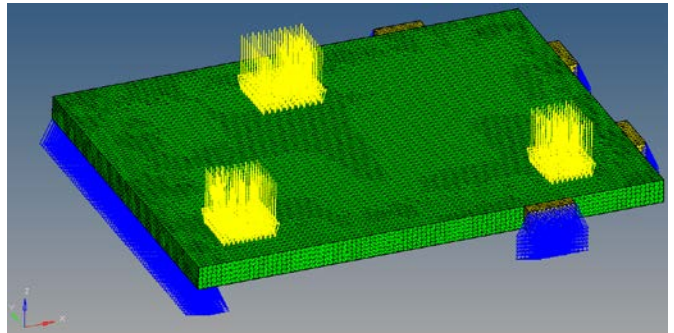
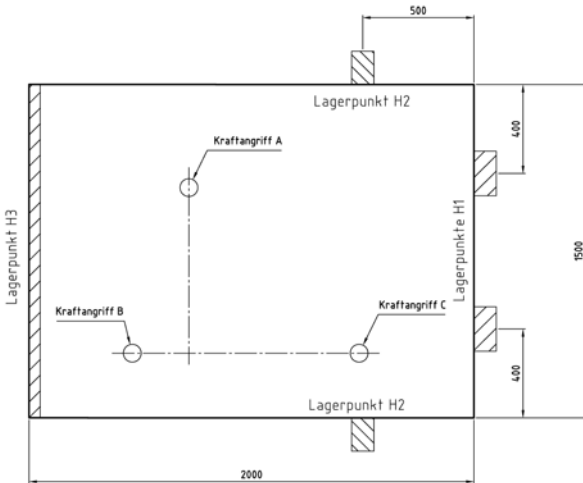
In Anlehnung an Bendsøe

Topologieoptimierung der Bodengruppe – Modellaufbau

Zu Beginn der Optimierung steht zunächst eine Betrachtung des physischen Modells. Auf Basis der Anforderungsdefinition aus dem ersten Workshop wurde das auf der folgenden Seite links dargestellte Modell mit seinen Lasten definiert. Es besteht in Anlehnung an eine Ladebordwand eines LKW aus einer flachen Grundstruktur mit den Abmaßen von 2 m x 1,5 m x 0,1 m, zwei Anbindungspunkten mit rotatorischem Freiheitsgrad an der Stirnseite, zwei seitlichen Lagerpunkten, die die spätere Betätigung per Hubzylinder darstellen sowie einer linienförmigen Auflage an der gegenüberliegenden Stirnseite. Hinzu kommen drei asymmetrisch angeordnete Punktlasten mit 0,5 t, 1 t und 1,5 t Last, die gemäß Workshop eine mögliche reale Lastsituation darstellen. Die Überführung des Modells in den Startentwurf der Topologieoptimierung ist in der rechten Abbildung dargestellt.

3D-Blechleichtbau

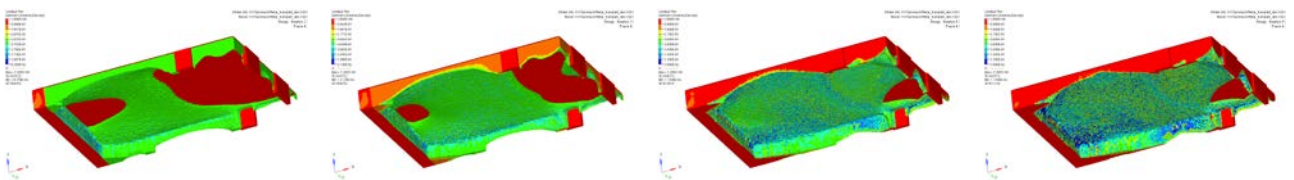
Grundlagen der Topologieoptimierung – Definition der Zielgrößen



Nach dem geometrischen Aufbau des Modells und der Implementierung der Auflager sowie der Lasten werden nun die Randbedingungen der Optimierung definiert. Hierfür werden zunächst getrennte Lastfälle definiert: 1. mit allen Auflagern inkl. Linienauflage an der Stirnseite, was den Lastfall bei der Beladung des LKW mit aufliegender Bordwand symbolisiert. 2. ohne Linienauflage, was für den Lastfall steht, wenn die Bordwand mit Last gehoben wird und keinen Kontakt mehr zur Straße hat. Dies ist der kritische Lastfall und wird somit in der folgenden gemeinsamen Betrachtung mit 80:20 gewichtet gegenüber dem ersten Lastfall angenommen.

Als Zielgröße der Optimierung wird eine maximale Bauteilsteifigkeit bei einer Reduktion des Volumens auf 15 % des Ursprungsvolumens definiert. Da eine Blechstruktur angestrebt wird, ist eine weitere Randbedingung der Optimierung, dass nur Strukturen mit einer Stärke von 5 mm bis 10 mm Stärke entstehen dürfen. Weiterhin ist die Oberfläche als sogenannter Non-Design-Bereich definiert, was bedeutet, dass hier keine Elemente entfernt werden dürfen, da dieser Bereich später die Deckfläche der Ladebordwand darstellt, die zwingend als durchgehende Fläche notwendig ist.

Topologieoptimierung der Bodengruppe – Iterative Annäherung



Grundlagen der Topologieoptimierung – Optimierungsergebnis

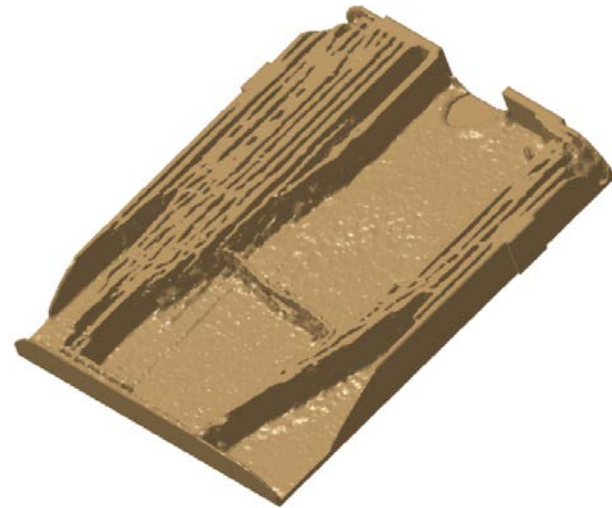
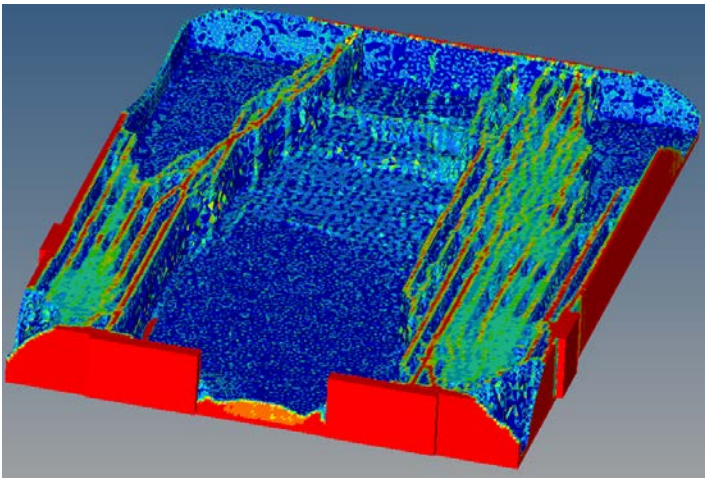


Abbildung 30: Optimierungsergebnis: mit Elementdichte (links) / geglättet (rechts)

Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist in den oberen Abbildungen dargestellt. Man erkennt, dass die Deckplatte und auch die seitlichen Abschlüsse, wie definiert, erhalten bleiben und sich Streben zwischen den Lasteinleitungspunkten und den Auflagern ausbilden, um die Kräfte abzuleiten. Auf der Seite der zwei Lasteinleitungspunkte ist entsprechend der höheren aufgeprägten Kräfte eine Materialanhäufung erkennbar. Ebenfalls bildet sich zu den Längsstreben eine markante Querstrebe aus, die zwischen den vorderen Lasteinleitungspunkten eine Versteifung herstellt.

Ableitung der Bauteilkonzepte

Die Ergebnisse der Topologieoptimierung und der Lösungsfindung wurden in den Baugruppenkonzepten 1 & 2 zusammengeführt. Die Baugruppe 1 ist sehr nah an das Optimierungsergebnis angelehnt und übernimmt gemäß Morphologischem Kasten die vorgegebene Struktur in einer Sandwichbauweise mit versteifenden Blechstreben dazwischen. Die Baugruppe 2 verfolgt den Grundansatz ein Deckblech mit angepassten, gebogenen Blechstreben zu versteifen. Auch hier wird der Verlauf der Versteifungen in Anlehnung an das Topologieoptimierungsergebnis ausgeführt. Den beiden strukturoptimierten Lösungskonzepten wird das Konzept 3 gegenübergestellt. Dieses zeichnet sich durch eine regelmäßige Struktur aus, die nicht an den konkreten Lastfall angepasst ist, sondern Flexibilität und einfache Skalierbarkeit ermöglicht. Die detaillierte Darstellung der drei Konzepte ist auf den nächsten Folien dargestellt.

3D-Blechleichtbau

Technische Merkmale

Struktur:

- Sandwichstruktur mit Ober- und Unterblech
- lastangepasste Blech-Streben-Versteifung gemäß Topologieoptimierung
- lastangepasste Knoten- und Anbindungspunkte durch Lasergenerieren

Funktionserfüllung:

- Rutschschutz durch Lasernoppen
- Korrosionsschutz mittels Beschichtung

Herstellungsprozesse:

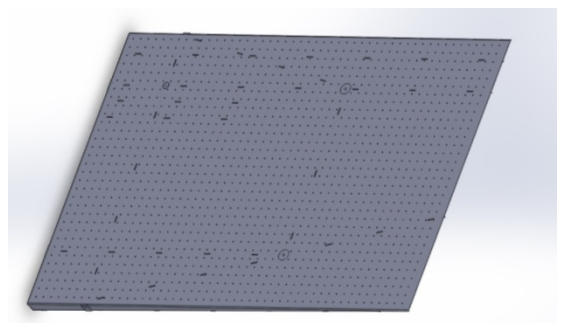
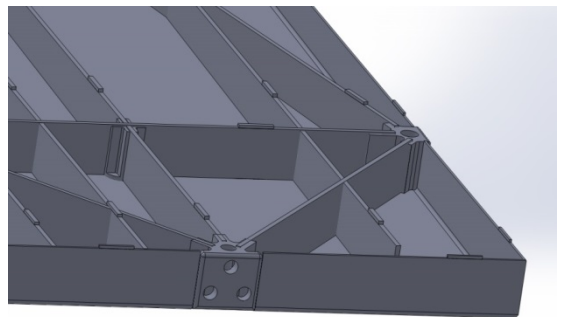
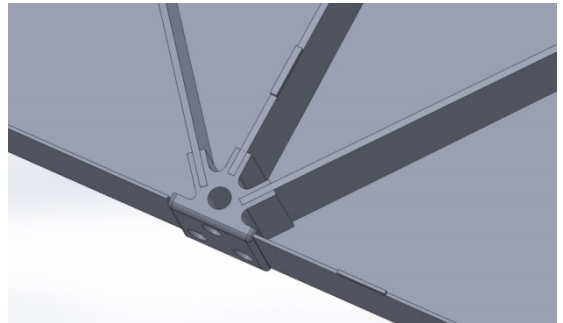
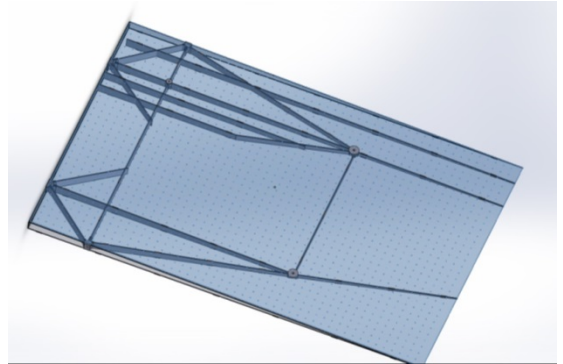
- Lasergenerieren zur Herstellung der Anbindungs- und Knotenpunkte
- Laserstrahlschneiden zum Herstellen der Ober- und Unterbleche sowie der Streben
- Umformen der Bleche mittels Blechbiegetechnik
- Fügen mittels verzugsarmen Laserstrahlschweißen

Sonstiges

- einfache Bauteilpositionierung durch Steck- und Kammsystem

Darstellung Bauteilkonzept

1



3D-Blechleichtbau

Technische Merkmale

Struktur:

- Platte mit Versteifungen auf der Unterseite
- lastangepasste U-Profil-Versteifung gemäß Topologieoptimierung
- Anbindungspunkte in Bauteilstruktur integriert
- Krafteinleitung in Standardisierte Einleitungspunkte

Funktionserfüllung:

- Rutschschutz durch Laser-Pulver-Auftragschweißen
- Korrosionsschutz durch Edelstahlstruktur
- Unfallschutz durch Bördeln der Kanten und Lasergenerierte Schutzkappen

Herstellungsprozesse:

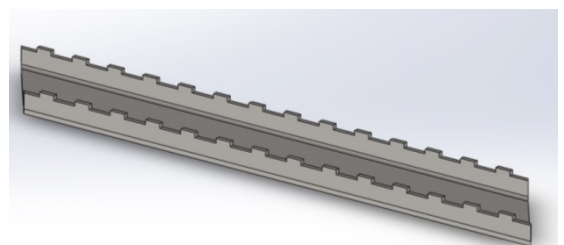
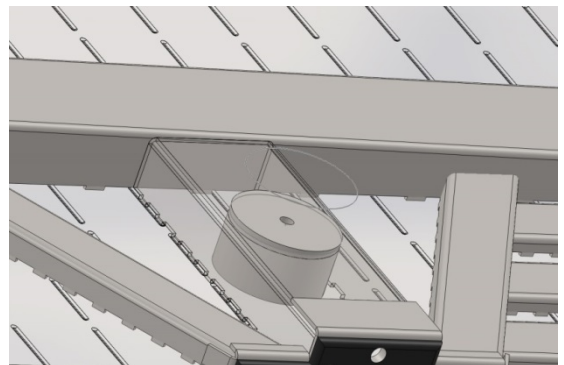
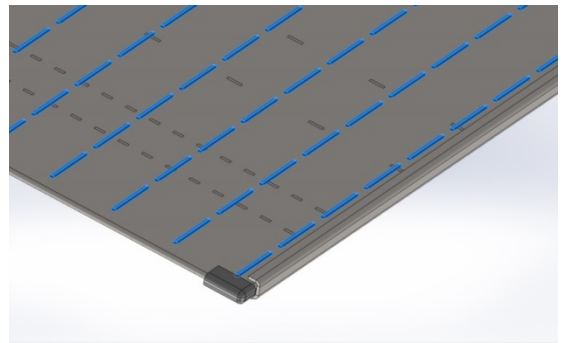
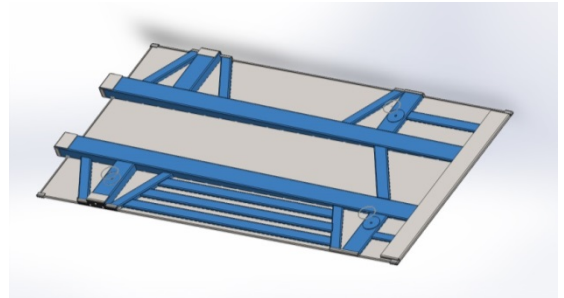
- Laserstrahlschneiden zum Herstellen des Oberbleches sowie den Rohlingen für die angepassten Versteifungsprofile
- Umformen der Bleche und U-Profile mittels Blechbiegetechnik
- Drehen der Krafteinleitungspunkte
- Fügen mittels verzugsarmen Laserstrahlschweißen

Sonstiges

- einfache Bauteilpositionierung durch Stecksystem
- seitliche Krafteinleitungsbleche verstärkt durch Laserpulverauftragsschweißen zur einfachen Integration von z. B. Gewinden

Darstellung Bauteilkonzept

2



3D-Blechleichtbau

Technische Merkmale

Struktur:

- regelmäßige, gekantete Blechstruktur
- Versteifung und Nutzfläche durch eingesetzte Profile
- Anbindungspunkte als angepasste Blechbiegeteile

Funktionserfüllung:

- Rutschschutz durch integrierte Zacken- und Lochstruktur
- Kantenschutz durch aufgesetzte U-Profile

Herstellungsprozesse:

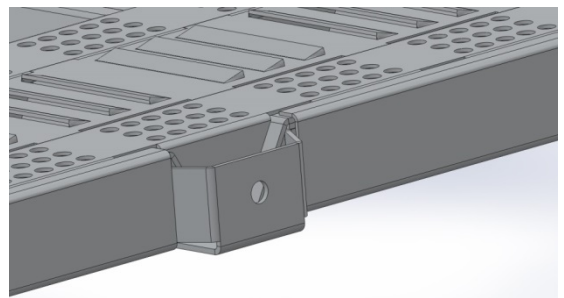
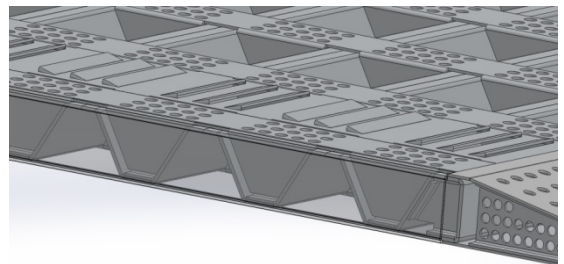
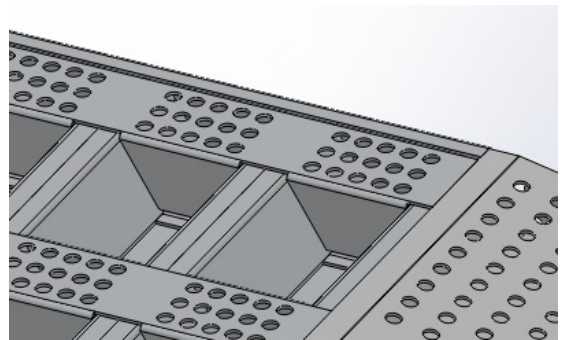
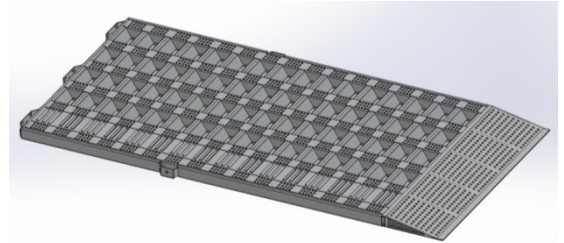
- Laserstrahlschneiden zum Vorbereiten der Wellbleche sowie den Rohlingen für die angepassten Versteifungsprofile und Anbindungspunkte
- Umformen der Wellbleche, Versteifungsprofile und Anbindungspunkte mittels Blechbiegetechnik
- hochdynamisches Laser-Remote-Schweißen durch einseitige Zugänglichkeit

Sonstiges

- leichtes Spannen durch vordefinierte Auflagen und Überlappstoße
- einfach skalierbares System
- als offene oder geschlossene Struktur verwendbar

Darstellung Bauteilkonzept

3



3D-Blechleichtbau

Bewertung der Bauteilkonzepte

Im Zuge des Workshops wurden die drei Bauteilkonzepte detailliert vorgestellt und nach verschiedenen Kriterien von den Teilnehmern bewertet. Hierbei konnten die einzelnen Teilnehmergruppen den Erfüllungsgrad jedes Konzeptes pro Bewertungskriterium festlegen. Um deutliche Unterschiede des Ergebnisse herauszuarbeiten, wurde folgende Abstufung genutzt:

Erfüllungsgrad	9	sehr gut
	6	gut
	3	durchschnittlich
	0	kaum tragbar

Kriterium	Gewichtung	Konzept 1		Konzept 2		Konzept 3				
		Erf.	Erf.	Erf.	Erf.					
Lastfall										
• frei positionierbarer Lasteneinleitungspunkt	40%									
• intelligente Struktur (anpassungsfähig)		3	6	3		6				
• Dynamik										
• Variable Punktlast		3	3	3	6	6	9			
• Flexibilität Lastfall										
• asymmetrische Lasteinleitung		6		6	3	3	0			
Geometrie										
• Steifigkeit	10%									
• Modularität (erweiterbar / kombinierbar)		3	9	9	3	6	6	3		
• 3D - Struktur										
• skalierbar		6	3		6	6	6	9	9	9
Funktion										
• Verletzungsschutz	20%									
• Kantenschutz		9		6						
• Spaltschluss / Abdichtung								3	3	
• stoßfest		6	6		6	6				
• handhabbar								6	3	3
• Korrosionsschutz		9	6		6	6				
Fertigungseignung										
• Halbzeugfertigung	25%									
• Positionier- und Spanneignung		6								
• Fertigungskomplexität		3	9		6	6		3	3	
• 3D - fugegeignet										
• Kosten		9	6		6	6	3	3	3	3
• Losgrößenflexibilität										
Sonstiges										
• Reparaturmöglichkeit	5%	9	6		6		6			
• Recycling		9	0	3	9	3	6	6	3	3

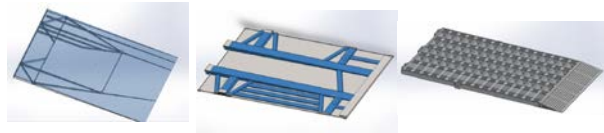
Sieger der Bewertung ist das Konzept 1, also die Sandwichbauweise mit lastoptimierten Blechverstreibungen als Versteifung. Dieses Konzept bietet nun die Grundlage für alle weiteren Betrachtungen in den kommenden Workshops.

Priorisierung der Einzelkriterien

Neben der Bewertung der Kriteriengruppen hatten die Teilnehmern außerdem die Möglichkeit für Einzelkriterien, denen aus ihrer Sicht eine besondere Bedeutung zu kommt, diese mit farbigen Punkt auf den Bewertungsbogen zu markieren. Die Kriterien, die dort besonders viele Punkte gesammelt und somit aus Sicht der Gruppe eine hohe Relevanz haben, werden bei der finalen Baugruppenkonstruktion mit höherer Priorität umgesetzt.

3D-Blechleichtbau

Bewertungsmatrix 3D-Blechleichtbau



Lastfall		Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3		
<ul style="list-style-type: none"> • frei positionierbarer Lasteneinleitungspunkt • intelligente Struktur (anpassungsfähig) • Dynamik • Variable Punktlast • Flexibilität Lastfall • asymmetrische Lasteinleitung 	40%	21	21	24		
		8,40	8,40	9,60		
		Geometrie		Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
		<ul style="list-style-type: none"> • Steifigkeit • Modularität (erweiterbar / kombinierbar) • 3D - Struktur • skalierbar 	10%	30	27	36
				3,00	2,70	3,60
				Funktion		Konzept 1
<ul style="list-style-type: none"> • Verletzungsschutz • Kantenschutz • Spaltschluss / Abdichtung • stoßfest • handhabbar • Korrosionsschutz 	20%			36	30	18
		7,20	6,00	3,60		
		Fertigungseignung		Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
		<ul style="list-style-type: none"> • Halbzeugfertigung • Positionier- und Spanneignung • Fertigungskomplexität • 3D - füegeeignet • Kosten • Losgrößenflexibilität 	25%	33	27	15
				8,25	6,75	3,75
				Sonstiges		Konzept 1
<ul style="list-style-type: none"> • Reparaturmöglichkeit • Recycling 	5%			27	30	18
				1,35	1,50	0,90

Ergebnis: **28,20** **25,35** **21,45**

► Nächste Schritte



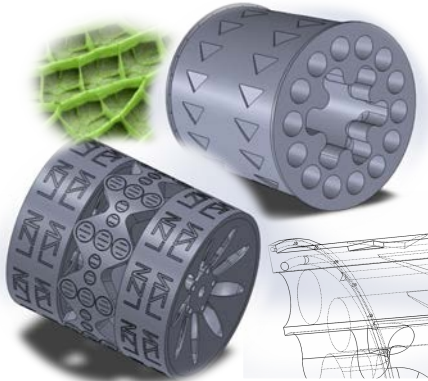
Themenschwerpunkt: Konstruktion
Potentiale und Designrichtlinien

Light-Design:
Fortschritt der Demonstratoren, Workshop und Ergebnisse

Nächste Schritte

Nächste Schritte bis zum 3. Workshop

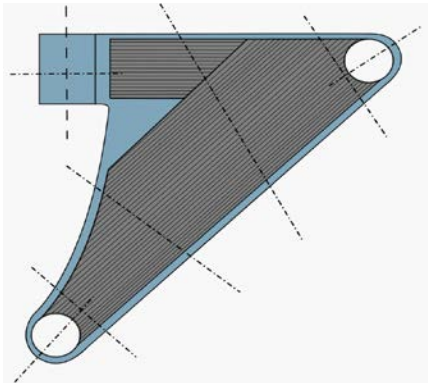
1 Multifunktions-3D-Druck



Für den dritten Workshop werden die von den Teilnehmern im zweiten Workshop entwickelten finalen Walzenentwürfe von den Mitarbeitern der LZN GmbH bewertet. Ein Entwurf wird aufbereitet und abschließend konstruktiv umgesetzt.

Im dritten Workshop, mit dem Fokus auf dem Prototyping des Demonstrators, wird der endgültige Entwurf des Bauteildesigns vorgestellt. Mit Hilfe eines laseradditiv gefertigten, skalierten Prototypen und diversen Probekörpern sollen der Herstellungsprozess in seiner kompletten Bandbreite sowie dessen Grenzen und Möglichkeiten dargelegt und diskutiert werden. Zusätzlich sollen ausgewählte kritische Schritte der Fertigungskette anhand von Demonstrationen gemeinsam bearbeitet werden.

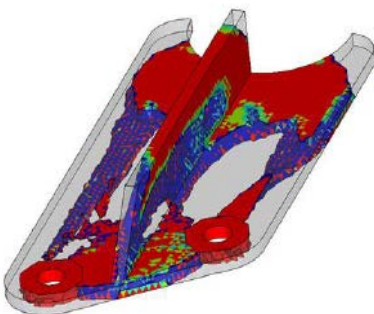
2 Hybrider 3D-Druck



Das im 2. Workshop erarbeitete und ausgewählte Querlenkerdesign wird zum 3. Workshop von den Mitarbeitern der LZN GmbH weiter detailliert und mittels Strukturoptimierungsverfahren optimiert. Zusätzlich werden anhand von Zugproben mechanische Kennwerte der hybriden Verbindung bestimmt, die als Grundlage zur Auslegung des Querlenkers dienen.

Im 3. Workshop „Prototyping“ wird das Querlenkerdesign vorgestellt und abschließend diskutiert. Abgeleitet vom Enddesign werden mögliche Fertigungstechnologien für die hybride Verbindung präsentiert. Zusätzlich wird im Workshop eine Prototypen-Fertigung mittels Vakuuminfusionsverfahren durchgeführt und ihre Anwendbarkeit zur Fertigung des Querlenkers beurteilt.

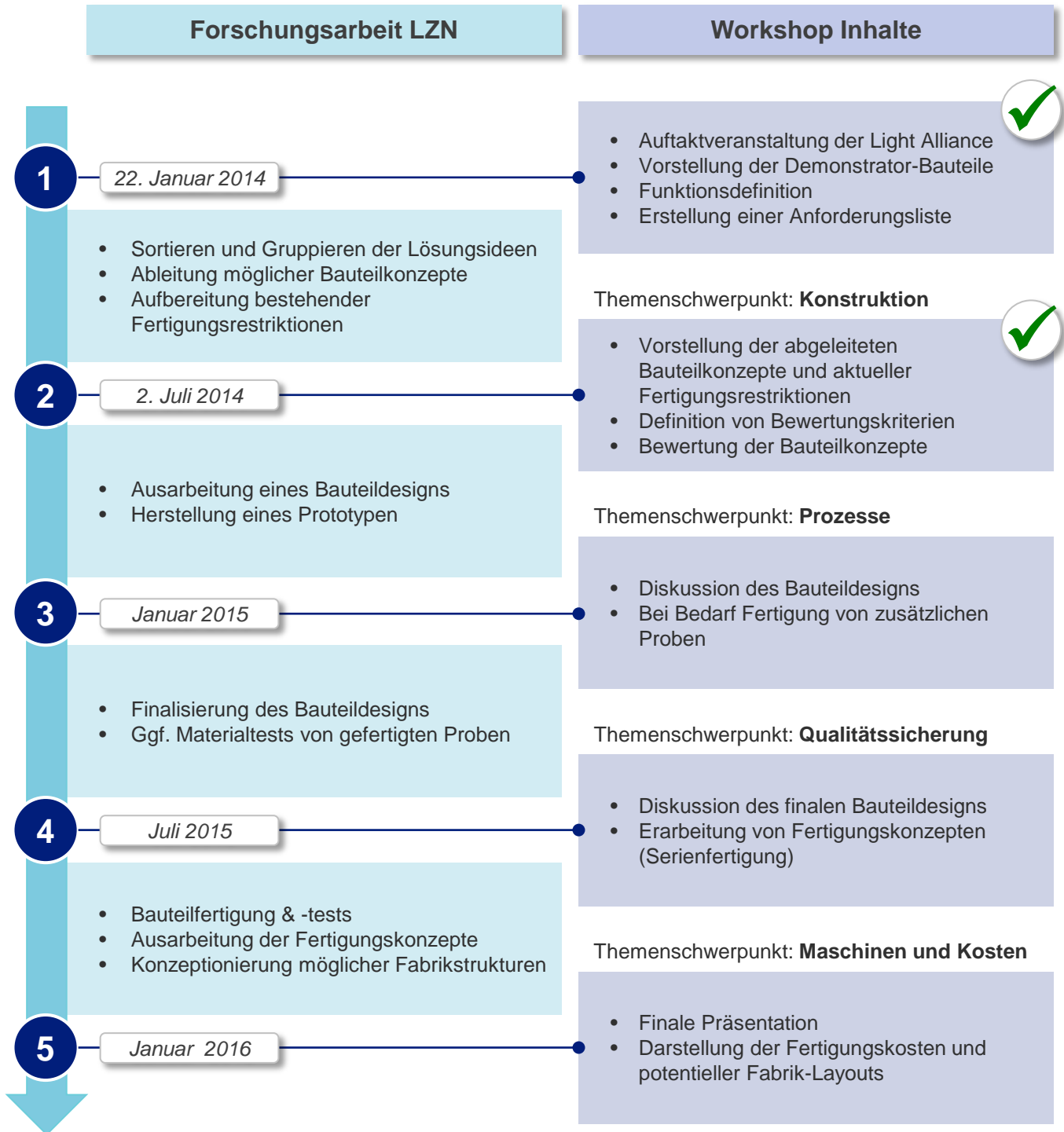
3 3D-Blechleichtbau



Für den dritten Workshop wird das ausgewählte Baugruppenkonzept der Sandwichstruktur mit topologisch optimierten Blechstreben final auskonstruiert und den Teilnehmern vorgestellt. Hierfür wird ein erster Prototyp im Lasergenerierverfahren gefertigt.

Aufbauend auf diesem Design werden im Workshop alle beteiligten Fertigungsprozesse mit den Teilnehmern betrachtet. Hierfür werden die relevanten Verfahrensmerkmale erläutert und die Prozesse in praktischen Vorführungen gezeigt. Hierbei haben die Teilnehmer die Möglichkeit, durch die Variation von Prozessparametern, ihren Einfluss direkt zu erleben und so ein Gespür für charakteristische Kenngrößen zu erlangen.

Ausblick



LZN Laser Zentrum Nord GmbH

Am Schleusengraben 14

D-21029 Hamburg

Web: www.lzn-hamburg.de

E-Mail: info@lzn-hamburg.de

Tel: +49 40 484010-500

Fax: +49 40 484010-999



Light Alliance