



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jonas Schlag

Strukturoptimierung von selbsttragenden Bauteildesigns im Rahmen der sinterbasierten Additiven Fertigung mittels metal Fused Filament Fabrication

Jonas Schlag

**Strukturoptimierung von
selbsttragenden Bauteildesigns im
Rahmen der sinterbasierten Additiven
Fertigung mittels metal Fused Filament
Fabrication**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Produktionstechnik und -management
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Jens Telgkamp

Zweitprüfer/in: Jaco Beckmann

Zusammenfassung

Jonas Schlag

Thema der Bachelorthesis

Strukturoptimierung von selbsttragenden Bauteildesigns im Rahmen der sinterbasierten Additiven Fertigung mittels metal Fused Filament Fabrication

Stichworte

Additive Fertigung, Fused Filament Fabrication, Strukturoptimierung, Topologieoptimierung, generatives Design, metal FFF, metal Fused Filament Fabrication

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit hat zum Ziel die Eignung von SIMP, BESO und Level-Set Methode basierten Optimierungsalgorithmen im Designprozess von für metal Fused Filament Fabrication geeigneten Bauteilen zu untersuchen. Dafür wird die automatisierte Optimierung von Bauteiltopologien mit der Vorgabe von einzuhaltenden Fertigungsrestriktionen kombiniert. Dies geschieht in den Optimierungsprogrammen Altair Inspire, MSC Apex generative Design und Autodesk Fusion. Die untersuchten Optimierungsalgorithmen erweisen sich als hilfreich in der Optimierung komplexerer Strukturen. Die fertigungsgerechte Optimierung ohne Nacharbeit stellt sich dabei als nur bedingt umsetzbar heraus. Im Zuge der Stützstrukturreduktion erweist sich MSC Apex generative Design als am leistungsstärksten. Bezüglich mechanischer Kennwerte und Robustheit stellt sich in dieser Arbeit Autodesk Fusion als am performantesten heraus.

Jonas Schlag

Title of the paper

Structural optimization of self-supporting component designs in the context of sinter-based additive manufacturing using metal fused filament fabrication

Keywords

Additive manufacturing, fused filament fabrication, structure optimization, topology optimization, generative design, metal FFF, metal fused filament fabrication

Abstract

The aim of this work is to investigate the suitability of SIMP, BESO and level set method based optimization algorithms in the design process of components suitable for metal Fused Filament Fabrication. For this purpose, the automated optimization of component topologies is combined with the specification of manufacturing constraints. This is done in the optimization programs Altair Inspire, MSC Apex generative Design and Autodesk Fusion. The investigated optimization algorithms prove to be helpful in the optimization of more complex structures. The production-oriented optimization without reworking turns out to be feasible only to a limited extent. In the course of support structure reduction, MSC Apex generative design proves to be the most powerful. In terms of mechanical parameters and robustness, Autodesk Fusion proves to be the best performer in this work.

Aufgabenstellung für Bachelorarbeit

SIGNAL

Studierender: Jonas Schlag
Matrikel-Nr.:

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jens Telgkamp
Zweitprüfer: M.Sc. Jaco Beckmann

Thema: Strukturoptimierung von selbsttragenden Bauteildesigns im Rahmen der sinterbasierten Additiven Fertigung mittels metal Fused Filament Fabrication.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen mittels Anwendung von Strukturoptimierungs-Software anhand entwickelter Anschauungsbeispielen mögliche Unterschiede zwischen SIMP, BESO, und Level-set Methoden aufgezeigt werden. Daraufgehend soll ein exemplarisches »strukturoptimiertes« Demonstrator-Bauteil auf der Basis von selbsttragenden Designs, unter Berücksichtigung vom Fused Filament Fabrication (FFF) sowie der Nachverarbeitung mittels Entbindern und Sintern, entstehen. Das Vorhaben besteht darin, den Leichtbau mittels Strukturoptimierungs-Tools im Rahmen der Möglichkeiten von selbsttragenden Designs oder gegebenenfalls mit der größtmöglichen Vermeidung von Stützstrukturen umzusetzen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sind daher folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

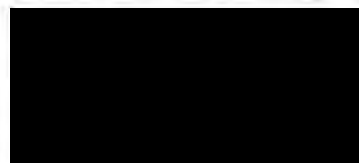
- Literaturrecherche zu typischen Fertigungsbeschränkungen im FFF (max./min. Länge und Dicke von Streben, Winkelgrenzen, etc.), sowie Möglichkeiten zur Stützstrukturreduktion und zu berücksichtigende Merkmale der folgenden Prozesse mit Entbindern und Sintern
- Ausarbeitung von Ansätzen zur Strukturoptimierung unter der Berücksichtigung von selbsttragenden Designs für den metal FFF-Prozess unter Einhaltung der Sinterbarkeit
- Entwicklung von repräsentativen Anschauungsbeispielen von selbsttragenden Bauteildesigns unter Einsatz von unterschiedlichen Strukturoptimierung-Algorithmen (SIMP, BESO, LSM) mit Abgrenzung zueinander und darauf aufbauender Demonstrator wenn mgl.
- Optimierungsergebnisse mittels FE-Analyse auf festgelegte Kriterien (Steifigkeit, Festigkeit, Robustheit, ...) untersuchen und bewerten (sowie evtl. Vergleich mit ursprünglichem Design)
- Analyse von optimaler Bauteilausrichtung in Bezug auf eine effizientere Anordnung von vermeintlich notwendigen Stützstrukturen zur Bewertung des entwickelten Bauteildesigns
- Mgl. Fertigung des erfolgreich strukturoptimierten Demonstrator-Bauteils mittels metal FFF. Bewertung des Demonstrators mit Aufzeigen von Vor- und Nachteilen in Bezug auf erlangte Stützstrukturersparnisse/Gewichtszunahme inklusive potenzieller Leistungsabweichung
- Nachfolgende Diskussion der selbsttragenden Bauteildesigns (mit Bezug auf Korrelationen zwischen FFF – Entbindern – Sintern) und der Möglichkeiten vermeintliche Stützstrukturen durch geschlossene Wandstrukturen sowie Fertigungsdauer mittels Parameteroptimierung (Hull-Core Baustrategien) zu reduzieren. Abschließende Einordnung von auftretenden Herausforderungen, entsprechende Möglichkeiten diese zu umgehen sowie Ausblick auf zukünftige Anwendungen

Diese Abschlussarbeit wird im Institut für Produktionstechnik an der HAW Hamburg im Rahmen des BMWK-geförderten Forschungsprojektes SIGNAL durchgeführt.

Hamburg, den 23.05.24



Unterschrift des Studierenden



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Symbolverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
2 Einführung in die additive Fertigung	2
3 Fused Filament Fabrication.....	3
3.1 Herausforderungen für FFF.....	4
3.2 Designgrundlagen für FFF	6
3.2.1 Bauteilorientierung	10
3.3 FFF für Metallbauteile	11
3.3.1 Designen für den metal FFF	14
4 Stützstrukturreduktion.....	17
4.1 Stützstrukturreduktion im Druckprozess.....	17
4.2 Stützstrukturreduzierung im Design.....	18
5 Topologieoptimierung und generatives Design	20
5.1 Geometrieoptimierung und additive Fertigung	21
5.2 Optimierungsalgorithmen.....	22
5.2.1 Solid Isotropic Material with Penalization	22
5.2.2 Bidirectional Evolutionary Structural Optimazation	24
5.2.3 Level-Set Methode.....	26
5.3 SIMP, BESO und Level-Set Methode für die additive Fertigung.....	28
5.4 Fertigungsrestriktionen in SIMP, BESO und Level-Set Methode in kommerzieller Anwendung	29
6 Überhangswinkelkontrolle in Inspire, Apex und Fusion	33
6.1 Testszenario 1.....	33
6.1.1 Optimierungsergebnisse.....	35
6.2 Testszenario 2.....	39

6.3	Testszenario 3.....	43
6.3.1	Inspire	44
6.3.2	Apex.....	47
6.3.3	Fusion.....	50
6.4	Leistungsfähigkeit der Überhangswinkelkontrolle in Inspire, Apex und Fusion.....	52
7	Dickenkontrolle in Inspire, Apex und Fusion.....	54
7.1	Minimale Dicke.....	54
7.1.1	Inspire	55
7.1.2	Apex.....	58
7.1.3	Fusion.....	60
7.1.4	Auswertung	62
7.2	Maximale Dicke	62
7.2.1	Inspire	64
7.2.2	Apex.....	66
7.2.3	Ergebnisvergleich Inspire und Apex.....	68
8	Bracket	69
8.1	Vergleich der Supportminimierung in Inspire, Apex und Fusion für das Bracket	71
8.1.1	Bewertungskriterien.....	73
8.1.2	Auswertung	73
8.1.3	Mechanische Eigenschaften.....	74
8.1.4	Vergleich zum Originalbauteil.....	75
8.1.5	Gewicht und Supportreduktion	75
8.1.6	Auswahl des leistungsstärksten Optimierungsalgorithmus	76
8.2	Optimierungen mit Dickenrestriktion	76
8.2.1	Inspire	77
8.2.2	Apex.....	77
8.2.3	Fusion.....	79
8.2.4	Bewertung der praktischen Nutzbarkeit der Restriktion der minimalen Dicke	79
9	Leichtbau.....	80

9.1	Ergebnisse	82
9.2	Dickenrestriktion.....	84
9.3	Optimierung mit angepassten beizubehaltenden Geometrien.....	85
10	Zusammenfassung und Ausblick	88
10.1	Ausblick	89
	Literaturverzeichnis	92
	Anhang.....	96
	Eigenständigkeitserklärung.....	197

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrylnitril-Butadien-Styrol)
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (Bidirektionale evolutionäre Strukturoptimierung)
EBM	Electron-Beam-Melting (Elektronen-Strahlschmelzen)
ESO	Evolutionary Structural Optimization (evolutionäre Strukturoptimierung)
FDM	Fused Depositon Modelling
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FFF	Fused Filament Fabrication
FGF	Fused Granulat Fabrication
FLM	Fused Layer Modelling
HIP	Hot Isostatic Pressing (Heißisostatisches Pressen)
LBM	Laser-Beam-Melting (Laser-Strahlschmelzen)
PA	Polyamide (Polyamid)
PA-CF	Polyamide Carbon Fiber (Polyamid mit Kohlefaserverstärkung)
PET	Polyethylene Terephthalate (Polyethylenterephthalat)
PLA	Polylactic Acid (Polymilchsäure)
PLA-GF	Polylactic Acid Glass Fiber (Polymilchsäure mit Glasfaserverstärkung)
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization (Festes isotropes Material mit Bestrafung)
SLM	Selectiv Laser Melting (Selektives Laser Schmelzen)
SLS	Selectiv Laser Sintering (Selektives Laser Sintern)
TPU	Thermoplastic Polyurethane (Thermoplastisches Polyurethan)

Symbolverzeichnis

α_i	Sensitivitätsnummer des Elements i (BESO)	-
α_{th}	Schwellenwert für Sensitivitätsnummern (BESO)	-
δ	Überhangswinkel	°
δ_{cr}	kritischer Überhangswinkel	°
$\sigma_{VM,i}$	von Mises Spannung im Element i (BESO)	MPa
$\sigma_{VM,max}$	maximale von Mises Spannung im Modell (BESO)	MPa
b_{gap}	Spaltbreite	mm
b_{over}	Überhangsbreite	mm
C	Compliance (SIMP, BESO)	$\frac{m}{N}$
d	Innendurchmesser	mm
D	Außendurchmesser	mm
$E(x)$	effektives E-Modul (SIMP)	MPa
E_0	E-Modul des Werkstoffs (SIMP)	MPa
ER	Evolutionrate (BESO)	%
\mathbf{F}	Kraftvektor	N
K_i	Steifigkeitsmatrix des Elements i (BESO)	$\frac{N}{m}$
l	Länge	mm
p	Straffaktor (SIMP)	-
RR	Rejection Ratio für Element i (BESO)	%
t_s	Schichthöhe	mm
\mathbf{u}	Verschiebungsvektor (BESO)	mm
\mathbf{u}_i	Verschiebungsvektor des Elements i (BESO)	mm
V^*	Zielvolumen (BESO)	mm ³
V_i	Volumen des Elements i (BESO)	mm ³
VG_k	Volumen für den aktuellen Iterationsschritt k (BESO)	mm ³
VG_{k+1}	Volumen für den nächsten Iterationsschritt (BESO)	mm ³
x_e	normalisierter Dichtewert (SIMP)	-
x_i	Designvariable für Element i (BESO)	-
$x_{e,min}$	minimaler Dichtewert (SIMP)	-

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Achsen eines FFF Druckers [5].....	3
Abbildung 2: additive Fertigungsverfahren im Vergleich [33]	5
Abbildung 3: Downskinflächen unterschiedlicher Überhangswinkel	6
Abbildung 4: Designempfehlungen für Bohrungen im FFF [36, S. 10].....	8
Abbildung 5: Konstruktionsgerechtes Design eines Überhangs für FFF [36, S. 15]	8
Abbildung 6: Designregeln für angewinkelte Überstände in FFF [36, S. 11-13].....	9
Abbildung 7: Richtwerte für minimale Spaltbreiten in FFF [36, S. 17].....	10
Abbildung 8: Schematischer Ablauf des metal FFF Prozesses im Vergleich zum Spritzguss für metallische Bauteile. Metal FFF unten	12
Abbildung 9:a: Ungewollte Hohlräume zwischen den einzelnen abgelegten Strängen.	13
Abbildung 10: Links nicht optimiertes Bauteil. Rechts: Gleichmäßige Wandstärken sorgen für schnelleres Entbindern [25, S.5].....	15
Abbildung 11: Spitz zulaufender Support für Resin basierte additive Fertigungsverfahren links, Tree-Support rechts [12]	17
Abbildung 12: Brückengestaltung zur Supportvermeidung für FFF [14, S. 58].....	18
Abbildung 13: Beispiel für einen Designspace (links) und ein entsprechendes Setup mit Hindernis- und beizubehalten Geometrien (rechts). Beizubehaltende Geometrien in grün, Hindernis-Geometrien in rot	20
Abbildung 14: Level-Set-Funktion im Optimierungsprozess.....	26
Abbildung 15: Aus der in Abbildung 14 dargestellten Level-Set-Funktion abgeleitete Geometrie	27
Abbildung 16: Schematische Darstellung von Designspace und Lastfall	28
Abbildung 17: Links niedrige Werte für den Regulierungsparameter, rechts hohe Werte	29
Abbildung 18: Einstellung für Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung in Apex, Fusion und Inspire	30
Abbildung 19: Einstellung der Supportvermeidung in Apex	31
Abbildung 20: Geometrie und erster Lastfall des Testbauteils	33
Abbildung 21: Händisch optimierte Geometrie.....	35
Abbildung 22: Supportstruktur für die händisch optimierten Geometrie und Auszug aus der FE-Analyse	35
Abbildung 23: Für Szenario 1 optimierte Geometrien. Links Apex, rechts Fusion	36
Abbildung 24: Querschnitt des oberen Querbalkens aus Apex. Links uneingeschränkt, rechts Überhangswinkelbeschränkung und Supportreduktion auf hoch	37
Abbildung 25: Optimierungsergebnis Apex, links uneingeschränkt, rechts mit 45° Überhangswinkelrestriktion und hoher Supportreduktion.....	38

Abbildung 26: FE-Analyse Szenario 1: Links Apex, rechts Fusion.....	39
Abbildung 27: Optimierungsergebnisse Inspire, Blau mit gemilderter Überhangswinkelrestriktion, Grün uneingeschränkt	40
Abbildung 28: Optimierungsergebnisse Apex. Grün uneingeschränktes Ergebnis, Blau mit Überhangswinkelrestriktion und Supportreduktion auf hoch.....	41
Abbildung 29: Optimierungsergebnisse Fusion. Grün uneingeschränkt, Blau mit Überhangswinkelrestriktion.....	42
Abbildung 30: FE-Analyseergebnisse: Links Apex, rechts Fusion. Bereiche mit Sicherheitsfaktor unter 1,5 farbig dargestellt	42
Abbildung 31: Geometrie und Lastfall Szenario 3	43
Abbildung 32: Optimierungsergebnisse Inspire, Durchlauf 1 - 4 von links nach rechts.....	44
Abbildung 33: Optimierungsergebnisse Inspire, Durchlauf 5 - 7 von links nach rechts.....	46
Abbildung 34: Optimierungsergebnisse Apex, im Vordergrund von links nach rechts: Durchlauf 1-4; im Hintergrund von links nach rechts Durchlauf 2,1,4,3.....	47
Abbildung 35: Supportstruktur für die Optimierungsergebnisse aus Apex, links Durchlauf 2, rechts Durchlauf 4	49
Abbildung 36: Optimierungsergebnisse Fusion, Durchlauf 1-4 von links nach rechts	50
Abbildung 37: Supportgeometrien, Durchlauf 1 bis 4 von links nach rechts.....	51
Abbildung 38: Von links nach rechts: Supportgeometrie, FE-Analyse Sicherheitsfaktor	53
Abbildung 39: Maße und Lastfall für die Untersuchung der Dickenrestriktion.....	54
Abbildung 40: Von links nach rechts Optimierungen mit den vorgegebenen Mindestdicken: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm	55
Abbildung 41: Links: Oberer Teil der Geometrie für die Optimierung mit vorgegebener Mindestdicke 2mm, rechts Schnittansicht.....	56
Abbildung 42: Von links nach rechts: Optimierungsergebnisse für vorgegebene Mindestdicken von: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm. Unten mit eingebettetem Zylinder des Durchmessers 3 mm	57
Abbildung 43: Ganz Links: Uneingeschränkte Geometrie. Dann, von links nach rechts, jeweils mit eingebettetem Zylinder des Durchmessers 2,4 mm in grün: Uneingeschränkte Geometrie, Mindestdicke 1 mm, Mindestdicke 2 mm	58
Abbildung 44: Links gesamte Geometrie für Mindestdicke 3mm, rechts Säulenteil der Geometrie....	59
Abbildung 45: Ergebnisse für minimalen Dicke von: uneingeschränkt, 1 mm, 2 mm (von links nach rechts)	60
Abbildung 46: Ergebnisse für minimalen Dicke von: 3 mm, 4 mm, 5 mm, 10 mm (von links nach rechts)	61

Abbildung 47: Szenario zum Überprüfen der Restriktion der maximalen Dicke	63
Abbildung 48: Händische Optimierungen, links Kraftfluss durch die Mitte, rechts Kraftfluss an den Rändern.....	63
Abbildung 49: Links: Ohne Restriktion der maximalen Dicke erzeugte Geometrie, rechts:.....	64
Abbildung 50: Querschnitte der Optimierungen in Inspire	65
Abbildung 51: Querschnitte der mit Restriktion der maximalen Dicke erzeugten Geometrie mit eingebundenem Zylinder des Durchmessers 2 mm in rosa	65
Abbildung 52: Optimierungsergebnisse, links ohne Dickenrestriktion, rechts mit Restriktion der maximalen Dicke	66
Abbildung 53: Querschnitte der beiden Optimierungsläufe, rosa ohne Restriktion, blau mit Restriktion der maximalen Dicke	67
Abbildung 54: Bemaßter Querschnitt in der Mitte der generierten Geometrien. Links ohne Dickenrestriktion, rechts mit Restriktion der maximalen Dicke	67
Abbildung 55: Vereinfachtes Bracket	69
Abbildung 56: Bracket, Rohr und wirkende Kräfte.....	70
Abbildung 57: Links Designspace und beizubehaltende Geometrien für Inspire und Apex, rechts Hindernis- und beizubehaltende Geometrien für Fusion.....	71
Abbildung 58: Ausrichtungen des Designspaces für den Druck.....	72
Abbildung 59: Optimierung Inspire Y-. Links original, rechts mit Abzug der minimalen Dicke	77
Abbildung 60: Bereiche problematischer Dicke in der Optimierung Apex Z-	78
Abbildung 61: Ergebnis der Optimierung mit Restriktion der minimalen Dicke. Links mit eingebettetem Zylinder des Durchmessers 1,2 mm in rot.....	78
Abbildung 62: Veränderung der minimalen Dicke bei vorgegebener minimaler Dicke von 3 mm für die Optimierung Fusion Z+	79
Abbildung 63: Definition der neuen Druckrichtung für den angepassten Designspace. Links alter Designspace, rechts neuer Designspace	80
Abbildung 64: Links Aufbau generatives Design Fusion (Hindernis-Geometrie Rohr ausgeblendet), rechts Designspace Apex.....	81
Abbildung 65: Links das Ergebnis der Apex Optimierung, rechts das Ergebnis der Fusion Optimierung	82
Abbildung 66: Supportstrukturen für Apex und Fusion. Oben Apex unten Fusion.....	83
Abbildung 67: Erzeugte Dicke aus der Optimierung mit Fusion. Eingebettet in das Optimierungsergebnis ist eine Kugel des Durchmessers 10 mm.	84
Abbildung 68: Erzeugte Dicke aus der Optimierung mit Apex. Eingebettet in das Optimierungsergebnis ist eine Kugel des Durchmessers 10 mm.	85

Abbildung 69: Setup für stützstrukturlose Bauteile. Links Designspace für Apex, rechts Setup für das generative Design in Fusion (Hindernis-Geometrie Rohr ausgeblendet).....	86
Abbildung 70: Stützstrukturlose Designs, links Apex, rechts Fusion	86
Abbildung 71: Erzeugte Supportstruktur für das stützstrukturlose Design in Apex	87
Abbildung 72: Erzeugte Supportstruktur für das stützstrukturlose Design in Fusion.....	87
Abbildung 73: Uneingeschränkt optimiertes Optimierungsergebnis aus Fusion	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überhangs- und Dickenkontrolle in Apex, Fusion und Inspire.....	32
Tabelle 2: Kennwerte Szenario 1.....	36
Tabelle 3: Kennwerte Szenario 3.....	40
Tabelle 4: Optimierungseinstellungen Szenario 3.....	44
Tabelle 5: Optimierungsdurchläufe Inspire.....	45
Tabelle 6: Kennwerte Optimierungslauf 1 bis 7 Inspire.....	45
Tabelle 7: Kennwerte für die Optimierungen in Szenario 4 durch Apex.....	48
Tabelle 8: Kennwerte der Optimierungsläufe in Fusion.....	51
Tabelle 9: Abweichungen von der Dickenrestriktion.....	61
Tabelle 10: Abweichungen von der vorgegebenen Dicke im Vergleich. Grün Inspire, rosa Apex, blau Fusion	62
Tabelle 11: Durchschnittswerte der Kennwerte der optimierten Brackets, den Optimierungsprogrammen zugeordnet.....	76
Tabelle 12: Mechanische Kennwerte der beiden Optimierungen.....	83
Tabelle 13: Mechanische Kennwerte der Optimierungen mit angepassten beizubehaltenden Geometrien	88

1 Einleitung

In der additiven Fertigung verläuft der Herstellungsprozess eines Bauteils substanziell anders als in traditionellen, subtrahierend fertigenden Fertigungsverfahren. Statt Material abzutragen, wird das Bauteil hinzufügend aufgebaut. Es werden unterschiedliche additive Fertigungsverfahren unterschieden, eines davon ist metal Fused Filament Fabrication (metal FFF). Dieses Verfahren vereint die einfache Verwendung, die Kosteneffizienz und den hohen Grad geometrischer Freiheit von Fused Filament Fabrication mit den mechanischen Kennwerten von Metallbauteilen.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, inwiefern Topologieoptimierung und generatives Design für das Optimieren und Erstellen von Designs geeignet ist, die per metal FFF gefertigt werden können. Dafür werden Optimierungsprogramme genutzt, die auf unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen beruhen. Untersucht werden Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP), Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) und die Level-Set Methode.

Ziel der darauf aufbauenden Optimierungen ist die Minimierung der erforderlichen Stützstrukturen für metal FFF-Bauteile. Bauteile mit minimierten Stützstrukturen oder gänzlich ohne Stützstrukturen ermöglichen einen weniger fehleranfälligen Druckprozess, die so hergestellten Bauteile erfordern zudem weniger Nacharbeit und weisen eine höhere Oberflächenqualität und potenziell bessere mechanische Kennwerte auf.

Um die Topologieoptimierung und das generative Design zum Erstellen stützstrukturlos zu fertigender Bauteile nutzen zu können, müssen in ihrer Anwendung die Fertigungsrestriktionen von metal FFF berücksichtigt werden. Inwiefern dies möglich ist, soll in dieser Arbeit analysiert werden. Dafür werden zunächst Anschauungsbeispiele im Hinblick auf das Einhalten vorgegebener Fertigungsrestriktionen optimiert. Die dabei erlangten Erkenntnisse zur Umsetzung der Fertigungsrestriktionen werden im Anschluss auf ein komplexeres Bauteil angewandt und verglichen, welches Optimierungsprogramm zu welchem Grad in der Lage ist stützstrukturlose Designs zu generieren. Daran anschließend wird die Stützstrukturreduktion um den Aspekt des Leichtbaus erweitert. Es werden Designs generiert, die stützstrukturlos zu fertigen sind und dabei einen geringeren Materialeinsatz notwendig machen als ihr nicht optimiertes Pendant. Gleichzeitig sind die Optimierungsergebnisse mechanisch konkurrenzfähig zum Originalbauteil. Nach der Zusammenfassung der Ergebnisse wird in einem anschließenden Ausblick diskutiert, inwiefern Topologieoptimierung und generatives Design zukünftig im Herstellungsprozess von per metal FFF gefertigten Leichtbauteilen genutzt werden könnte.

2 Einführung in die additive Fertigung

3D-Druck, wer sich für moderne Technologien interessiert, hat diesen Begriff wohl schon öfters vernommen. Ein eindrücklicher Begriff. Mit „Drucken“ ist selbst der/die größte Techniklaie*in vertraut und auch „3D“ ist intuitiv bekannt. Die Zusammensetzung aus beidem trifft es umgangssprachlich zunächst einmal gut. Fachsprachlich beschreibt der 3D-Druck jedoch nur eine Spielart eines größeren Gebiets, der additiven Fertigung. Erneut ein Begriff, der eindrücklich beschreibt, was er meint. Der Fertigungsprozess findet additiv statt. Es wird hinzufügend gearbeitet. Die Quint-Essenz der additiven Fertigung. Statt zu subtrahieren, wie in den klassischen Fertigungsverfahren (drehen, fräsen, bohren etc.), nimmt das Volumen eines additiv gefertigten Bauteils stetig zu. Dabei unterscheiden sich unterschiedliche Verfahren. Ihnen gemein ist: Bauteile werden schichtweise gefertigt. Schrittweise wird eine dreidimensionale Geometrie aus einer Vielzahl dünner Schichten zusammengesetzt.

Die additive Fertigung ist nicht mehr als das neuartige, experimentelle Verfahren zu beurteilen als das sie weiterhin gerne gesehen wird. Das soll nicht heißen, dass die additiven Fertigungsverfahren nicht weiterhin schnell weiterentwickelt werden. Vielmehr soll zum Ausdruck gebracht werden, dass additive Fertigung inzwischen bereits im großen Maßstab Anwendung findet. Sowohl in der Industrie als auch für private Hobbyanwender*innen sind additive Fertigungsverfahren nicht mehr wegzudenken.

Einer der Hauptgründe dafür, ist die geometrische Freiheit, die die additive Fertigung erlaubt. Das additive Vorgehen erlaubt es Hohlräume, Verjüngungen, zu einem gewissen Grad Hinterschneidungen und andere komplexe Geometrien mit vergleichsweise geringem zusätzlichem Aufwand zu realisieren. Ähnlich komplexe Geometrien sind mit klassischen Herstellungsverfahren nur durch bedeutend teurere Werkzeugmaschinen zu realisieren. Ein Vergleich zum Gießen und den dort entstehenden komplexen Geometrien liegt nahe. Das Gießen erfordert einen zusätzlichen Formbau, die additive Fertigung nicht. Somit sind additiv fertigende Werkzeugmaschinen bedeutend flexibler einzusetzen als es beim Guss der Fall ist.

Dieser hohe Grad geometrischer Freiheit macht die additive Fertigung zur gern gewählten Option für die Luft- und Raumfahrt. Hier sind Gewichtsersparnisse von zentraler Bedeutung. Um diese zu maximieren sind optimal an ihre Aufgabe angepasste Bauteile unumgänglich. Das bedeutet im Idealfall Bauteile, die exakt auf die auf sie wirkenden Lasten abgestimmt sind, diesen standhalten und dabei so wenig wiegen, wie möglich. Das ist durch den hohen Grad geometrischer Freiheit in der additiven Fertigung umsetzbar. Gleichzeitig sind weitere Gewichtsersparnisse möglich, indem Bauteile mehrere Funktionen übernehmen. So kann ein Bauteil etwa gleichzeitig mechanischen Belastungen standhalten und über einen integrierten Kanal Schmier- oder Kühlstoffen einen Weg zu ihrem Einsatzort bieten. Ein weiteres Beispiel wären direkt im Druck aufgetragene Leitbahnen, die als Teil der Elektronik in einem Auto, Flugzeug oder Raumfahrzeug dienen. Auch solche innovativen Ansätze werden durch den schichtweisen Aufbau möglich. [33]

3 Fused Filament Fabrication

Das bekannteste 3D-Druck Verfahren ist Fused Filament Fabrication, kurz FFF, ebenfalls bekannt unter den Namen FDM oder FLM. Dabei wird Kunststoff geschmolzen und in Form eines dünnen Stranges abgelegt. Dafür zuständig ist ein Druckkopf, der den Kunststoff aufschmilzt und als Strang extrudiert. Der Druckkopf bewegt sich in einer Ebene. Dabei ist sowohl die Bewegung in der X/Z Ebene als auch in der X/Y Ebene üblich. In Abbildung 1 werden die Achsen eines Druckers zu gezeigt, bei dem sich der Druckkopf in der X/Z Ebene bewegt.

Im Druckkopf sitzt die Druckdüse, über ihr der Extruder. Der Extruder schiebt Filament in die Druckdüse. Diese wird erhitzt und schmilzt das ihr durch den Extruder zugeführte Filament. Extruder und Druckdüse extrudieren so zusammen den abzulegenden Strang.

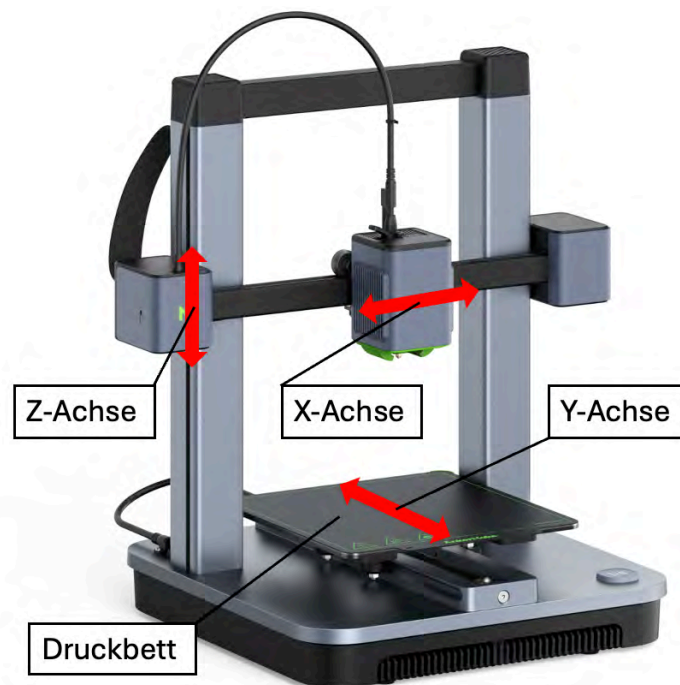


Abbildung 1: Achsen eines FFF Druckers [5]

Orthogonal unter der Druckdüse befindet sich das Druckbett. Auf diesem wird die erste Schicht abgelegt. Für besseren Materialhalt wird das Druckbett oftmals aufgeheizt oder/und der Halt durch Klebstoffe erhöht. Das Druckbett bewegt sich in der verbleibenden Raumrichtung. In den meisten Fällen also in Z oder Y Richtung. Bei der Referenzierung des FFF Verfahrens im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird von der typischen Ausrichtung eines sich in XY Ebene bewegenden Druckkopfs und in Z Richtung aufgebauten Bauteils ausgegangen.

Die Wände der zu druckenden Geometrie werden schichtweise aufgebaut, indem der Kunststoffstrang jeweils auf dem Strang der vorangegangenen Schicht abgelegt wird. Das Innere der Geometrie wird meist nur partiell (etwa 5-30%) in bestimmten Mustern gefüllt, um Kunststoff zu sparen.

Klassischerweise wird im FFF nur ein Werkstoff genutzt. Es existieren allerdings auch Drucker, die den Werkstoff im Druck verändern können. Der genutzte Werkstoff wird meist in Form eines aufgewickelten Drahts, dem sogenannten Filament, zugeführt. Andere Maschinen nutzen Pellets. Zu den gängigsten Werkstoffen gehören PLA, PET, ABS, TPU und PA.

FFF bezeichnet in engerer Auslegung lediglich Drucker, denen der Grundwerkstoff in Form von Filament zugeführt wird. FGF bezeichnet Verfahren, in denen der Grundwerkstoff in Form von Pellets oder Granulat zugeführt wird. Für diese Arbeit ist die Unterscheidung nicht von Relevanz, generalisierend wird im weiteren Verlauf FFF als Überbegriff für die Strang ablegenden additiven Fertigungsverfahren genutzt.

Zunehmend werden auch Werkstoffe genutzt, die zwei Materialien kombinieren. So sind selbst mit Maschinen für den Hobbybereich Kohlenstoff- oder Glasfaser versetzte Filamente, wie PA-CF oder PLA-GF, verarbeitbar. Neben optischer Veränderung des Druckergebnisses wird sich davon eine Verbesserung der Eigenschaften des Bauteils erhofft. Üblicherweise werden für solche Filamente Partikel oder kurze Fasern des sekundären Materials in den primären Kunststoff eingebettet. Dieses Vorgehen wird auch im metal FFF genutzt, für den Metallpartikel in das Filament eingebettet werden. Dazu mehr in Kapitel 3.3. [23][40, S. 12-13]

3.1 Herausforderungen für FFF

FFF bietet mit seiner hohen geometrischen Freiheit, günstigen Maschinen und großen Materialauswahl viele Vorteile. Gleichzeitig bringt das Verfahren Herausforderungen mit sich. Eine zentrale Herausforderung in FFF ist der Umgang mit Stützstrukturen. Der Strang kann, vereinfacht gesagt, nicht in der Luft abgelegt werden. Zumindest ein Teil der vorangegangenen Schicht, muss sich unter der aktuell gedruckten Schicht befinden. Ist das nicht der Fall, müssen Stützstrukturen gedruckt werden, auf denen die Überhänge des Bauteils ruhen können. Stützstrukturen werden häufig in Abwandlung der englischen Übersetzung als Supportstrukturen bezeichnet. In dieser Arbeit werden beide Begriffe analog verwendet. Andere additive Fertigungsverfahren, spezifischer die Pulverbettverfahren, kennen dieses Problem nur in deutlich abgeschwächter Form. In den Pulverbettverfahren wird sukzessive der ganze Bauraum mit Pulver gefüllt. Dieses wird durch den Einsatz einer Energiequelle dort aushärtet, wo sich das zu fertigende Bauteil befindet. Dabei stützt das Pulver entstehende Geometrien ab, Supportstrukturen sind deshalb nur in geringerem Umfang notwendig. Für FFF hingegen sind Stützstrukturen für komplexere Werkstücke oft unumgänglich. Gleichwohl sind Stützstrukturen mit Nachteilen für den Druckprozess behaftet. Auf diese wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen.

Eine weitere Herausforderung für FFF ist die Anisotropie entstehender Bauteile. Während in der XY Ebene ein durchgehender, zusammenhängender Strang abgelegt wird, ist die Verbindung zwischen den einzelnen Schichten oberflächlich. Da diese lediglich aufeinander abgelegt werden, entsteht kein Stoffschluss, wie innerhalb der Schichten selbst. Durch das Ablegen der Schichten entstehen zudem

Kerben an den Rändern der aufeinander abgelegten Schichten, da der Querschnitt des Strangs rund oder oval ist. Insbesondere die Zugfestigkeit in Z-Richtung und die Scherfestigkeit parallel zur XY Ebene, sind aus den genannten Gründen deutlich geringer als bei Bauteilen, die subtraktiv gefertigt oder gegossen werden. [29] [16]

Abbildung 2: additive Fertigungsverfahren im Vergleich [33]

In Abbildung 2 wird dargestellt, welche Stärken und Schwächen FFF gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren bietet. Bezüglich mechanischer Belastbarkeit, Oberflächenqualität und möglicher geometrischer Komplexität schneidet FFF vergleichsweise schlecht ab. Insbesondere pulverbasierte Verfahren (EBM, LBM, SLS) sind in diesen Belangen überlegen.

Vorteil von FFF gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren ist eine hohen Kosteneffizienz und hohe technologische Reife. Zusammenhängende Punkte. Die geringen Kosten pro Bauteil erlauben, in Kombination mit geringen Maschinenkosten, den Einsatz von FFF-Maschinen mit geringem finanziellem Risiko. Das führte zur schnellen Verbreitung von FFF, was wiederum Anreiz für die schnelle Weiterentwicklung der Technologie war, um sich gegenüber Konkurrenzanbieter*innen durchzusetzen. Einfluss auf die weite Verbreitung von FFF hat zudem die vergleichsweise einfache und ungefährliche Anwendung des Verfahrens. Der Umgang mit den zugeführten Grundwerkstoffen ist bedeutend einfacher als etwa in den Pulverbettverfahren. Filament oder Granulat für FFF/FGF Drucker kann meist ohne zusätzliches Equipment in den Drucker eingesetzt und innerhalb weniger Minuten

getauscht werden. In den Pulverbettverfahren besteht stets die Gefahr von Kreuzkontamination, ein gründliches Reinigen des Druckers ist unumgänglich. Außerdem erfordern sowohl SLS als auch EBM und LBM Abkühlzeiten nach dem Drucken, bevor die Teile weiterverarbeitet werden können. Diese sind notwendig, um Verformungen der Bauteile zu vermeiden und die bestmöglichen mechanischen Eigenschaften sicherzustellen. FFF Teile können hingegen direkt nach dem Druck weiterverarbeitet werden. [26] [17]

3.2 Designgrundlagen für FFF

FFF erfordert einige spezielle Designregeln. Verglichen zu den subtraktiv fertigenden Herstellungsverfahren erlaubt FFF zwar besondere Freiheiten, gleichzeitig gilt es aber auch bestimmte Regeln einzuhalten, um Designs zu realisieren, die mit FFF gefertigt werden können. Diese werden in der VDI 3405, Blatt 3.4 beschrieben. [36]

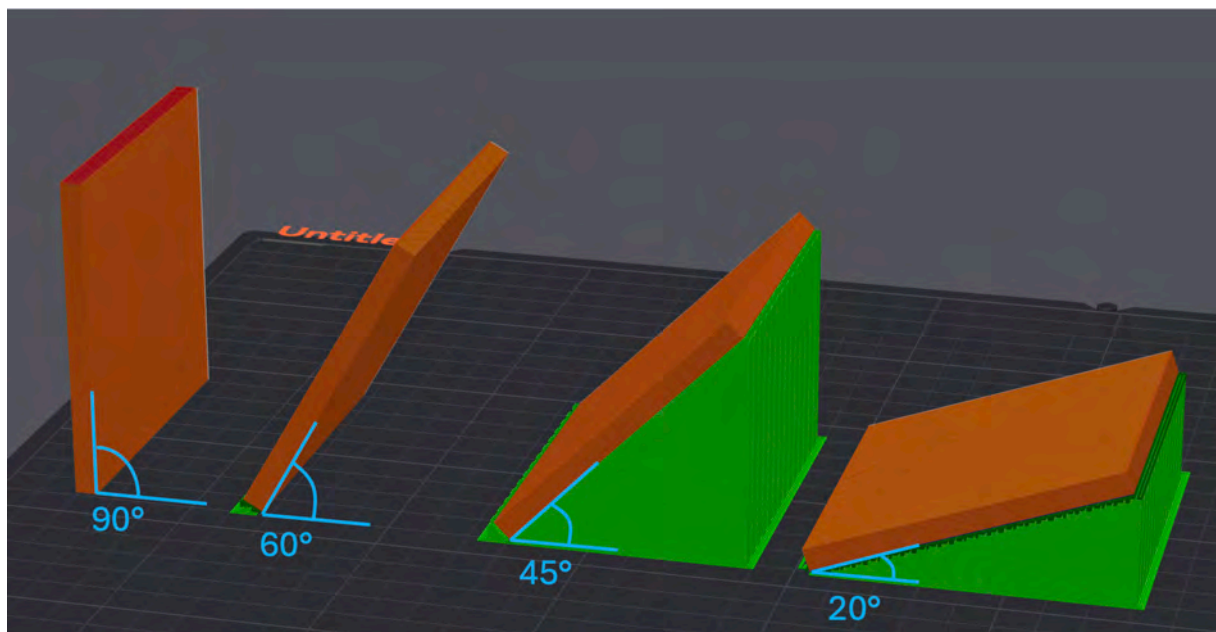


Abbildung 3: Downskinflächen unterschiedlicher Überhangswinkel

Zentral ist dabei der Winkel zwischen Downskinfläche und Druckplatte, genannt Überhangswinkel. Downskinflächen sind Flächen, deren Winkel gemessen zur Druckplatte $< 90^\circ$ ist. Einfach gesagt: Unterseiten. Unterschreitet der Winkel einen festgelegten Schwellwert, werden Supportstrukturen notwendig. Für FFF liegt dieser Schwellwert typischerweise bei 45° . Je nach Anwendung des Druckteils, seiner Geometrie, dem gewählten Druckmaterial und weiteren Randbedingungen variiert der gewählte Wert und muss für jedes Bauteil angepasst werden. In Abbildung 3 wird gezeigt, wie der Überhangswinkel und die Downskinflächen definiert sind. Zudem werden in grün Supportstrukturen für Überhangswinkel $\leq 45^\circ$ abgebildet. [36, S. 12]

An dieser Stelle bietet es sich an die Eigenheiten von Stützstrukturen zu besprechen und zu klären, warum sie generell vermieden werden sollten, wenn möglich. Stützstrukturen sind Hilfsstrukturen, auf

denen ein Druckteil oder Teile eines Druckteils ruhen. Sie stützen dort ab, wo das Bauteil sich nicht selbst stützen kann. Stützstrukturen sind stellenweise unumgänglich, ihre Minimierung dennoch wünschenswert. Denn Stützstrukturen weisen negative Auswirkungen auf das Druckteil und den Druck auf. Um die zusätzlichen Strukturen zu drucken, braucht es zusätzliche Zeit und zusätzliches Material. Um diese zwei Effekte möglichst zu minimieren, werden Stützstrukturen filigraner gedruckt als das eigentliche Druckteil. Das kann wiederum dazu führen, dass Stützstrukturen abbrechen. Sie können so ihren Zweck nicht mehr erfüllen, der Druck scheitert. Somit sind Stützstrukturen eine zusätzliche Fehlerquelle. Um stützen zu können, ist eine physische Verbindung zwischen den Stützstrukturen und dem Druckteil notwendig. Diese Verbindung ist nach Beendigung des Drucks nicht mehr gewünscht und muss entfernt werden. Das kann sich negativ auf die Oberflächenqualität der Downskinflächen auswirken. Zudem wird zusätzliche Nacharbeit zum Entfernen der Supportstrukturen notwendig. Nach dem Druck erfüllen die Supportstrukturen keinen Zweck mehr und werden im Normalfall vernichtet, im Best-Case recycelt. Somit erhöhen Stützstrukturen den Materialverbrauch und die Entsorgungskosten.

Die genannten Auswirkungen sind kaum allgemeingültig zu beschreiben. Welche von ihnen in welcher Ausprägung auftreten, hängt von den einer Vielzahl von Faktoren ab. So haben unter anderem das gewählte Druckmaterial, der gewählte Drucker, die Druckgeschwindigkeit, äußere Faktoren und die Geometrie selbst einen Einfluss auf die Ausprägung der Stützstruktur und ihren Einfluss auf das Druckteil selbst. Festzuhalten bleibt, dass Stützstrukturen umgangen werden sollten, wenn möglich.

Entsprechend der Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Stützstrukturen, existieren eine Vielzahl an Möglichkeiten diese zu vermeiden oder ihren negativen Einfluss zu minimieren. So existieren etwa Drucker, die Stützmaterial aus einem anderen Material drucken als das Druckteil selbst. Dieses Material wird so gewählt, dass es einfach entfernt werden kann. Es bieten sich lösliche Werkstoffe oder Werkstoffe mit schlechter Haftung zum Werkstoff des Druckteils an. Ist Support nicht gänzlich zu vermeiden, kann sein Einsatz zumindest reduziert werden. Möglichkeiten dafür werden im Kapitel 4 beschrieben.

Weitere Einschränkungen der möglichen Geometrien für FFF ergeben sich durch den schichtweisen Aufbau während der Fertigung. So sind bestimmte Geometrien erst ab oder nur bis zu bestimmten Größen zu drucken. Dafür sind zwei Einflussfaktoren verantwortlich: Die Geometrie der abgelegten Schicht und der Treppenstufeneffekt. Um die folgenden Richtungsangaben in diesem Kapitel eindeutig zu gestalten, soll Abbildung 1 als Referenz genutzt werden.

Der Treppenstufeneffekt bezieht sich auf die Oberflächenstruktur eines Druckteils mit geneigten Außenflächen. Hier ist die Kontur der einzelnen aufeinanderliegenden Schichten zu erkennen, was an eine Treppe erinnern kann. Daher der Name. Der Treppenstufeneffekt lässt sich durch die Reduzierung der Schichthöhe abschwächen, jedoch nicht vollständig eliminieren. Entsprechend hat der Effekt Auswirkungen auf Approximationsgenauigkeit gedruckter Konturen. Zudem verstärkt er die Entstehung

von Kerben zwischen den gedruckten Schichten und beeinflusst so die Stabilität des Bauteils negativ. [36, S. 4]

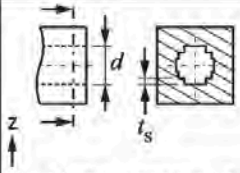
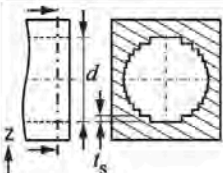
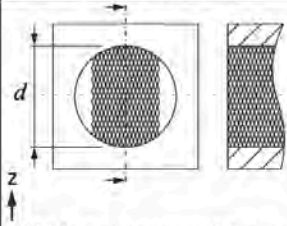
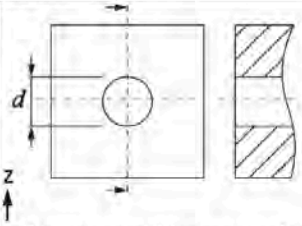
Waagrecht: $d \geq 2 \text{ mm } (d \gg 2 t_s)$	 nicht fertigungsgerechter minimaler waagerechter Bohrungsdurchmesser	 fertigungsgerechter minimaler waagerechter Bohrungsdurchmesser
Numerische Werte $d \leq 10,0 \text{ mm}$	Nicht fertigungsgerecht  nicht fertigungsgerechter maximaler waagerechter Bohrungsdurchmesser, bei dem eine Stützkonstruktion notwendig wird	Fertigungsgerecht  fertigungsgerechter maximaler waagerechter Bohrungsdurchmesser ohne Stützkonstruktion

Abbildung 4: Designempfehlungen für Bohrungen im FFF [36, S. 10]

Zu Tage tritt der Treppenstufeneffekt bei Bohrungen, deren Mittelachse nicht parallel zur Z-Achse verläuft. Besonders bei kleinen Bohrungen kann die Kontur der Geometrie durch den Treppenstufeneffekt um ein relevantes Maß verändert werden. Es empfiehlt sich ein Bohrungsdurchmesser deutlich größer als zwei Schichtdicken. Als Referenzwert können zunächst 2 mm angenommen werden. Gleichzeitig dürfen solche nicht parallel zur Z-Achse gedruckten Bohrungen nicht zu groß gedruckt werden. Je größer der Durchmesser, desto größer die ungestützten Flächen in der oberen Hälfte der Bohrung. Es wird ein maximaler Durchmesser von 10 mm angesetzt, bevor Stützmaterial angedacht werden sollte. Die Designrichtlinien für die beschriebenen Bohrungen werden in Abbildung 4 dargestellt. [36, S. 10]

Numerische Werte $b_{\text{over}} \leq 2,5 \text{ mm}$	Nicht fertigungsgerecht  technische Zeichnung für einen nicht fertigungsgerechten Überhang mit der Breite b_{over} b_{over} Überhangbreite	Fertigungsgerecht  technische Zeichnung für einen fertigungsgerechten Überhang mit der Breite b_{over} b_{over} Überhangbreite
--	---	---

Abbildung 5: Konstruktionsgerechtes Design eines Überhangs für FFF [36, S. 15]

Generell wird für ungestützte Überhänge, einen 90° Winkel zwischen Wand und Überhang vorausgesetzt, mit maximal 2,5 mm Überstand kalkuliert, bevor Stützstrukturen notwendig werden. Ein Beispiel für einen konstruktionsgerechten Überhang wird in Abbildung 5 dargestellt. [36, S. 15]

Numerische Werte	Nicht fertigungsgerecht	Fertigungsgerecht
$\delta_{cr} = 45^\circ$ $\delta \geq \delta_{cr}: l/D \leq 5$ $\delta = 90^\circ: l/D \leq 10$	 nicht fertigungsgerechter zylindrischer Stift mit $\delta \geq \delta_{cr}$ und zu großem Verhältnis l/D	 fertigungsgerechte Konstruktion mit zylindrischen Stift, minimalem herstellbaren Downskin-Winkel $\delta = \delta_{cr}$ und zulässigem l/D -Verhältnis

Abbildung 6: Designregeln für angewinkelte Überstände in FFF [36, S. 11-13]

Bei angewinkelt gedruckten Überhängen gelten andere Werte. Der nicht zu unterschreitende Winkel zwischen Downskinfläche und Druckbett von 45° wurde bereits thematisiert. Neben dem Überhangswinkel ist auch die Länge des Überhangs zu bedenken. Je länger die ungestützte Fläche, desto höher die Wahrscheinlichkeit eines Versagens unter dem eigenen Gewicht. Bei freistehenden Geometrien ist insbesondere ein Lösen von der Druckplatte zu befürchten. Um das zu vermeiden, gilt es bei dem Verhältnis zwischen Länge und Dicke des Überhangs 5 zu 1 nicht zu überschreiten. In Abbildung 6 wird dargestellt, wie angewinkelte Überstände zu designen sind. [36, S. 14]

Für Ausprägungen des Druckteils parallel zum Druckbett sind ebenfalls Einschränkungen zu bedenken. Hier ist die Breite des abgelegten Strangs von zentraler Bedeutung. Die Strangbreite ist begrenzend für die minimale Wandstärke. Als empfehlenswert gilt es mindestens zwei Bahnen pro Wand vorzusehen. Die minimale Wandstärke sollte somit das Doppelte der Strangbreite betragen. Das kann auf freistehende Zylinder übertragen werden. Diese sollten einen Durchmesser von wenigstens 2 Strangbreiten aufweisen, je höher der Zylinder ist, desto größer muss der Durchmesser gewählt werden, um Maßgenauigkeit einhalten zu können. [36, S. 14]

Bohrungen mit Mittelachse parallel zur Z-Achse sind leichter zu realisieren als anders ausgerichtete Bohrungen. Ihr maximaler Durchmesser ist nicht beschränkt, die vorgegebene Kontur kann, dank ausbleibenden Treppenstufeneffekts, genauer eingehalten werden. Als minimalen Durchmesser für Bohrungen mit Mittelachse parallel zur Z-Achse werden 2 mm, mindestens jedoch das Doppelte der Strangbreite empfohlen. [36, S. 10]

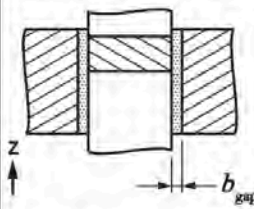
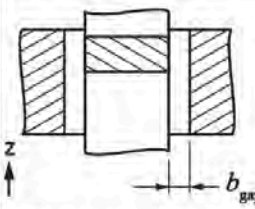
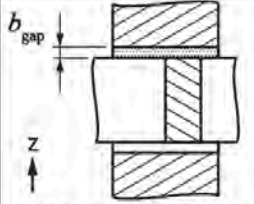
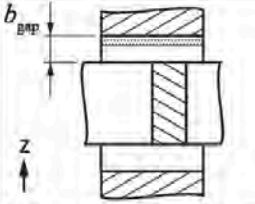
Numerische Werte	Nicht fertigungsgerecht	Fertigungsgerecht
Senkrecht: $b_{\text{gap}} \geq 0,2 \text{ mm}$	 nicht fertigungsgerechtes Spaltmaß mit der Spaltbreite b_{gap}	 fertigungsgerechtes Spaltmaß mit der Spaltbreite b_{gap}
Waagrecht: $b_{\text{gap}} \geq 0,3 \text{ mm}$ oder $b_{\text{gap}}(\text{senkrecht}) + 0,1 \text{ mm}$	 nicht fertigungsgerechtes Spaltmaß mit der Spaltbreite b_{gap}	 fertigungsgerechtes Spaltmaß mit der Spaltbreite b_{gap}

Abbildung 7: Richtwerte für minimale Spaltbreiten in FFF [36, S. 17]

Für FFF gilt es minimale Spaltmaße einzuhalten. So kann das Verkleben zwischen angrenzenden Geometrien verhindert werden. Das minimale Spaltmaß liegt bei 0,2 mm für Spalte parallel zur Z-Achse. Spalte orthogonal zur Z-Achse müssen mit Support gefüllt werden, um darüber liegende Geometrien zu tragen. Das minimale Spaltmaß ist dafür höher zu wählen, 0,3 mm gelten als erster Richtwert. Eine grafische Darstellung der minimalen Spaltmaße ist in Abbildung 5 zu finden. Für die Fertigung beweglicher Teile ist das minimale Spaltmaß höher anzusetzen, 0,3 mm für Spalte parallel zur Z-Achse gelten als erster Richtwert. [36, S. 17-19]

Diese, der VDI 3405 Blatt 3.4 entnommenen, Gestaltungsempfehlungen sind als erste Richtwerte zu betrachten. Diese gilt es an die genutzte Maschine, das genutzte Filament, das zu druckendes Objekt, seinen Einsatzzweck und die gewählten Prozessparameter anzupassen.

3.2.1 Bauteilorientierung

Im FFF ist die Genauigkeit parallel zur Bauplatte – also in der XY-Ebene – am größten. Ist Parallelität zwischen zu druckender Geometrie und Bauplatte nicht gegeben, können Rundungen aufgrund des Treppenstufeneffekts nur mit eingeschränkter Genauigkeit gedruckt werden. Dabei hängt die Genauigkeit von der gewählten Schichthöhe ab. Schräg gedruckte Geometrien werden am ungenauesten approximiert, da der Treppenstufeneffekt am stärksten ausgeprägt ist und in vielen Fällen Stützstrukturen notwendig werden. Dabei müssen unterschiedliche Schrägstellungen unterschieden werden. So hat die Rotation eines Bauteils um seine Z-Achse keinerlei Auswirkungen auf den Treppenstufeneffekt. Rotation um die X- oder die Y-Achse wirken sich hingegen auf den Treppenstufeneffekt aus. Im Optimalfall wird das Bauteil so ausgerichtet, dass Funktionsflächen parallel zum Druckbett liegen. Für Bohrungen bedeutet das Parallelität ihrer Mittelachse zur Z-Achse. Minimiert werden sollten Funktionsflächen, die weder parallel noch orthogonal zur Z-Achse liegen. [25, S. 4], [24]

Gleichzeitig beeinflusst die Ausrichtung des Bauteils die notwendige Menge an Support. Eine Ausrichtung des Bauteils nach der Lage seiner Funktionsflächen ist zunächst sinnvoll, kann allerdings bedeuten, dass mehr Support benötigt wird als bei einer alternativen Ausrichtung. Dieser zusätzliche Support kann wiederum negative Auswirkungen auf die Oberflächenqualität und die Stabilität des Bauteils haben. Hier ist die Anisotropie von FFF Bauteilen durch den schichtweisen Aufbau von zentraler Bedeutung. Zudem kann die Genauigkeit des Drucks durch die notwendig werdende Supportstruktur negativ beeinflusst werden.

Ein weiterer zu beachtender Punkt ist die Bauteilhaftung am Druckbett. Anders als etwa beim Drehen oder Fräsen, wird das Bauteil im FFF nicht durch spezielle Spannkonstruktionen befestigt. Vielmehr hält es durch die gleichen Kräfte am Druckbett, die auch die einzelnen Schichten zusammenhalten. Wie auch bei den Schichten, steigt die Haftung am Druckbett mit steigender Kontaktfläche. Im Sinne der Druckbetthaftung ist die optimale Bauteilausrichtung also eine, in der ein möglichst großer Teil des Bauteils Kontakt zum Druckbett hat. Nicht gestützte Überhänge wirken sich negativ auf die Bauteilhaftung aus, da sie als Hebel die Kräfte (Schwerkraft, Kräfte während des Druckprozesses), die auf das ganze Bauteil wirken, potenzieren. [36, S. 4]

Weiterhin beeinflussen wirtschaftliche Überlegungen die Bauteilausrichtung. Die Auswirkungen eines nicht optimal gefüllten Bauraums sind im FFF weniger gravierend als in den Pulverbettverfahren. In diesen hängt die Druckzeit maßgeblich von der Höhe der Druckteile ab. Bleibt diese gleich steigt die Druckzeit bei ausgefülltem Druckraum insignifikant gegenüber einem nur geringfügig ausgefülltem Druckraum, was die optimale Ausnutzung des Druckraums essenziell macht. Im FFF steigt die Druckzeit mit zunehmender Füllung des Druckraums hingegen annähernd linear. Dennoch profitiert auch der FFF von einem optimal gefüllten Bauraum. Je mehr Teile gleichzeitig gedruckt werden, desto geringer die Stillstandszeiten pro Teil und desto geringer die notwendige manuelle Interaktionszeit mit dem Drucker. [36, S. 4]

3.3 FFF für Metallbauteile

Als metal FFF wird die Herstellung von Metallbauteilen unter Einsatz von FFF bezeichnet. Wie Abbildung 2 zu entnehmen ist, ist FFF eins der kosteneffektivsten additiven Fertigungsverfahren. Gleichzeitig sind die mechanischen Eigenschaften von FFF Bauteilen denen anderer additiver Fertigungsverfahren unterlegen. Ein Grund dafür ist der Einsatz von Kunststoffwerkstoffen. Der Einsatz metallischer Werkstoffe hat das Potenzial die mechanischen Eigenschaften von FFF Bauteilen zu verbessern. Insgesamt soll metal FFF somit eine günstige und flexible Option bieten, um Metallteile additiv zu fertigen. Wie in Kapitel 3 beschrieben können Partikel eines Werkstoffs in einen anderen Werkstoff eingelassen werden, um die Eigenschaften des damit gedruckten Bauteils zu verändern. Für metal FFF wird Metall in einen Kunststoffgrundwerkstoff eingelassen. Das so kombinierte Material wird anschließend auf einem FFF Drucker verdruckt. Das spezielle Filament und die Anforderungen an das Druckteil stellen den Fertigungsprozess vor Herausforderungen. [15]

Grundsätzlich besteht metal FFF aus drei Schritten, diese werden in Abbildung 8 dargestellt. Zunächst wird das Teil gedruckt, anschließend der Kunststoffanteil des Werkstoffs, genannt Binder, daraus entfernt und das Teil im Anschluss gesintert. Zentral für diesen Prozess ist der genutzte Werkstoff. Enthält dieser einen hohen Anteil eines einfach zu verdruckenden Kunststoffs lässt er sich besser drucken als ein Werkstoff mit geringem Kunststoffanteil. Gleichzeitig sollte der Kunststoffanteil im Werkstoff möglichst gering sein, um nach dem Sintern ein möglichst stabiles Bauteil erzeugt wurde. [34, S. 15]

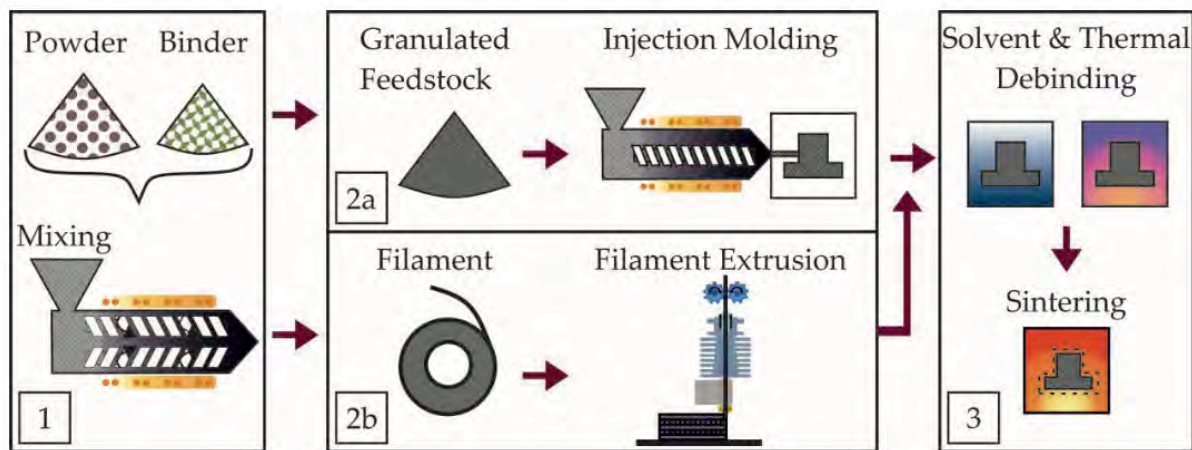


Abbildung 8: Schematischer Ablauf des metal FFF Prozesses im Vergleich zum Spritzguss für metallische Bauteile. Metal FFF unten

Ein Werkstoff für metal FFF enthält 45-65 Volumenprozent Metallpulver, der Rest ist Binder. Das Metallpulver besteht aus sphärischen Partikeln mit einem typischen Durchmesser von $<45 \mu\text{m}$. Der Binder besteht aus mehreren Komponenten. Diese erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Der Binder macht den Druck auf einer FFF Maschine möglich. Zusätzlich ist er dafür verantwortlich, dass das Teil in der Drucknachbereitung seine Form beibehält. Dafür muss der Binder für hohe Stabilität bei Raumtemperatur und gute Flusseigenschaften bei der Extrusionstemperatur sorgen. Zudem muss der Binder rückstandslos entfernt werden können und für eine gleichmäßige Verteilung des Metallpulvers im Druckteil sorgen. Um diese Aufgaben erfüllen zu können besteht der Binder meist aus mehreren, chemisch löslichen, Kunststoffen. Dazu kommen Additive, die etwa die Flusseigenschaften oder die Partikelverteilung im Druck verbessern. [34, S. 13-17]

Im ersten Schritt entsteht aus dem Grundwerkstoff ein Grünteil. Hier kommt FFF zur Anwendung. Dabei gilt es Eigenheiten des Metall-FFF zu bedenken. Die Druckerdüse muss groß genug sein, um verstopfen zu vermeiden. Da das Filament nicht vollständig aufgeschmolzen wird, das Metallpulver ändert im Druck seine Phase nicht, neigt es zum Verstopfen der Druckdüse. Gleichzeitig wird der Zusammenhalt der Schichten durch das eingebettete Metallpulver verschlechtert. Nur die Flächen, an denen sich zwischen zwei Schichten Binder und Binder berühren, sind für den Halt der Schichten untereinander verantwortlich. Zudem muss beim Druck darauf geachtet werden, dass ungewollte Hohlräume im

Druckteil minimiert werden. Diese können etwa zwischen Infill und Außenschichten oder zwischen zwei Druckschichten entstehen und die anschließenden Bearbeitungsschritte behindern. [34, S. 17-19]

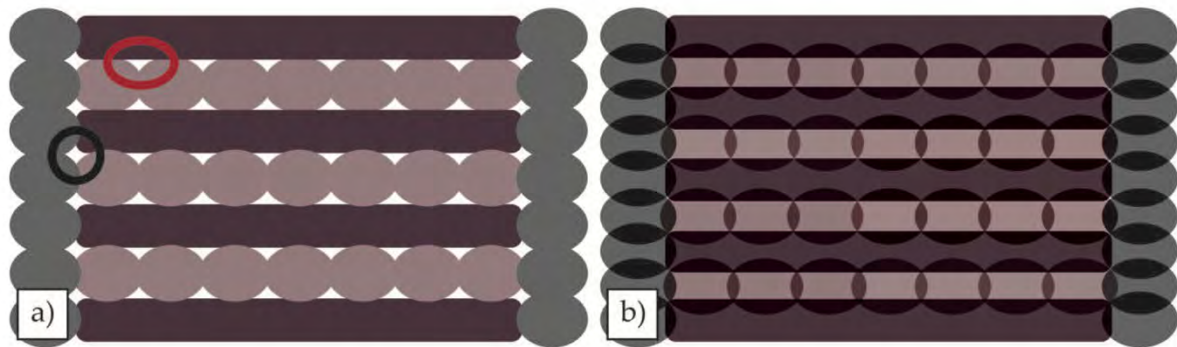


Abbildung 9:a: Ungewollte Hohlräume zwischen den einzelnen abgelegten Strängen.

b: Ungewollte Zwischenräume durch Überextrusion mit Filament gefüllt. [34, S. 19]

Gewählt wird für metal FFF ein 100%iger Infill. Anders als im klassischen FFF werden Bauteile also vollständig ausgefüllt. Üblich für metal FFF ist ein linearer Infill, dessen Richtung jede Schicht um 90° alterniert. Überextrusion, also das bewusste Extrudieren von mehr Material als eigentlich für die gewählten Druckparameter notwendig, füllt ungewollte Hohlräume auf und schließt diese so. Grafisch dargestellt wird die Füllung ungewollter Hohlräume in Abbildung 9. Das so entstandene Grünteil kann spanend bearbeitet werden. [34, S. 17-20]

Für den Druck ist der Binder unumgänglich, danach muss dieser entfernt werden, um die gewünschten Materialeigenschaften zu erreichen. Dafür wird ein zweistufiger Prozess genutzt. Zunächst wird ein Großteil des Binders chemisch entfernt, Reste dann thermisch entfernt. Je nach Binder können im primären, chemischen, Entbindern 1,5 bis 2 mm Bauteilstärke pro Stunde vom Binder befreit werden. Ziel des chemischen Entbinderns ist es Hohlräume, Kanäle zwischen den Metallpartikeln zu schaffen. Durch diese können im thermischen Entbindern die letzten Binderreste entweichen. Der Großteil des Binders wird im ersten Schritt entfernt. Im thermischen Entbindern werden die letzten Reste des Binders entfernt. Das Bauteil wird dafür über die Zersetzungstemperatur der Binderkomponenten erhitzt. Die Binderreste werden entsprechend zersetzt und entweichen. Dafür sind die im ersten Schritt des Entbinderns entstanden Kanäle unumgänglich. Um das zuverlässige Entweichen zu begünstigen, sind eine Schutzatmosphäre und langsame Aufheiztemperaturen empfehlenswert. Das vollständige Entfernen des Binders schwächt das Bauteil. Dies gilt es beim Design dessen und beim Design vorgesehener Stützstrukturen zu beachten. Durch den Binder auch ohne Stützstrukturen haltende Strukturen, können etwa unter ihrem eigenen Gewicht zusammenbrechen, wenn der Binder entfernt wird. Um die Stabilität wieder zu erhöhen, kann direkt im Anschluss an das thermische Entbindern, eine weitere Temperaturerhöhung stattfinden. So können sich erste Sinterhalse bilden. Durch diesen

Vorsinterschritt wird die Festigkeit des hochporösen Pulverkörpers wieder erhöht. Gleichzeitig findet bereits eine signifikante Verdichtung und Schrumpfung des Bauteils statt. [34, S. 20-26]

Im letzten Prozessschritt erhält das Bauteil seine endgültigen mechanischen Eigenschaften. Insbesondere wird die Dichte des Bauteils gesteigert. Nach dem Entbindern ist das Bauteil weiterhin porös und weist durch die verbleibenden Kanäle und Hohlräume eine relative Dichte von lediglich rund 65-80% auf. Durch das Sintern kann die relative Dichte des Bauteils auf 95 – 98% erhöht werden. Eine weitere Steigerung der relativen Dichte kann durch anschließende Prozesse, etwa HIP erreicht werden. Mit der Steigerung der relativen Dichte, geht das Schrumpfen des Bauteils einher. Im Sinterprozess schrumpft das Teil um 15 bis 25%, wenn eine relative Dichte von wenigstens 95% erreicht wird. Dabei kann es zu ungleichmäßiger Schrumpfung kommen. Das schichtweise Aufbauen des Bauteils sorgt für ungleichmäßige Verteilung des Metallpulvers im Bauteil, was sich beim Sintern durch eine höhere Schrumpfung in Aufbaurichtung bemerkbar machen kann. Weiterhin können Oxidschichten den Sinterprozess behindern. Die hochporösen Bauteile nach dem Entbindern haben eine gesteigerte Oberflächengröße und neigen zu Oxidbildung. Wie bereits beim thermischen Entbindern ist eine Schutzatmosphäre für einen problemlos ablaufenden Sinterprozess von Vorteil. metal FFF Bauteile sind durch den Sinterprozess weniger anisotrop als klassische FFF Bauteile, vollständig isotrope Materialeigenschaften werden allerdings nicht erreicht. [34, S. 10], [34, S. 26-31] [28]

3.3.1 Designen für den metal FFF

Ein optimal für die Herstellung mittels metal FFF designtes Bauteil, muss die Designprinzipien für FFF einhalten und gleichzeitig für die zusätzlichen Prozessschritte im metal FFF ausgelegt sein. Neben den Designprinzipien für FFF muss also das Entbindern und das Sintern bedacht werden. Einen konkreten Einblick in das für metal FFF optimierte Design bietet Markforged. Der Hersteller für metal FFF Equipment stellt einen Design Guide für sein Metal X System™ zur Verfügung. Ein Vergleich zwischen diesem Design Guide und den bereits herausgearbeiteten Besonderheiten von metal FFF und den Designprinzipien im FFF ergibt ein kohärentes Bild der Designvorschriften für metal FFF. [25]

Für den ersten Prozessschritt – FFF mit kombiniertem Werkstoff aus Metallpulver und Binder – müssen die in Kapitel 3.2 genannten Regeln für das Konstruieren von FFF Bauteilen beachtet werden. metal FFF unterliegt den gleichen Einschränkungen, wie der FFF generell. Zusätzlich müssen andere Punkte bedacht werden.

Die Kombination zweier Materialien als Werkstoff für metal FFF hat Auswirkungen auf die Druckbetthaftung. Während für optimale mechanische Eigenschaften des fertigen Bauteils hohe Anteile an Metall im Grundwerkstoff notwendig sind, beschränken sie im Druck die Druckbetthaftung. Wie auch bei der Haftung zwischen zwei gedruckten Schichten, trägt das Metall im Filament nicht zum Halt am Druckbett bei. Lediglich der Binder ist für diesen zuständig, wie in Kapitel 3.3 hergeleitet. Die Bauteilhaftung ist im metal FFF entsprechend schlechter als im klassischen FFF, was etwa durch

Klebstoffe auf dem Druckbett revidiert werden kann. Im Design für metal FFF können größere Flächen mit Druckbettkontakt vorgesehen werden, um die Druckbetthaftung zu verbessern.

Für das Entbindern müssen ebenfalls Punkte bedacht werden. Das hängt insbesondere mit der hohen Porosität zusammen, die das Bauteil während des Entbinderns zwingend aufweist. Selbst für Überhänge, die im klassischen FFF möglich sind, können Stützstrukturen notwendig werden. Je filigraner das Bauteil, desto größer die Chance, dass es das Entbindern nicht übersteht. Gleichzeitig gilt es die notwendige Zeit für das Entbindern zu beachten. Beim Entbindern sorgen gleichmäßige Wandstärken für eine gleichmäßige Entfernung des Binders. Hohe Wandstärken oder größere Materialansammlungen erhöhen die notwendige Zeit für das Entbindern. Dicken größer als 10 mm gilt es für metal FFF Bauteile zu vermeiden, da sonst die Penetration des Lösungsmittels beim Entbindern nicht sichergestellt werden kann. Beim Sintern sorgen gleichmäßige und geringe Dicken für ein gleichmäßiges Schrumpfen des Bauteils. Ein Beispiel für Bauteilgestaltung mit gleichmäßigen Wandstärken wird in Abbildung 10 gezeigt. [10]

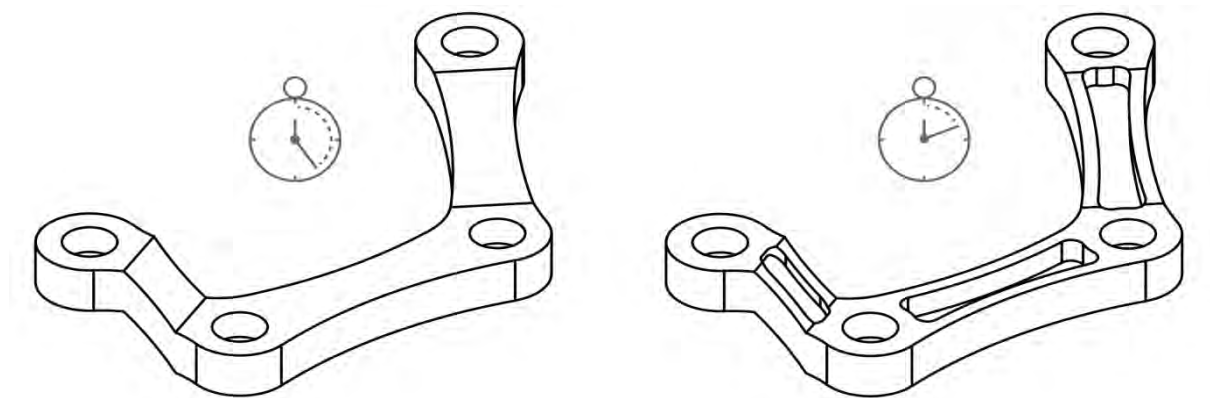


Abbildung 10: Links nicht optimiertes Bauteil. Rechts: Gleichmäßige Wandstärken sorgen für schnelleres Entbindern [25, S.5]

Bereits im Druck realisierte Kanäle im Bauteil sorgen dafür, dass der Binder optimal entweichen kann und sich neue Kanäle beim Entweichen des Binders optimal bilden können. Der Grundwerkstoff hat ebenfalls Auswirkungen auf den Druckprozess. Ist das Metallpulver bereits in diesem nicht gleichmäßig verteilt, kann es zu einer fluktuierenden Verteilung des Metalls im Bauteil kommen, ein gleichmäßiges Entbindern kann so nicht sichergestellt werden. [25]

Der nächste Prozessschritt bedingt ein zentrales Designelement für metal FFF. Beim Sintern schrumpft das Bauteil, diese Schrumpfung muss im Designprozess beachtet werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die Schrumpfung nicht zwingend gleichmäßig abläuft. Eine größere Schrumpfung in Aufbaurichtung ist, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, nicht ungewöhnlich. Gleichmäßige Wandstärken sind auch für das Sintern von Bedeutung, um eine gleichmäßige Schrumpfung des Bauteiles zu gewährleisten und das Entstehen von Spannungen im Bauteil zu verhindern. Da das Bauteil während des Sinterns, je nach Material, fast auf Schmelztemperatur aufgeheizt wird, sollten filigrane Formen und

große Überhänge vermieden werden. Ihr Eigengewicht kann bei der hohen Temperatur ausreichen, um zum Versagen der Geometrie zu führen. Dünne und hohe Geometrien neigen ebenfalls zum Versagen bei den hohen Temperaturen des Sinterns. Geometrien deren Höhe ihre Breite um das Sechsfache überschreiten sollten entsprechend vermieden werden. Rippen oder gezielte Geometrieveränderungen können dem Problem vorbeugen. Scharfe Kanten gilt es zu vermeiden, um durch die Hitze entstehende Spannungen im Bauteil abzumildern zu so Verzug vorzubeugen. Große Flächen, insbesondere dünne große Flächen, aber auch plötzliche Querschnittsänderungen im Bauteil neigen beim Sintern zu Verzug, schon im Druck dafür eingeplante Stützstrukturen oder das Vermeiden solcher Geometrien, kann Abhilfe schaffen. Insgesamt stellt das Kollabieren des Bauteils unter seinem eigenen Gewicht ein reelles Risiko beim Sintern dar. Die beschriebenen Maßnahmen können dieses Risiko minimieren. [34, S. 10]

[25]

4 Stützstrukturreduktion

In Kapitel 3.2 wird diskutiert, warum Stützstrukturen sich negativ auf Druckergebnisse auswirken und nach Möglichkeit verhindert werden sollen. Dazu bieten sich verschiedene Möglichkeiten an. Grundsätzlich können zwei Ansätze gewählt werden. Wird ein Teil von Grund auf neugestaltet und es ist bereits bekannt, dass dieses im metal FFF gefertigt wird, kann im ganzen Designprozess die Stützstrukturreduktion beachtet werden. Das Teil kann optimal an die Herstellungsmethode angepasst werden. Dieses Best-Case Szenario macht es möglich den Grad der Stützstrukturreduktion zu maximieren.

Das andere Szenario ist ein bereits fertig designtes Bauteil, das nun ohne Designänderungen mit Hilfe von metal FFF hergestellt werden soll. Auch hier gibt es Methoden, um den Einsatz von Stützstrukturen zu minimieren. Natürlich können diese prozessorientierten Stützstrukturreduktionsmaßnahmen auch bei bereits im Design optimierten Bauteilen angewandt werden.

4.1 Stützstrukturreduktion im Druckprozess

Steht das Design des zu fertigenden Bauteils bereits fest, können zwei Maßnahmen in hohem Maße zur Reduktion notwendiger Stützstrukturen beitragen. Die Ausrichtung des Bauteils kann so optimiert werden, dass Downskinflächen mit einem Downskinwinkel $< 45^\circ$ bzw. kleiner als der zulässige Überhangswinkel minimiert werden. Die optimale Ausrichtung des Bauteils kann so den notwendigen Support minimieren. Zusätzlich können die Supportstrukturen manuell angepasst werden. Die automatisierte Erzeugung von Supportstrukturen bezieht oftmals nicht alle Designregeln für FFF und die Eigenheiten des jeweiligen Bauteils mit ein. Das manuelle Anpassen der erzeugten Supportgeometrien kann Stützstrukturen auf das tatsächlich notwendige Minimum reduzieren. Allerdings ist dafür ein hohes Maß an Verständnis des genutzten Druckers, der verwendeten Einstellungen, des herzustellenden Bauteils und des genutzten Materials notwendig.

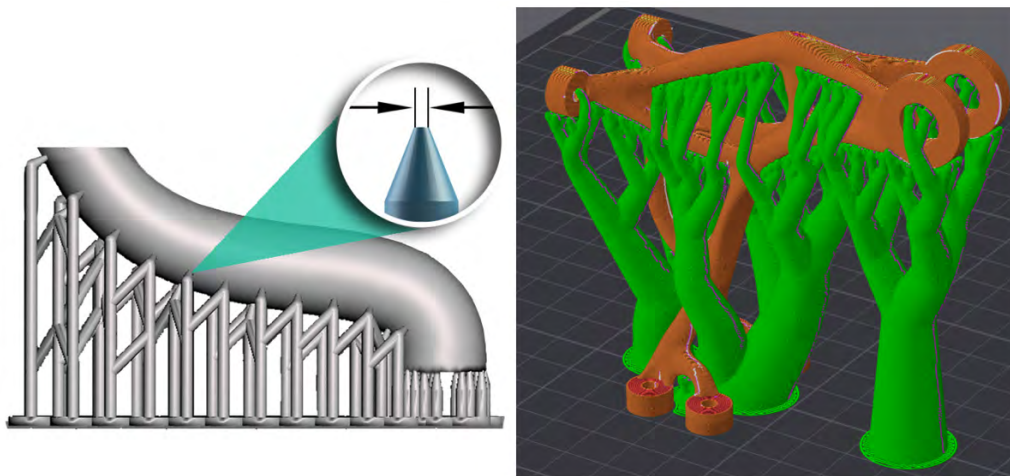


Abbildung 11: Spitz zulaufender Support für Resin basierte additive Fertigungsverfahren links, Tree-Support rechts [12]

Zudem können die Einstellungen in der Supportgenerierung so angepasst werden, dass der Einsatz von Support minimiert wird, bzw. dessen negativen Auswirkungen minimiert werden. Dafür kann etwa die Kontaktfläche zwischen Supportgeometrie und Bauteil verringert werden. Andere additive Fertigungsverfahren nutzen dafür spitzzulaufende Enden an den Supportgeometrien, wie in Abbildung 11 dargestellt wird. Gängig zur Supportoptimierung ist auch der Einsatz baumähnlicher Supportstrukturen, genannt Tree-Support. Dieser stützt spezifischer an Stellen, an denen Support notwendig ist und minimiert dabei den Kontakt zum Bauteil.

4.2 Stützstrukturreduzierung im Design

Am effizientesten können Stützstrukturen im Designprozess des Bauteils minimiert werden. Dafür gilt es die in Kapitel 3.2 beschriebenen Designprinzipien für FFF zu befolgen und während des Designens bewusst Support notwendig machende Strukturen zu vermeiden. Geometrien können so gestaltet werden, dass sie selbsttragend sind, also keinen Support brauchen. Dafür gilt es insbesondere zu große Überhänge und Downskinwinkel $<45^\circ$ zu vermeiden.

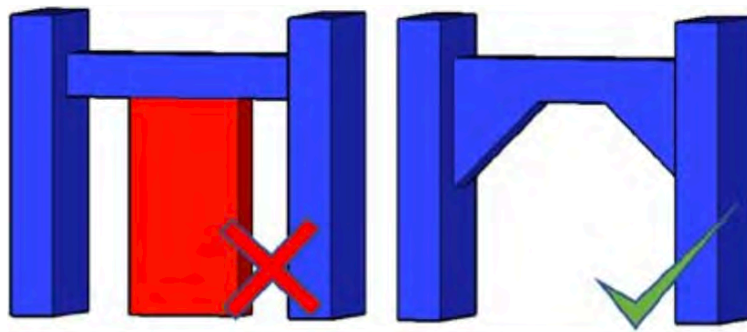


Abbildung 12: Brückengestaltung zur Supportvermeidung für FFF [14, S. 58]

Ein Überhang parallel zu XY Ebene kann dank Bridging zuverlässiger gedruckt werden als etwa ein Überhang im 5° Winkel. Bridging bezeichnet das Überbrücken eines Hohlraums ohne dass Support nötig wird. In Abbildung 12 wäre Bridging für die rechte Geometrie im mittleren Teil notwendig. Bridging ist nur bei einem Downskinwinkel von 0° möglich, da sich nur so auf beiden Seiten des Hohlraums Material befindet, auf dem der Strang abgelegt werden kann. Wie groß Abstände für Bridging sein dürfen, kommt stark auf Drucker, Filament und Druckparameter an, als erster Richtwert gelten 10 Millimeter. [36, S. 15] [14, S. 57, 58]

Abgerundete Kanten sollten ebenfalls vermieden werden, da sie stellenweise einen Downskinwinkel $<45^\circ$ ausweisen und so Support notwendig machen. Stattdessen bieten sich abgeschrägte Kante im 45° Winkel an. [14, S. 58]

Ein weiterer Anhaltspunkt für additiv herstellbare Designs ist die Natur. Der Wachstumsprozess findet ebenfalls additiv statt, natürliche Strukturen, wie Knochen, Sträucher und Bäume können Aufschluss über Designs geben, die gleichzeitig robust sind und additiv gefertigt werden können.

Das händische Designen von für den 3D-Druck optimierten Strukturen kann kompliziert sein. Insbesondere, wenn der Leichtbau als eine der größten Stärken der additiven Fertigung bedacht werden soll. Hier wird zunehmend auf rechnergestützte Designs zurückgegriffen. Die Topologieoptimierung oder das generative Design erlauben das automatisierte designen von Bauteilen, die optimal an vorgegebene Rahmenbedingungen angepasst sind.

5 Topologieoptimierung und generatives Design

Bei der Topologieoptimierung und dem generativen Design handelt es sich um zwei Ansätze zur Optimierung von Bauteilen. Die Prozesse weisen Überschneidungen auf, unterscheiden sich in Details allerdings.

Die Topologieoptimierung ist der ältere der beiden Ansätze. Für die Topologieoptimierung werden zunächst die auf ein Bauteil wirkenden Lasten und die Orte der Lasteinleitungen definiert. Zusätzlich werden Abhängigkeiten, also feste Einspannungen in eine oder mehrere Raumrichtungen, definiert. Um die Lasteinleitungen und Einspannungen werden Geometrien definiert, die nicht von der Optimierung verändert werden. Die beizubehaltenden Geometrien. Um die beizubehaltenden Geometrien wird der Designspace modelliert. Der Designspace stellt die geometrische Begrenzung der Optimierung dar. Der Designspace ist ein Volumenkörper, innerhalb dieses Körpers kann der Optimierungsalgorithmus Material entfernen oder hinzufügen, die Grenzen des Designspaces dabei allerdings nicht überschreiten. Bei der Modellierung des Designspace muss bedacht werden, dass die beizubehaltenden Geometrien für spätere Bearbeitungsschritte zugänglich bleiben und welche Geometrien sich später in der Umgebung des Bauteils befinden.

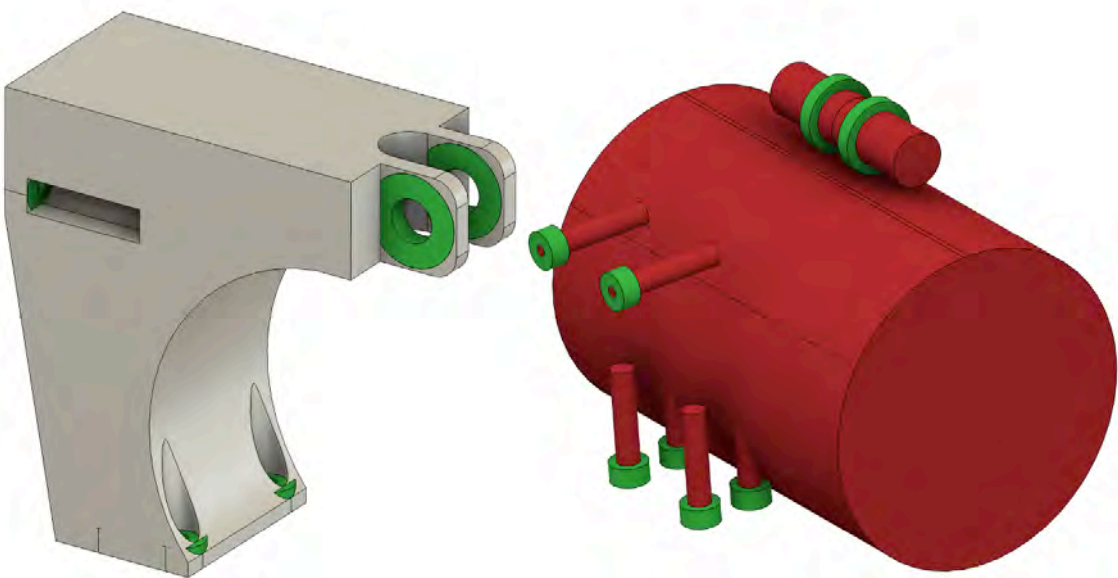


Abbildung 13: Beispiel für einen Designspace (links) und ein entsprechendes Setup mit Hindernis- und beizubehalten Geometrien (rechts). Beizubehaltende Geometrien in grün, Hindernis-Geometrien in rot

Das generative Design erfordert ebenfalls die Vorgabe von wirkenden Lasten, Lasteinleitungen und Abhängigkeiten. Auch hier werden beizubehaltende Geometrien um diese Bereiche herum definiert. Ein Designspace wird hingegen nicht vorgegeben. Stattdessen werden Hindernis-Geometrien modelliert. Diese stellen Bereiche dar, in denen der Optimierungsalgorithmus kein Material generieren darf. Hindernis-Geometrien werden etwa dort definiert, wo später Raum für folgende Bearbeitungsschritte vorhanden sein muss. Auch Umgebungs-Geometrien, die sich später in der Nähe des optimierten

Bauteils befinden werden, müssen als Hindernis-Geometrie definiert werden, um einen reibungslosen Einbau des Bauteils zu gewährleisten. Wie die Setups für die Topologieoptimierung und das generative Design im Vergleich aussehen können, wird in Abbildung 13 dargestellt.

Sowohl das generative Design als auch die Topologieoptimierung können in modernen Umsetzungen das gewählte Fertigungsverfahren beachten. Für die additive Fertigung geschieht das etwa in Form von vorgegebenen zulässigen Überhangswinkeln. Für Gussteile in Form von vorgegebener Gussrichtung. Das generative Design erlaubt es mehrere Fertigungsverfahren vorzugeben und in einem Schritt unterschiedliche Geometrien zu erzeugen, die jeweils auf das vorgegebene Fertigungsverfahren zugeschnitten sind. Im Anschluss kann der/die Nutzer*in auswählen, welches Ergebnis am besten zu den eigenen Vorstellungen passt. Das Gleiche gilt für die Vorgabe von Werkstoffen. Auch hier können verschiedene ausgewählt werden, zu denen jeweils Ergebnisgeometrien erzeugt werden. Spezifischer wird zu jeder Kombination aus gewählttem Material und gewählttem Fertigungsverfahren eine Optimierung durchgeführt, aus denen im Anschluss das präferierte Modell gewählt werden kann.

Die Topologieoptimierung erlaubt pro Optimierung die Definition eines Werkstoffs und eines Fertigungsverfahrens. Es ist entsprechend möglich per Topologieoptimierung die Ergebnisvielfalt des generativen Designs zu erreichen, dies benötigt allerdings mehrere durchgeführte Optimierungen und somit mehr Zeit. Das generative Design benötigt wiederum größere Rechenkapazitäten, um die Vielzahl an Optimierungen parallel durchführen zu können. Der Einsatz von Cloud-Computing kann diese Kapazitäten zentralisieren und so per Webzugang auch für Menschen ohne physischen Zugang zu Hochleistungscomputern nutzbar machen.

Generatives Design und Topologieoptimierung sind Begriffe, die sich im Laufe der Zeit angepasst haben und unterschiedlich interpretiert werden. So werden stellenweise für Programme für die Topologieoptimierung oder das generative Design Aspekte beider Ansätze kombiniert. Jedes Programm funktioniert anders, eine eindeutige Abgrenzung ist nicht möglich. Die aufgeführten Aspekte beziehen sich auf zwei der am weitesten verbreiteten Programme für die Optimierung von Bauteilen, Autodesk Fusion als Vertreter des generativen Design und Altair Inspire als Vertreter der Topologieoptimierung.

Ein Beispiel für den fluiden Übergang zwischen Topologieoptimierung und generativem Design ist das dritte in dieser Arbeit genutzte Programm. MSC Apex generative Design führt generatives Design im Namen, verfügt allerdings über Charakteristika die typischerweise der Topologieoptimierung zugeschrieben werden. So wird ein Designspace definiert und es wird pro Optimierung nur ein Ergebnis generiert.

5.1 Geometrieoptimierung und additive Fertigung

Die additive Fertigung erlaubt geometrische Freiheiten, die die vieler anderer Fertigungsverfahren überschreiten. Wie in Kapitel 2 dargestellt, erlaubt die additive Fertigung die Herstellung komplexer Geometrien mit geringem finanziellem Aufwand und kaum Mehraufwand gegenüber einfacheren

Geometrien. Die Topologieoptimierung und das generative Design sind darauf ausgelegt Geometrien zu schaffen, die mit möglichst geringem Materialaufwand vorgegebenen Lasten standhalten. Das Ergebnis der Optimierungen ist in vielen Fällen komplex und zwar optimal an den Kraftfluss angepasst, gleichzeitig aber nur schwer zu fertigen. Die additive Fertigung und insbesondere FFF ist eine Möglichkeit die komplexen Geometrien aus generativem Design und Topologieoptimierung mit geringem Aufwand umzusetzen. Somit ergänzen sich das generative Design / die Topologieoptimierung und FFF gegenseitig bei der Herstellung optimal an Lastfälle angepasster Geometrien.

5.2 Optimierungsalgorithmen

Sowohl Topologieoptimierung als auch generatives Design beruhen auf Algorithmen, die beizubehaltenden Geometrien in ein zusammenhängendes Bauteil umwandeln, das den vorgegebenen Lasten standhält. Bei der Umsetzung dieser Aufgabe unterscheiden sich die beiden Ansätze allerdings. Die Topologieoptimierung entfernt Material aus dem Designspace, bis die verbleibende Geometrie den Lasten noch standhält und gleichzeitig minimal Material dafür notwendig ist. Das generative Design fügt Material hinzu, bis die beizubehaltenden Geometrien verbunden sind und den Lasten bei minimalen Materialeinsatz standhalten. Für beide Vorgehen ist allerdings auch der jeweils umgekehrte Schritt notwendig. Für die Topologieoptimierung das Hinzufügen von Material, für das generative Design das Entfernen von Material. So wird sichergestellt, dass in den iterativ vorgehenden Prozessen eine optimal an die Lastfälle angepasste Geometrie entsteht. Für diese Aufgabe existieren unterschiedliche Algorithmen, die das Entfernen und Hinzufügen von Material unterschiedlich umsetzen. Auf die Grundlage der drei Algorithmen, auf denen die in dieser Arbeit genutzten Programme beruhen, soll im Folgenden näher eingegangen werden.

5.2.1 Solid Isotropic Material with Penalization

SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) ist ein weit verbreiteter Ansatz zur Topologieoptimierung. Der Designspace wird in Elemente eingeteilt, jedes Element bekommt einen fiktiven, normalisierten Dichtewert x_e zugewiesen. 1 entspricht der Dichte des Materials, 0 einem Freiraum. Um Singularitäten zu vermeiden, wird statt 0 ein kleinstmöglicher Dichtewert $x_{e,min}$ verwendet. Für den SIMP-Ansatz wird eine Korrelation zwischen Dichte und E-Modul angenommen. Dieser Zusammenhang ist in Formel (1) dargestellt (mit E_0 für das E-Modul des Werkstoffs und $E(x_e)$ dem effektiven E-Modul). Zentral für SIMP ist die Einführung des Straffaktors p . Dieser sollte ≥ 1 sein, $p = 3$ hat sich als geeignet herausgestellt. Der Straffaktor p geht als Exponent in die Berechnung des effektiven E-Moduls ein. Verglichen mit einem als linear angenommen Zusammenhang zwischen Dichte und effektivem E-Modul, werden Elemente mit einem Dichtewert $x_e \notin \{0,1\}$ mit einem geringeren Einfluss auf das effektive E-Modul bestraft. [1] [13]

$$E(x_e) = x_e^p \cdot E_0 \quad (1)$$

Gängiges Ziel in der Topologieoptimierung ist die Minimierung der Compliance innerhalb des Bauteils. Als Randbedingung wird ein Anteil am Volumen des Bauraums vorgegeben, der nicht überschritten werden darf. Die Compliance steht im umgekehrten Verhältnis zur Steifigkeit und stellt ein Maß der Nachgiebigkeit einer Struktur dar. Mathematisch ist das Optimierungsziel in Formel (2) dargestellt. Neben der Elementdichte und dem Straffaktor fließen der Verschiebungsvektor der Elemente \mathbf{u}_i und die Elementsteifigkeit \mathbf{k}_i in das Zielproblem ein. [13] [6, S. 683-685]

$$\min: C = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (2)$$

Um die Zielfunktion zu lösen, verläuft SIMP iterativ. Jedem Element wird zunächst eine Dichte zugewiesen. Wie diese initiale Dichte bestimmt wird, variiert. Gängig sind zufällige oder gleichmäßige Verteilungen. Auf Grundlage dieser Elementdichten wird eine FE-Analyse durchgeführt und so unter Einbeziehung des Zusammenhangs zwischen Dichte und Steifigkeit aus Formel (1) die Gesamtsteifigkeit, bzw. die Compliance der Geometrie berechnet. Die Ableitung der Zielfunktion (Formel (3)) wird für die Sensitivitätsanalyse genutzt, die dazu dient, die Auswirkungen der aktuellen Dichteverteilung auf die Gesamtsteifigkeit zu überprüfen. [13] [6, S. 683-685]

$$\partial C / \partial x_e = -p \cdot x_e^{(p-1)} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (3)$$

Im Anschluss an die Sensitivitätsanalyse werden für jedes Element neue Dichtewerte vergeben. Dies folgt ebenfalls einer Berechnungsvorschrift. Diese muss inkludieren, dass alle Dichtewerte zwischen $x_{e,\min}$ und 1 liegen und dass die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse repräsentiert werden. Für Elemente, die überproportional zur Gesamtsteifigkeit beitragen wird der Dichtewert erhöht. Für Elemente mit geringem Beitrag zur Gesamtsteifigkeit wird der Dichtewert verringert. [6, S. 683-685]

Elemente geringer Dichte werden durch den Straffaktor p in der Zielfunktion durch einen geringeren Beitrag zur Gesamtsteifigkeit bestraft. Die Sensitivitätsanalyse richtet sich nach dem Beitrag der einzelnen Elemente zur Gesamtsteifigkeit. Fällt dieser gering aus, wird der Dichtewert des Elements weiter reduziert. Elemente sehr niedriger Sensitivität werden schließlich gefiltert, sodass sie im weiteren Optimierungsprozess keine Rolle mehr spielen. Elemente mit hohem Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit werden durch ansteigende Dichtewerte belohnt und konvergieren durch die Art der Berechnung der Steifigkeit gegen 1 oder Werte nahe 1. Sie bilden so die verbleibende, optimierte Struktur. Somit bilden sich Bereiche, die zur Gesamtsteifigkeit beitragen, mit jeder Iteration weiter aus. Bereiche, die kaum zur Gesamtsteifigkeit beitragen, werden reduziert und später eliminiert. [13] [6, S. 683-685] [1]

5.2.2 Bidirectional Evolutionary Structural Optimazation

Ein weiterer Algorithmus, der für die Optimierung von Topologien eingesetzt werden kann, ist BESO (Bidirectional Evolutionary Structural Optimazation). BESO ist eine Weiterentwicklung von ESO, einem frühen Topologieoptimierungs-Algorithmus. Grundlage von ESO ist ebenfalls die FE-Analyse eines vorgegebenen Designspaces, auf den vorgegebene Lasten und Einspannungen wirken. Der Bauraum wird in Elemente eingeteilt und im Zuge einer FE-Analyse die von Mises Spannung jedes Elements $\sigma_{VM,i}$ berechnet. Diese wird mit der maximalen von Mises Spannung innerhalb des Modells $\sigma_{VM,max}$ verglichen. Unterhalb eines festgelegten Verhältnisses zwischen Spannung in Element i und maximaler Spannung im Bauteil, wird das Element eliminiert. Diese Rejection Ratio RR wird auf alle Elemente innerhalb des Bauraums angewandt. Nach einer Iteration wurde jedes Element auf das Eliminationskriterium (Formel (4)) überprüft und wird für die nächste Iteration entsprechend als massiv oder hohl gespeichert. [1] [20, S. 1091]

$$\frac{\sigma_{VM,i}}{\sigma_{VM,max}} < RR \quad (4)$$

Die Rejection Ratio wird daraufhin mit der Evolutionsrate (ER) addiert. Die Evolutionsrate bestimmt die Genauigkeit des Algorithmus. Ein hoher Wert für ER lässt RR schnell ansteigen und führt so potentiell in weniger Iterationsschritten zu einem Ergebnis. Kleinere Werte für ER führen zu mehr Iterationen und so besser an die Zielbedingung angepassten Geometrien. Die Schleife aus FE-Analyse, Element-Elimination und neuem RR -Wert wird wiederholt bis kein Element mehr das Eliminationskriterium erfüllt. [1]

BESO erweitert ESO um die Möglichkeit Material nicht nur zu eliminieren, sondern auch hinzuzufügen. Frühe Versionen des Algorithmus greifen dafür neben der Rejection Ratio auf eine Inclusion Ratio zurück. Analog zur Rejection Ratio bestimmt dieser Parameter, welche Elemente zur Struktur hinzugefügt werden. Grundlage dafür ist eine Sensitivitätsanalyse aller Elemente und Extrapolation der Sensitivitäten hohler Elemente nahe der bestehenden Geometrie. Neuere Version des BESO-Algorithmus kombinieren RR und IR in einem einzelnen Schwellenwert. Alle Elemente werden mit diesem Wert verglichen, statt mit zwei getrennten Werten. [17, S. 9] [20, S. 1091]

Neben dem in Formel (4) beschriebenen Ansatz über die Spannung zu iterieren, ist für BESO eine Iteration mit verändertem Volumen und eine Minimierung der Compliance C als Zielfunktion (Formel (5)) üblich. Die Compliance wird dabei als Produkt des Kraftvektors \mathbf{F} und Verschiebungsvektors \mathbf{u} ausgedrückt. Das Zielvolumen V^* in der Nebenbedingung (Formel (6)) muss gleich dem der Summe aller Volumina V_i der massiven Elemente sein. Mathematisch werden hohle Elemente durch $x_i = 0$ repräsentiert, massive Elemente durch $x_i = 1$. Hohle Elemente gehen entsprechend nicht in die Berechnung mit ein, massive Elemente voll. Zwischenwerte, wie in SIMP, gibt es nicht. [17, S. 10] [20, S. 1092]

$$\min: \mathbf{C} = \frac{1}{2} \mathbf{F}^T \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\text{Nebenbedingung: } V^* - \sum_{i=1}^N V_i x_i = 0 ; x_i \in \{0,1\} \quad (6)$$

Jeder Iterationsschritt beginnt mit einer FE-Analyse. Daran schließt die Sensitivitätsanalyse aller Elemente an. Diese beruht auf der Dehnungsenergie der einzelnen Elemente. Es gilt die Prämisse, dass die Summe der Dehnungsenergien gleich der Compliance des Bauteils ist. [17, S. 10]

$$\alpha_i^e = \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i = \Delta C_i \quad (7)$$

$$\alpha_i^e = e_i = \frac{(\frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i)}{V_i} \quad (8)$$

Somit ist die Dehnungsenergie eines Elements ein Maß für seinen Beitrag zur Compliance und entsprechend als Basis für die Berechnung der Sensitivität eines Elements geeignet. Die Sensitivität wird in der Sensitivitätsnummer (α_i) festgehalten, die sich nach Formel (7) berechnet. Dabei ist \mathbf{u}_i der Verschiebungsvektor des i ten Elements und \mathbf{K}_i die Steifigkeitsmatrix des Elements. Um die Effekte eines ungleichmäßigen Netzes auszugleichen kann die Dehnungsenergie durch das Volumen des Elements V_i geteilt werden. [17, S. 10-11]

Diese Berechnung von Dehnungsenergien für die Sensitivitätsanalyse ist für hohle Elemente nicht sinnvoll. Um diese in den Algorithmus mit einzubeziehen, müssen ihre Sensitivitätsnummern extrapoliert werden. Dafür existieren unterschiedliche Ansätze. Grundsätzlich wird von ähnlichen Sensitivitäten benachbarter Elemente ausgegangen. Beruhend auf dieser Annahme werden Sensitivitäten über mehrere Elemente hinweg gemittelt. So steigen auch die Sensitivitätsnummern hohler Elemente in der Nähe der massiven Struktur an. Insbesondere an Stellen, an denen sich viele Elemente mit hoher Sensitivitätsnummer befinden. In Bereichen, die viel zur Minimierung der Compliance des Bauteils beitragen, wird so neues Material erzeugt. [17, S. 12-14] [20, S. 1092]

Alle Sensitivitätsnummern werden mit einem Grenzwert α_{th} verglichen. Massive Elemente mit $\alpha_i < \alpha_{th}$ werden eliminiert. Hohle Elemente mit $\alpha_i \geq \alpha_{th}$ hinzugefügt. Der Grenzwert richtet sich nach dem Volumen für den aktuellen Iterationsschritt VG_k . Es gilt:

$$VG_{k+1} = VG_k(1 - ER) ; k = 0,1,2,3 \dots \quad (9)$$

Mit ER der Evolutionsrate. Je niedriger diese gewählt wird, desto mehr Iterationsschritte werden durchlaufen und desto besser repräsentiert das Ergebnis der Optimierung die Zielvorgaben. In jedem Iterationsdurchlauf wechseln sich FE-Analyse und Element Elimination/Einfügung ab, bis das Ergebnis konvergiert. Anschließend wird das Volumen für den nächsten Iterationsdurchlauf nach Formel (9)

berechnet. Mit jedem neuen Iterationsdurchlauf sinkt das beibehaltene Volumen weiter. [17, S. 12] [20, S. 1093]

Der Algorithmus ist beendet, sobald das vorgegebene Volumenziel erreicht ist und das Ergebnis konvergiert. Alternativ kann die Konvergenz auch einmalig nach Erreichen des Volumenziels geprüft werden, um Rechenschritte zu sparen. [20, S. 1093-1094]

BESO existiert sowohl in „hard-kill“ als auch „soft-kill“ Varianten. Diese unterscheiden sich in ihrem Umgang mit hohlen Elementen. Hier beschrieben wird der hard-kill Ansatz, in dem Elemente unterhalb des Schwellwertes der Sensitivitätsnummer als 0 oder hohl klassiert werden und oberhalb von diesem Schwellwert als 1 oder Material. Soft-kill Ansätze fungieren ähnlich zu SIMP insofern als dass für die Elemente auch Zwischenwerte zugelassen werden, die über einen Straffaktor kontrolliert werden. Das in dieser Arbeit für Optimierungen genutzte Programm MSC Apex generative Design beruht auf dem hard kill Ansatz. [19] [10]

5.2.3 Level-Set Methode

Die Level Set Methode ist ein neuerer Ansatz in der Topologieoptimierung / dem generativen Design. Statt expliziter Parameterdefinitionen für jedes Element im Designspace, wird die Geometrie implizit definiert. Dafür wird die beizubehaltende Geometrie über eine Level Set Funktion dargestellt. Die Level-Set-Funktion berechnet sich über die Sensitivitäten jedes Elements, die wiederum aus den Dehnungsenergien dieser berechnet werden. Dies beruht auf der Annahme, dass die Compliance der Geometrie gleich der Summe der Dehnungsenergien aller Elemente ist. Die Minimierung der Compliance wird als Zielfunktion definiert. Als Randbedingung ist die Vorgabe eines einzuhaltenden Volumens üblich. Andere Optimierungsziele und Randbedingungen sind möglich, üblich ist etwa die Spannungsminimierung. [27, S. 1159-1161], [18]

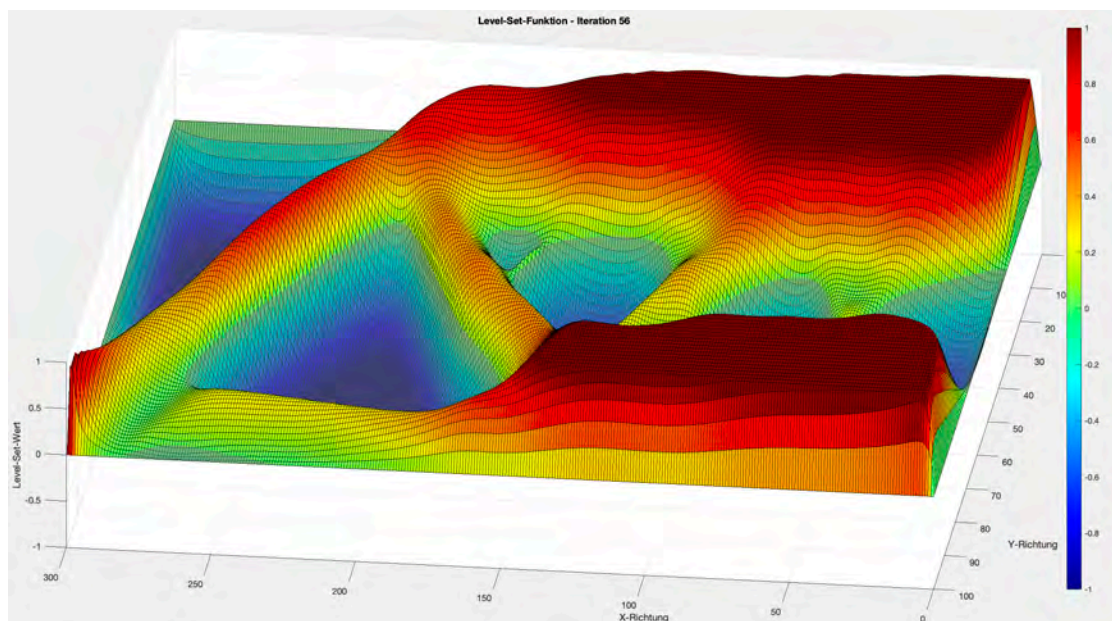


Abbildung 14: Level-Set-Funktion im Optimierungsprozess.

Es werden Grenzen für die Sensitivitäten festgelegt, typischerweise 1 und -1 und die Werte geglättet. Es ergibt sich eine Funktion mit positiven und negativen Werten und Nullstellen. Ein Beispiel einer Level-Set-Funktion wird in Abbildung 14 dargestellt. Die Definition der beizubehaltenden Geometrie ergibt sich nun implizit als Nullstellenmenge der Level Set Funktion. Die Nullstellenmenge stellt dabei den Rand der beizubehaltenden Geometrie dar, positive Werte das Innere der beizubehaltenden Geometrie und negative Werte die wegfallende Geometrie. Die aus der in Abbildung 14 abgeleitete Geometrie wird in Abbildung 15 gezeigt. [27, S. 1161]



Abbildung 15: Aus der in Abbildung 14 dargestellten Level-Set-Funktion abgeleitete Geometrie

Die Level-Set basierte Optimierungen finden iterativ statt. Startpunkt ist die Festlegung einer initialen Level-Set-Funktion. Ältere Level-Set-Ansätze bringen im ersten Schritt Leerstellen (Werte < 0) in die Funktion ein, neue Ansätze starten mit einem konstanten Wert für alle Elemente. Ersteres wird vollzogen, da diese Ansätze zwar Leerstellen verschneiden, allerdings keine neuen Leerstellen erzeugen können, was mit neueren Versionen des Level-Set Ansatzes möglich ist. Dies hängt mit der Berechnung der Sensitivitäten zusammen, die je nach Ansatz variiert. Neuere Ansätze nutzen etwa die topologische Ableitung, um die Auswirkung einer infinitesimal kleinen Leerstelle auf die Zielfunktion zu bestimmen und darüber für jedes Element dessen Sensitivität herzuleiten. Üblich für ältere Ansätze ist die Bestimmung der Sensitivität über die Veränderung des Rands der Geometrie, bzw. die Verschiebung der Nullstellenmenge. Somit ist ohne das Einbringen von Leerstellen am Anfang der Optimierung keine Veränderung im inneren der Geometrie möglich. Die Level Set Funktion wird in jeder Iteration auf Grundlage der Sensitivitäten aktualisiert. Dabei unterscheidet sich die Berechnung der Level-Set-Funktion, je nach Berechnung der Sensitivitäten. Ältere Ansätze nutzen dafür etwa die Lösung der Hamilton-Jacobi-Gleichung, in die der Grad der Verschiebung der Nullstellenmenge einfließt. Als flexibler wird die Lösung einer Reaktions-Diffusions-Gleichung, wie es in dem im folgenden Kapitel betrachteten Matlab Code geschieht, vorgeschlagen. Diese basiert auf der topologischen Ableitung. Konvergenz wird in den Level-Set basierten Optimierungen erreicht, wenn die Veränderung der Gesamtsteifigkeit einen definierten Schwellwert wiederholt unterschreitet und das einzuhaltende Volumen unterschritten wird. [27, S. 1159-1164], [18]

5.3 SIMP, BESO und Level-Set Methode für die additive Fertigung

Für eine grundlegende Beurteilung der Eignung von SIMP, BESO und Level Set Ansatz für die Topologieoptimierung für metal FFF werden im Folgenden Umsetzungen der drei vorgestellten Algorithmen verglichen. Dabei handelt es sich um Matlab Skripte, die auf zweidimensionale Optimierungsprobleme angewandt werden. Für SIMP kommt Code von Uskov V. [35] zur Anwendung, dieser beruht auf der Arbeit von Andreassen E., u.a [4]. Grundlage für den BESO Ansatz ist Code von Huan X. und Xie Y. [19], veröffentlicht durch das Centre for Innovative Structures and Materials [11]. Der Code für den Level Set Ansatz beruht auf Arbeit von Otomori M. [27]. Alle drei Skripte wurden angepasst, um dieselbe Geometrie mit identischen Abmessungen, Lasten und Einspannungen abzubilden. Der Code für die drei Algorithmen ist in Anhang 1 bis Anhang 3 zu finden. Zum BESO Code soll an an dieser Stelle angemerkt werden, dass es sich um einen soft-kill Ansatz handelt. Das im weiteren Verlauf genutzte Optimierungsprogramm MSC Apex generative Design beruht auf einem hard-kill BESO Ansatz. [10]

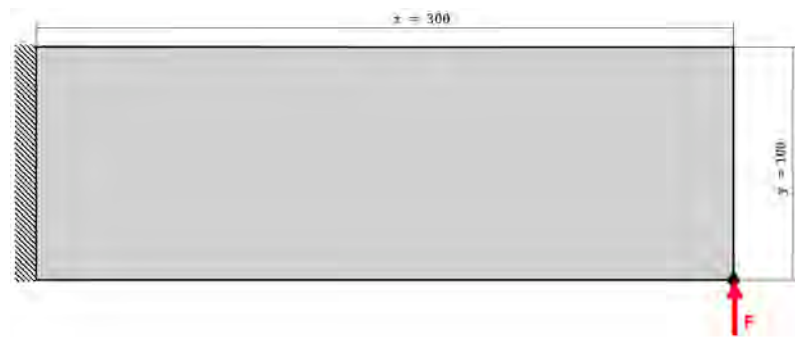


Abbildung 16: Schematische Darstellung von Designspace und Lastfall

Als Beispiel für die Optimierung wird ein Balken gewählt, der auf der linken Seite eingespannt ist. Eine Kraft wirkt auf den Punkt am unteren, rechten Ende des Balkens. Die Abmessungen des Balkens liegen bei 300 x 100 Elementen. In Abbildung 16 sind Lastfall und Geometrie abgebildet.

Für die Optimierung werden 200 Iterationen vorgegeben. Jeder Algorithmus wird zweimal ausgeführt, dabei wird ein Parameter verändert. Für SIMP ist das rs , für BESO $rmin$ und für Level-Set tau . Diese Parameter verändern die Komplexität der Ergebnisgeometrie und können als Regulierungsparameter bezeichnet werden. Die drei Parameter wirken sich strukturell unterschiedliche auf die Algorithmen aus, die Folgen sind allerdings ähnlich. Hohe Werte für den Regulierungsparameter sorgen für glatte, weniger komplexe Geometrien, niedrige Werte für feinere Strukturen. In Abbildung 17 sind Ergebnisse für die drei Algorithmen und die Auswirkungen des Regulierungsparameters auf diese abgebildet. Auf der linken Seite sind Geometrien zu sehen, die mit niedrigen Werten für den Parameter entstanden sind. Rechts daneben Geometrien für die der zwanzigfache Wert des initialen Regulierungsparameters genutzt wurde. Der Regulierungsparameter muss für jede Geometrie und Anforderung individuell angepasst werden.

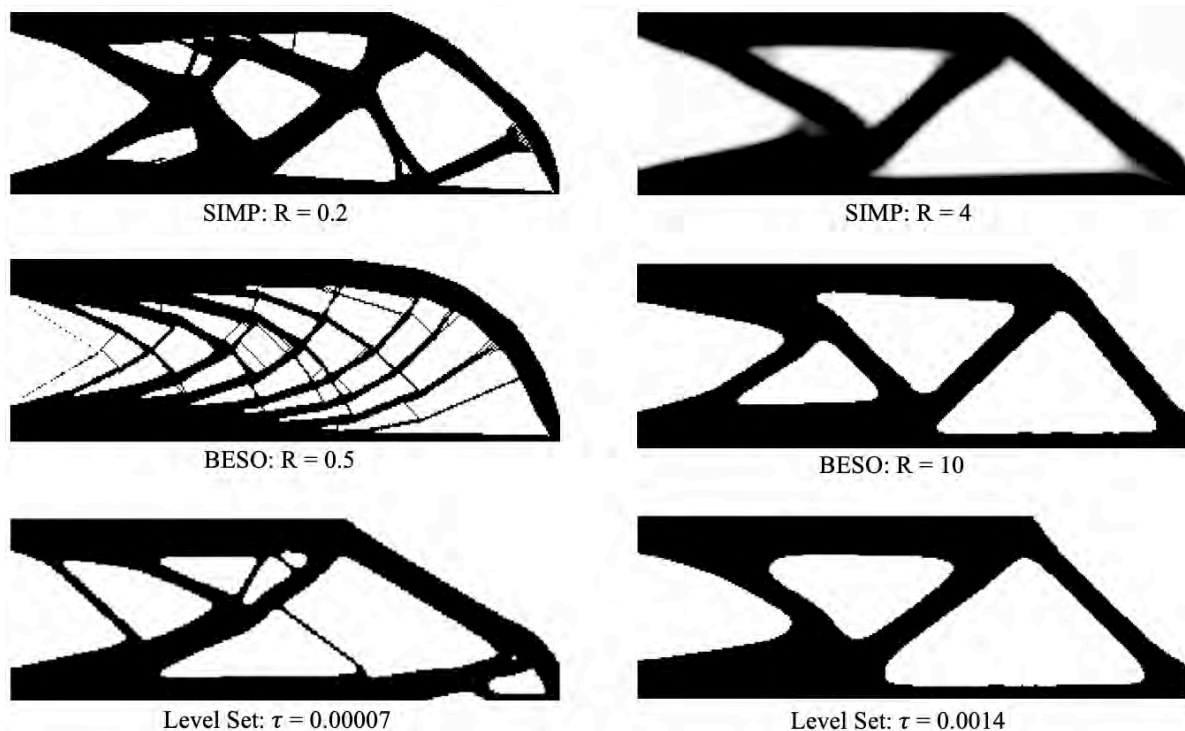


Abbildung 17: Links niedrige Werte für den Regulierungsparameter, rechts hohe Werte

Diese einfache Implementierung der drei Optimierungsalgorithmen zeigt, dass Ihnen zunächst keine Regulierung von Designregeln für die additive Fertigung inhärent sind. Mit dem Regulierungsparameter ist jedoch in allen drei Algorithmen ein Wert präsent, der eng an die Komplexität und die Dicken der entstehenden Geometrien gekoppelt ist. Der Überhangswinkel findet hingegen keinerlei Repräsentation in den Optimierungsalgorithmen. Für die effektive Nutzung der betrachteten Optimierungsalgorithmen beim automatisierten Design additiv zu fertigender Bauteile sind entsprechend Anpassungen notwendig.

5.4 Fertigungsrestriktionen in SIMP, BESO und Level-Set Methode in kommerzieller Anwendung

Als Vertreter für die Topologieoptimierung auf Grundlage des SIMP-Algorithmus wird in dieser Arbeit Altair Inspire mit dem OptiStruct Solver verwendet. Für BESO kommt Hexagon MSC Apex generativ Design zum Einsatz und für die Level-Set Methode die generative Design Funktion in Autodesk Fusion. [9]

Im Folgenden soll untersucht werden, inwiefern sich die drei Programme für den Einsatz in der Geometrieoptimierung für FFF, spezifischer metal FFF eignen. Wie in Kapitel 3.2 aufgeführt, sind für FFF Designregeln zu beachten. Zentral dafür ist der Überhangswinkel. Die Fähigkeit von FFF Überhänge zu fertigen, bzw. Überhänge nicht zu fertigen bedingt die Designgrundlagen für das Fertigungsverfahren. Somit ist das Einhalten eines vorgegebenen Überhangswinkels von zentraler Bedeutung für Bauteile, die mittels FFF gefertigt werden sollen. Daraus ist abzuleiten, dass die Vorgabe eines zulässigen Überhangswinkels für generatives Design / Topologieoptimierung unumgänglich ist, wenn die Programme im Rahmen von FFF genutzt werden sollen. So erklärt sich, dass alle untersuchten

Programme eine Möglichkeit bieten den zulässigen Überhangswinkel zu definieren. Ähnliches gilt für die Vorgabe von Dicken. Insbesondere die Vorgabe einer minimalen Dicke ist für FFF wichtig, da FFF keine Geometrien fertigen kann, die die erzeugte Strangbreite des genutzten Druckers unterschreiten.

Für metal FFF ergeben sich weitere Fertigungsbeschränkungen, wie in Kapitel 3.3.1 dargestellt wird. metal FFF ist als Fertigungsverfahren nicht weit verbreitet. Entsprechend ist es nicht verwunderlich, dass die spezifischen Einschränkungen dieses Verfahrens keine Beachtung in den hinter untersuchten, breiten aufgestellten Programmen finden. So findet etwa die ungleichmäßige Schrumpfung von metal FFF Bauteilen keine Beachtung in den Programmen. Auch die Anisotropie von metal FFF Bauteilen kann nur in Apex mit in die Optimierung eingebunden werden. Gleiches gilt für das Verhältnis zwischen Länge und Dicke von Streben innerhalb einer Geometrie. Dennoch bieten alle drei Programme mit Vorgaben zu Dicke und Überhangswinkel zumindest zwei wichtige Fertigungsbeschränkungen für metal FFF Bauteile an. Auf diese beiden Fertigungsbeschränkungen wird sich im weiteren Verlauf dieser Studie konzentriert.



Abbildung 18: Einstellung für Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung in Apex, Fusion und Inspire

Alle drei Programme bieten Möglichkeiten, um Dicke und Überhangswinkel zu kontrollieren. Die entsprechenden Menüs werden in Abbildung 18 dargestellt. In Inspire können minimale und maximale Dicke in Millimetern angegeben werden. In MSC Apex generative Design werden Textbefehle für die Einstellung der drei Parameter verwendet. Dabei wird die maximale Dicke (configuration.maxThickness) und die minimale Dicke (configuration.minThickness) in Metern angeben, der Überhangswinkel (schedule.prefabricated.wallAngle) in Grad. Fusion erlaubt die Eingabe des Überhangswinkels in Grad und der minimalen Dicke in Millimetern.

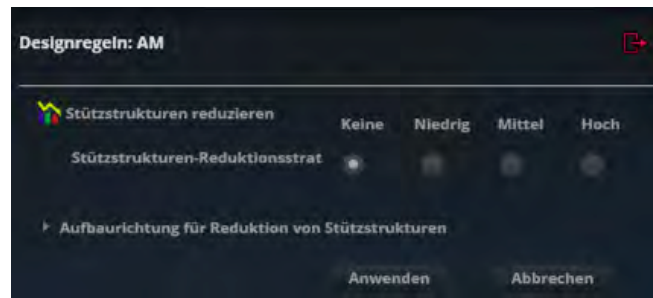


Abbildung 19: Einstellung der Supportvermeidung in Apex

Dabei sind in allen drei Programmen bestimmte Punkte zu bedenken. Inspire bietet als einziges der drei Programme eine Funktion zur strikten Einhaltung der Überhangswinkelvorgabe an, alternativ kann eine gemilderte Restriktion eingestellt werden, die Material in wichtigen Bereichen zulässt, auch wenn der zulässige Überhangswinkel unterschritten wird. [3]

In Apex stellt der Überhangswinkel eine Besonderheit dar. Der spezifizierte Winkel definiert den Winkel, ab dem Support notwendig ist. Das impliziert nicht, dass dieser Winkel im Optimierungsprozess nicht überschritten werden darf. Die Menge an generierten Support wird über eine gesonderte Funktion gesteuert. Diese wird in Abbildung 19 dargestellt und inkludiert keine Möglichkeit Support gänzlich zu vermeiden. [23]

Fusion definiert den Überhangswinkel als größten Winkel, der ohne Support gedruckt werden kann. Welche Auswirkungen der angegebene Winkel auf das generierte Ergebnis hat, gibt Autodesk nicht an. Zudem sind die Angaben für die Definition des Überhangswinkels uneindeutig. Die Produktdokumentation zu Fusion gibt an, der Winkel werde relativ zu Bauplatte gemessen, die Beschreibung innerhalb von Fusion selbst gibt an, dass der Winkel relativ zur Aufbaurichtung gemessen wird. Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Tests legen nahe, dass der Winkel relativ zur Aufbaurichtung gemessen wird. Ein Beispiel, das das nahelegt, wird in Anhang 4 festgehalten. Neben der Überhangswinkelrestriktion bietet Fusion eine Spezifizierung der minimal zu erzeugenden Dicke an. Die Restriktion der maximalen Dicke ist nicht möglich. [8]

Inspire lässt die Kombination aus Überhangswinkelkontrolle und maximaler Dicke nicht zu, außerdem kann die maximale Dicke nur in Kombination mit der minimalen Dicke eingestellt werden. Die Vorgabe einer minimalen Dicke ist für jede Optimierung in Inspire notwendig. Apex erlaubt jede Kombination aus minimaler Dicke, maximaler Dicke und Überhangswinkelkontrolle. Die Möglichkeiten zur Kontrolle von Überhangswinkel und Dicken sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	min. Dicke	max. Dicke	Überhangswinkel
Inspire	notwendig	Nur in Kombination mit minimaler Dicke; nicht in Kombination mit Überhangswinkel	Strikt oder gemildert; nicht in Kombination mit max. Dicke.
Apex	Uneingeschränkt möglich	Uneingeschränkt möglich	Uneingeschränkt möglich
Fusion	Uneingeschränkt möglich	Nicht möglich	Uneingeschränkt möglich

Tabelle 1: Überhangs- und Dickenkontrolle in Apex, Fusion und Inspire

6 Überhangswinkelkontrolle in Inspire, Apex und Fusion

6.1 Testszenario 1

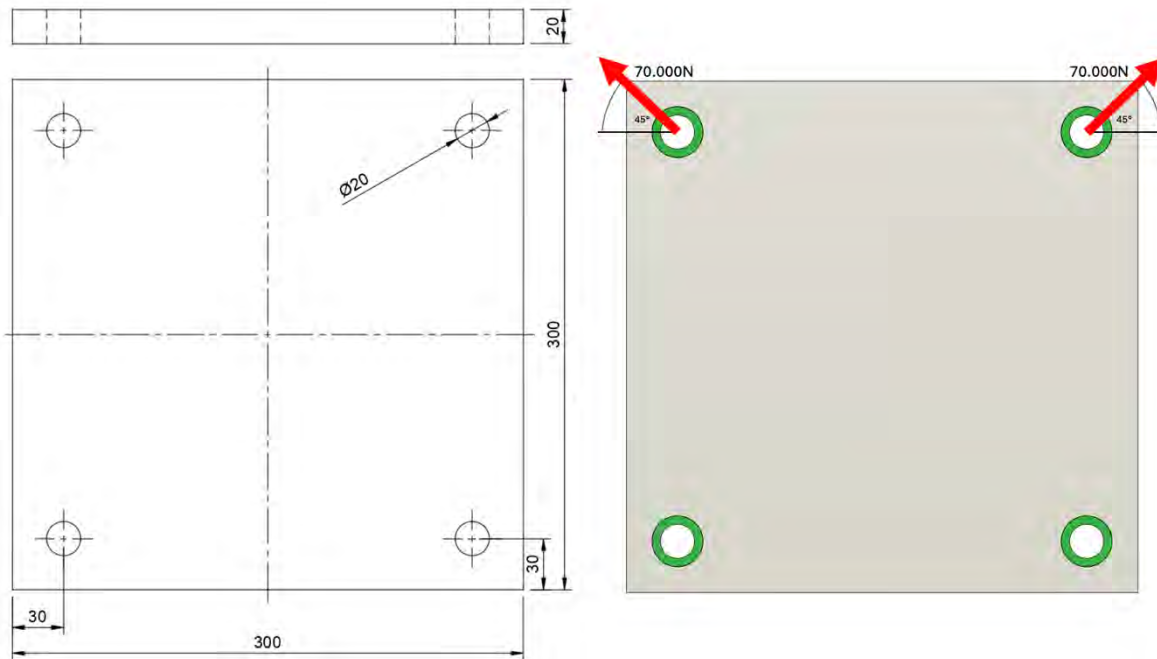


Abbildung 20: Geometrie und erster Lastfall des Testbauteils

Zur Analyse der Überhangswinkelkontrolle in den drei untersuchten Programmen, wird eine simple Geometrie mit unterschiedlichen Lastfällen beaufschlagt und die entstehenden Ergebnisse der Optimierungen untersucht. Die Geometrie und der zunächst untersuchte Lastfall werden in Abbildung 20 dargestellt. Ebenfalls darauf abgebildet werden in grün die beizubehaltenden Geometrien, in grau der Designbereich für Inspire und Apex und in rot die wirkenden Kräfte. In Fusion werden lediglich die beizubehaltenden Geometrien definiert. Die beiden unteren Ösen werden als fest eingespannt definiert. Um alle vier Ösen wird ein Kreistring mit 30 mm Durchmesser außen und 20 mm Durchmesser innen als beizubehaltende Geometrie festgelegt. Um die Anzahl an Lösungsmöglichkeiten zu erhöhen, werden keine Symmetrieebenen vorgegeben.

Zur Beurteilung der generierten Optimierungsergebnisse werden zwei Kennzahlen eingeführt. Der Sicherheitsfaktor ist der Faktor, um den die im Bauteil auftretende Spannung multipliziert werden müsste, um zum Versagen des Werkstoffs zu führen. Hierbei wird die Streckgrenze als Versagenskriterium und somit als Grundlage für den Sicherheitsfaktor angenommen. Sowohl Inspire als auch Fusion nutzen die Streckgrenze in ihren Optimierungen als Versagenskriterium. Ausnahme bilden die Simulationen und Optimierungen in und für Geometrien aus Apex. Für die Optimierungen in Apex wird lediglich die Zugfestigkeit vorgegeben, entsprechend werden auch die im Anschluss an die Optimierungen stattfindenden FE-Analysen auf Grundlage der Zugfestigkeit vorgenommen. Für spätere Vergleiche zwischen den Spannungen innerhalb der Geometrien, die durch unterschiedliche Programme

erzeugt wurden, wird die FE-Analyse auf Streckgrenze umgestellt. In diesen Fällen wird im Text darauf hingewiesen. [2] [7]

Die zweite Kennzahl ist die Menge an Support, die für den Druck des Bauteils notwendig ist. Für die Ermittlung dieser Kennzahl wird OrcaSlicer verwendet. Als Slicer werden Programme bezeichnet, die einen Volumen- oder Flächenkörper in von 3D-Druckern umsetzbaren Code transformieren. OrcaSlicer ist ein weitverbreiteter Open-Source Slicer. Aufgrund seiner einfachen Zugänglichkeit als kostenloses Open-Source Programm, wird OrcaSlicer in dieser Arbeit für die Supportgenerierung verwendet. Die Supporterstellung wird auf einen Überhangswinkel von 45° eingestellt, der Supporttyp auf „Normal(auto)“ und der Supportstyle auf „Snug“. Methoden zur effizienten Supporteinstellung sollen an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Die vollständigen Supporteinstellungen aus OrcaSlicer werden in Anhang 5 dargestellt. Mit diesen Einstellungen wird Support für die drei mit Überhangswinkelrestriktion optimierten Geometrien erstellt. Als Kennzahl wird die Masse des notwendigen Supports herangezogen. Grundlage für die Masse ist das Volumen des Supports und eine Dichte von $2,77 \frac{g}{cm^3}$, was der Dichte der Aluminiumlegierung EN AW-2024 (WL 3.1354T351) entspricht. Diese Legierung ist als Werkstoff für das später in dieser Arbeit optimierte Bracket vorgesehen. Vorüberlegungen bezüglich des Optimierungsprozesses bereits mit den Materialdaten dieses Werkstoffs vorzunehmen ist naheliegend. Bei den verwendeten Werten handelt es sich um Pauschalisierungen, die exakten Materialwerte müssen experimentell für metal FFF Bauteile ermittelt werden. Die Supportstrukturen innerhalb der beizubehaltenden Geometrien sind für die Supportminimierung irrelevant. Es ist davon auszugehen, dass die beizubehaltenden Geometrien im Anschluss an den Druckprozess nachbearbeitet werden und im Zuge dessen Support entfernt wird. Eine Vermeidung dieser Supportstrukturen durch die Optimierungsalgorithmen ist auf Grund der Definition des Designspaces, bzw. der Hindernis-Geometrien nicht möglich. [38] [30]

Für die Optimierungen wird ein zulässiger Überhangswinkel von 45° definiert. Die minimale Dicke muss in Inspire und Fusion vorgegeben werden und wird auf 3 mm gesetzt. Die Aufbaurichtung ist Z+. Mit den vorgegebenen Parametern wird die Optimierung zwei Mal mit allen drei Algorithmen durchgeführt. Optimierungsziel ist das Minimieren der Masse bei Einhaltung eines Sicherheitsfaktors von 1,5. Es wird eine spannungsbasierte Optimierung genutzt. Diese wird von allen drei Programmen angeboten. Ein Durchlauf wird jeweils ohne Überhangswinkelkontrolle durchgeführt, für den zweiten Durchlauf wird der maximale zulässige Überhangswinkel auf 45° festgelegt. Die Material- und Optimierungseinstellungen in Inspire, Apex und Fusion werden in Anhang 6 bis Anhang 8 dargestellt.

6.1.1 Optimierungsergebnisse



Abbildung 21: Händisch optimierte Geometrie

Für das gewählte Szenario soll eine händische Analyse als Vergleichswert für die Optimierungsergebnisse herangezogen werden. Diese händische Optimierung wird in Abbildung 21 dargestellt.

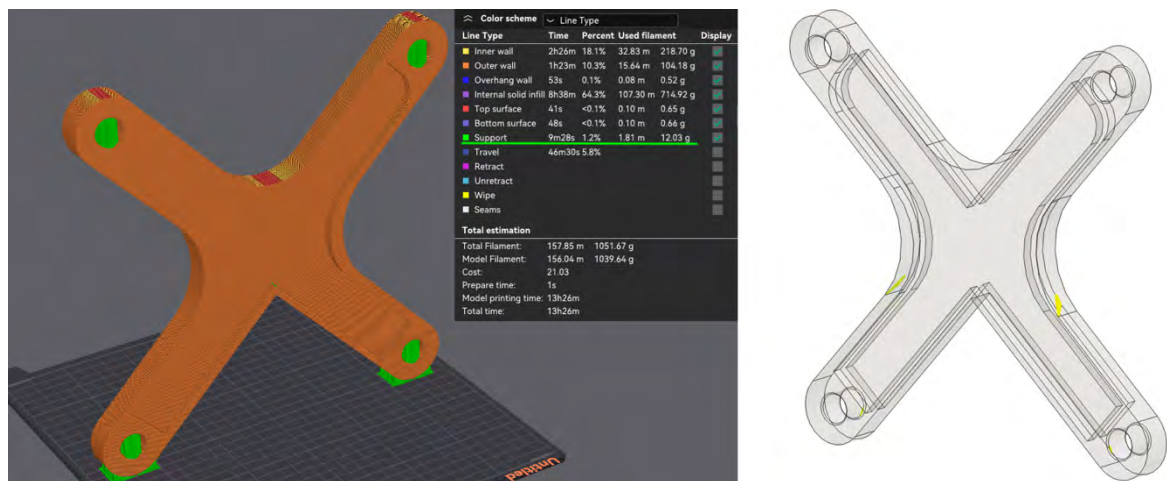


Abbildung 22: Supportstruktur für die händisch optimierten Geometrie und Auszug aus der FE-Analyse

Die händische Optimierung erfüllt die vorgegebenen Parameter. Der Überhangswinkel von 45° wird nicht überschritten, zusätzlich hält die Geometrie in großen Teilen den minimalen Sicherheitsfaktor von 1,5 ein und überschreitet den Designspace nicht. Auf der linken Seite von Abbildung 22 wird die notwendige Supportstruktur in grün dargestellt, auf der rechten Seite das Ergebnis der FE-Analyse. Bereiche, die einen Sicherheitsfaktor von 1,5 unterstreiten, sind in gelb dargestellt. Für die händische Optimierung sind die Bereiche, auf die das zutrifft, kaum existent. Der vollständige Bericht zur FE-

Analyse wird in Anhang 9 und Anhang 10 abgebildet. Wie in Abbildung 22 gezeigt, erfordert das Bauteil 12,03 g Supportmaterial für den Druckprozess.

Die händische Optimierung zeigt, wie ein Ergebnis für das betrachtete Szenario aussehen kann. Für die automatisierten Optimierungen auf Basis von SIMP, BESO und Level-Set Methode werden ähnliche Ergebnisse antizipiert. Selbsttragende Strukturen, die keinen oder nur geringe Mengen Support benötigen, bzw. die vorgegebene Überhangswinkelrestriktion einhalten. Gleichzeitig wird erwartet, dass die erzeugten Geometrien den definierten Lasten standhalten und dabei den vorgegebenen minimalen Sicherheitsfaktor nicht unterschreiten.

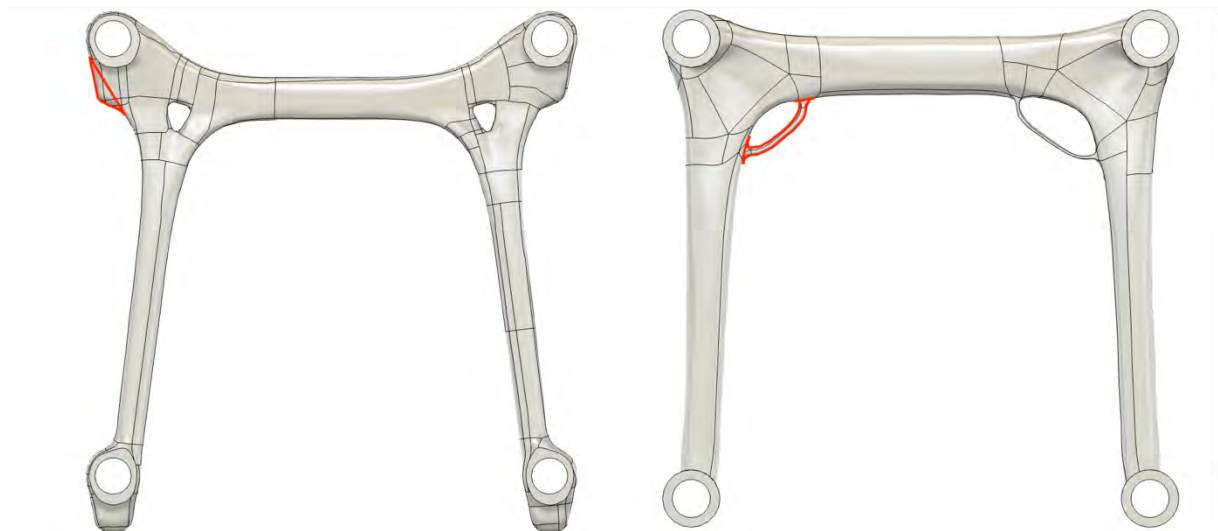


Abbildung 23: Für Szenario 1 optimierte Geometrien. Links Apex, rechts Fusion

Die Optimierungsergebnisse aus Inspire, Fusion und Apex für diesen Lastfall werden in Anhang 11 bis Anhang 13 dargestellt. Die durch Fusion und Apex erzeugten Geometrien werden zudem in Abbildung 23 dargestellt. Das Ergebnis von Inspire ist nicht zusammenhängend und wird für dieses Szenario nur nebensächlich behandelt.

<i>45° Überhangswinkelrestriktion</i>	händisch	Apex	Fusion	Inspire
Masse [g]	1050,92	492,85	656,99	1,505
Masse Supportstruktur [g]	12,03	119,57	155,15	45,45
<i>uneingeschränkt</i>				
Masse [g]	-	414,39	675,20	852,92
Masse Supportstruktur [g]	-	204,30	148,39	331,74

Tabelle 2: Kennwerte Szenario 1

Die Ergebnisse zur benötigten Supportstruktur werden in Tabelle 2 zusammengefasst. Verglichen mit der händischen Optimierung benötigen die Ergebnisse der Optimierungen aus Fusion, Apex und Inspire Stützstrukturen einer deutlich gesteigerten Masse. Die Stützstruktur für das Ergebnis aus Apex weist eine um den Faktor 10 gesteigerte Masse im Vergleich zur händischen Optimierung auf. Das Ergebnis aus Fusion liegt näherungsweise bei einem Faktor von 13. Die von Inspire erzeugte Geometrie benötigte die leichteste Supportstruktur der drei automatisch durchgeführten Optimierungen, ist aufgrund ihres Nicht-Zusammenhängens allerdings nicht valide.

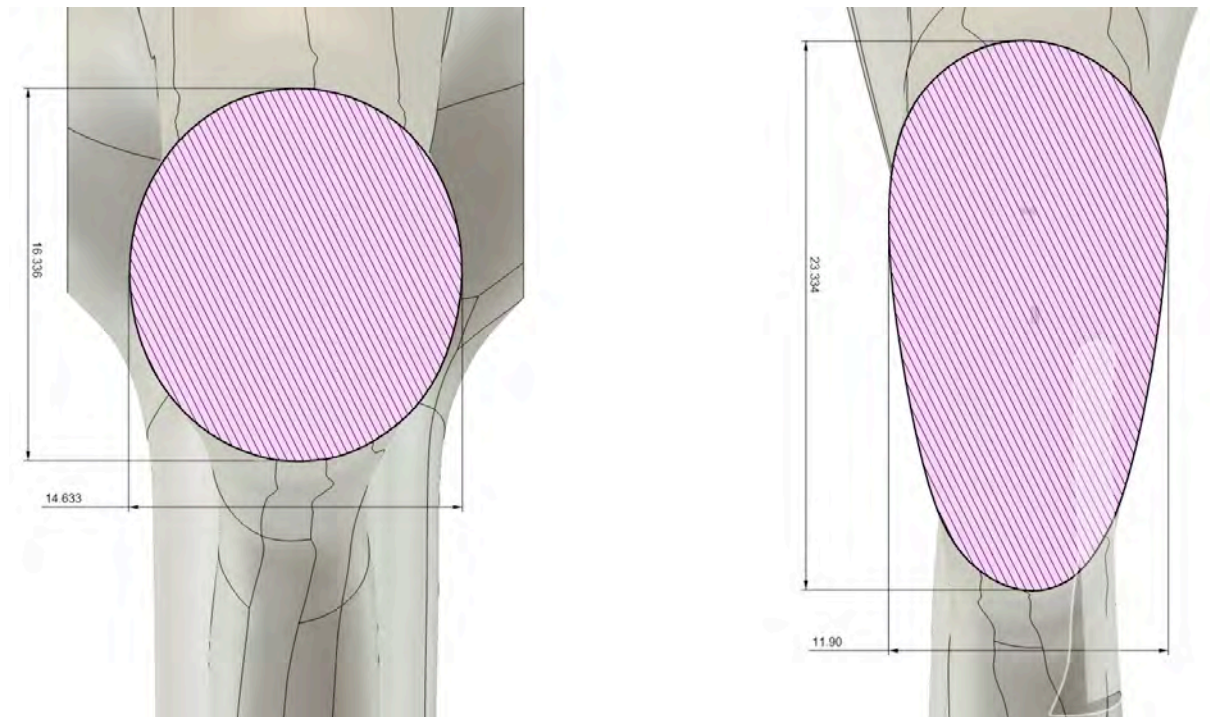


Abbildung 24: Querschnitt des oberen Querbalkens aus Apex. Links uneingeschränkt, rechts Überhangswinkelbeschränkung und Supportreduktion auf hoch

Primärer Mechanismus der Supportvermeidung und Einhaltung des Überhangwinkels ist, sowohl in Fusion als auch in Apex, eine Veränderung des Querschnitts des oberen Querbalkens. Ein Vergleich des Querschnitts des oberen Querbalkens ohne und mit Überhangswinkelbeschränkung ist in Abbildung 24 abgebildet.

Statt eines annähernd runden Querschnitts, bildet Apex einen höheren, sich nach unten verjüngenden Querschnitt aus. Dies minimiert die Fläche, die die Überhangswinkelrestriktion nicht erfüllt. Diese Veränderung ist analog an dem Ergebnis aus Fusion zu erkennen, dargestellt wird das in Anhang 14. Allerdings ist dieser Effekt in der Optimierung durch Fusion weniger stark ausgeprägt, was sich auch in einem Vergleich der benötigten Supportstruktur zwischen uneingeschränkter und eingeschränkter Geometrie nach Tabelle 2 zeigt. Die uneingeschränkt optimierte Geometrie benötigt eine leichtere Stützstruktur als das mit Überhangsrestriktion optimierte Teil. Die notwendigen Supportstrukturen der Optimierungen mit Überhangswinkelrestriktion werden in Anhang 15 dargestellt, die Supportstrukturen für die uneingeschränkten Optimierungen werden in Anhang 16 abgebildet.

Sowohl Fusion als auch Apex bilden Bereiche an der Geometrie aus, die mechanisch irrelevant sind (Ergebnis der FE-Analysen in Anhang 17 bis Anhang 20), gleichzeitig aber keine oder negative Auswirkungen auf die notwendige Supportstruktur haben. Dargestellt werden diese Bereiche in rot markiert in Abbildung 23. Worauf das zurückzuführen ist, kann an dieser Stelle nicht mit Sicherheit bestimmt werden.

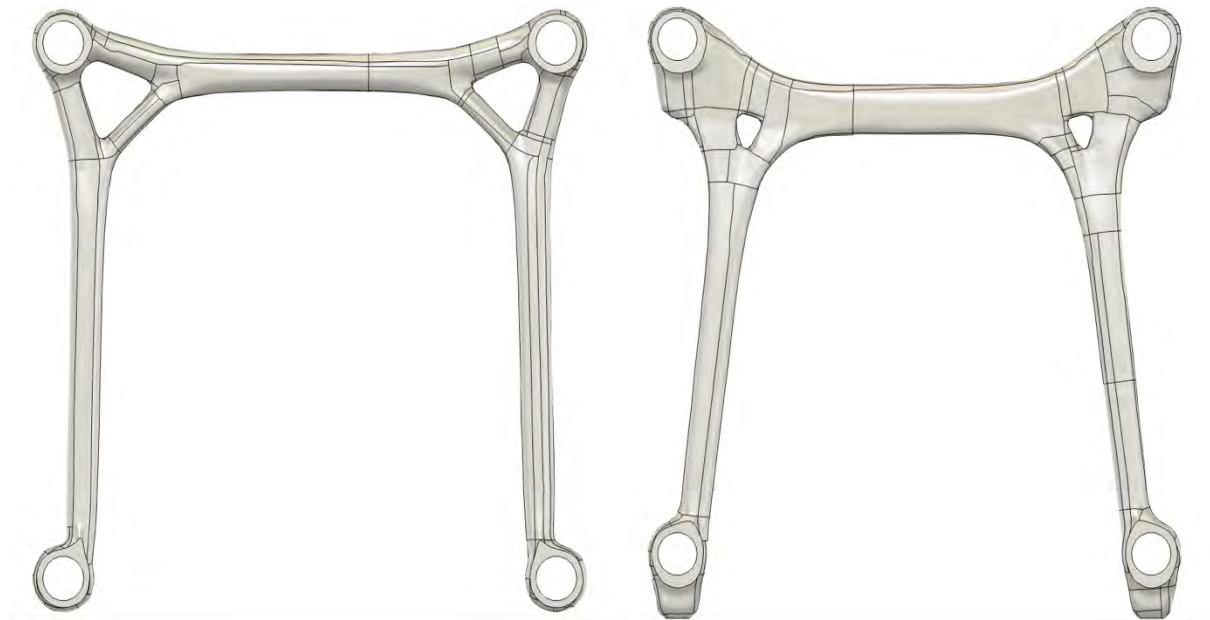


Abbildung 25: Optimierungsergebnis Apex, links uneingeschränkt, rechts mit 45° Überhangswinkelrestriktion und hoher Supportreduktion

Als zweiter Mechanismus der Supportminimierung ist in Apex die Ausbildung einer nach oben hin zulaufenden Trapezstruktur zu erkennen. Dies wird im direkten Vergleich zur ohne Fertigungsrestriktionen optimierten Geometrie auf der linken Seite von Abbildung 25 ersichtlich. So wird der Bereich des Querbalkens, der die Überhangswinkelrestriktion nicht einhält, minimiert. Dieser, in Fusions Level-Set basierendem Ansatz nicht zu beobachtende Mechanismus, ist maßgeblich für die geringere benötigte Supportmasse des Apex Ergebnisses verantwortlich.

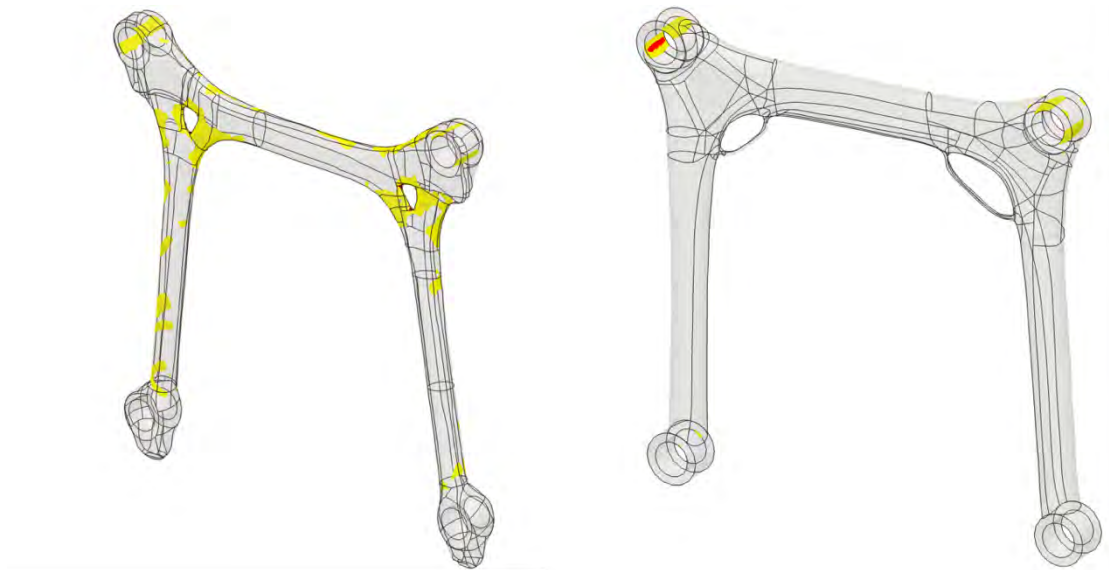


Abbildung 26: FE-Analyse Szenario 1: Links Apex, rechts Fusion

Die benötigte Supportmasse der Optimierungsergebnisse aus Fusion und Apex sind deutlich höher als die der händisch optimierten Geometrie. Gleichzeitig sind die den zulässigen Sicherheitsfaktor überschreitenden Bereich, in Abbildung 26 dargestellt, in Apex deutlich größer als für die händisch optimierte Geometrie der Fall. Das antizipierte Ergebnis wird somit durch alle drei Algorithmen verfehlt. Die Optimierung durch alle drei Algorithmen scheint für das diskutierte Szenario an ihre Grenzen zu stoßen. Keiner der drei Optimierungsalgorithmen ist in der Lage in dem betrachteten Szenario Geometrien zu erzeugen, die sowohl Überhangswinkelrestriktion als auch den minimalen Sicherheitsfaktor für die gesamte Geometrie einhalten. Dabei zeigt die händische Optimierung beispielhaft, dass solche Lösungen existieren. Eine Veränderung der Randbedingungen, um den Algorithmen mehr Freiheiten zu erlauben ist naheliegend. Möglichkeiten dazu bietet das Optimierungsziel. Die bisher durchgeführten Optimierung waren darauf ausgelegt ein bestimmtes Spannungsziel einzuhalten und dabei eine Geometrie möglichst geringer Masse zu erzeugen. Eine Alternative dazu ist die Zielmasse vorzugeben. Weitere Möglichkeiten sind die Vorgabe geringerer Lasten oder eine Veränderung des vorgegebenen Designspaces.

6.2 Testszenario 2

Für die nächste Optimierung wird die Optimierung so eingestellt, dass die Masse nicht als Optimierungsziel, sondern als Randbedingung in die Optimierung eingeht. Fusion und Inspire nutzen dafür nicht die spannungsbasierte Optimierung, wie in den bisher betrachteten Optimierungen. Stattdessen beruhen die Optimierung auf Compliance, bzw. Steifigkeit. Dieser Ansatz wurde in Kapitel 5.2 für SIMP, BESO und Level-Set Methode beschrieben. Die Optimierung von Apex beruht auch für diese Optimierung auf Spannung. [22]

Es wird eine Masse von 1050 g gewählt, entsprechend der Masse der in Szenario 2 händisch optimierten Geometrie. Lastfall und Designspace werden nicht verändert.



Abbildung 27: Optimierungsergebnisse Inspire, Blau mit gemilderter Überhangswinkelrestriktion, Grün uneingeschränkt

Das Optimierungsergebnis mit Überhangswinkelrestriktion von Inspire ist erneut nicht zusammenhängend und somit nicht valide. Das gilt sowohl für eine strikte Anwendung der Überhangswinkelrestriktion als auch für die gemilderte Anwendung der Restriktion, dargestellt in Abbildung 27. Uneingeschränkte und eingeschränkte Geometrie sind in der Abbildung übereinandergelegt, um Unterschiede aufzuzeigen. Auf der linken Seite ist die uneingeschränkte Geometrie im Vordergrund dargestellt, auf der rechten Seite die Optimierung mit gemilderter Überhangsrestriktion. Die Ergebnisse aus Inspire werden für dieses Szenario auf Grund ihrer Nicht-Validität nebensächlich behandelt.

45° <i>Überhangswinkelrestriktion</i>	händisch	Apex	Fusion	Inspire
Masse [g]	1050,92	1149,90	1083,86	900
Masse Supportstruktur [g]	12,03	32,37	94,42	69,35
<i>uneingeschränkt</i>				
Masse [g]	-	1035,37	1088,64	924,06
Masse Supportstruktur [g]	-	286,72	108,32	303,68

Tabelle 3: Kennerwerte Szenario 3

Die Massen der erzeugten Supportgeometrien und die Massen der Geometrien selbst werden in Tabelle 3 festgehalten. Grafische Darstellungen der Supportstrukturen befinden sich in Anhang 21. Erneut wurden diese Werte auch für nicht durch Fertigungsrestriktionen eingeschränkte Optimierungsergebnisse mit dem gleichen Optimierungsziel und der gleichen Gewichtsrestriktion ermittelt. Die Supportmasse und Masse der Geometrien für diese Ergebnisse wird in der unteren Hälfte von Tabelle 3 dargestellt. Grafisch werden die Supportmassen der Optimierungen ohne Überhangswinkelrestriktion in Anhang 22 dargestellt. Als weiterer Vergleichswert werde auch die Massen der händisch optimierten Geometrie aus Szenario 2 in Tabelle 3 festgehalten.



Abbildung 28: Optimierungsergebnisse Apex. Grün uneingeschränktes Ergebnis, Blau mit Überhangswinkelrestriktion und Supportreduktion auf hoch

Mit einer 88,71% geringeren Supportmasse im Vergleich zum uneingeschränkten Optimierungsergebnis, ist die Supportreduktion in Apex in diesem Szenario effizienter als der Algorithmus in Fusion. Gleichzeitig ist der Ansatz einer vorgegebenen Masse auch gegenüber dem Ergebnis aus Apex in Szenario 1 effizienter, was die Supportvermeidung betrifft. Der Überhangswinkel wird weitgehend eingehalten. Auch diese Optimierung benötigt allerdings mehr Support als die händisch optimierte Geometrie aus Szenario 1.



Abbildung 29: Optimierungsergebnisse Fusion. Grün uneingeschränkt, Blau mit Überhangswinkelrestriktion

Erneut ist die Überhangswinkelrestriktion in der Optimierung von Fusion von geringer Relevanz für das Ergebnis der Optimierung. Beide erzeugte Geometrien, abgebildet in Abbildung 29, sind strukturell gleich aufgebaut und unterscheiden sich auch in den Details nur minimal. Die mit Überhangsrestriktion optimierte Geometrie (in blau dargestellt) verfügt an der Unterseite des oberen Querbalkens über stärker ausgeprägt Radian, die vertikalen Balken laufen geringfügig spitzer zusammen. Die mit Überhangswinkelrestriktion optimierte Geometrie benötigt 12,83% weniger Supportmasse als die uneingeschränkt optimierte Geometrie.

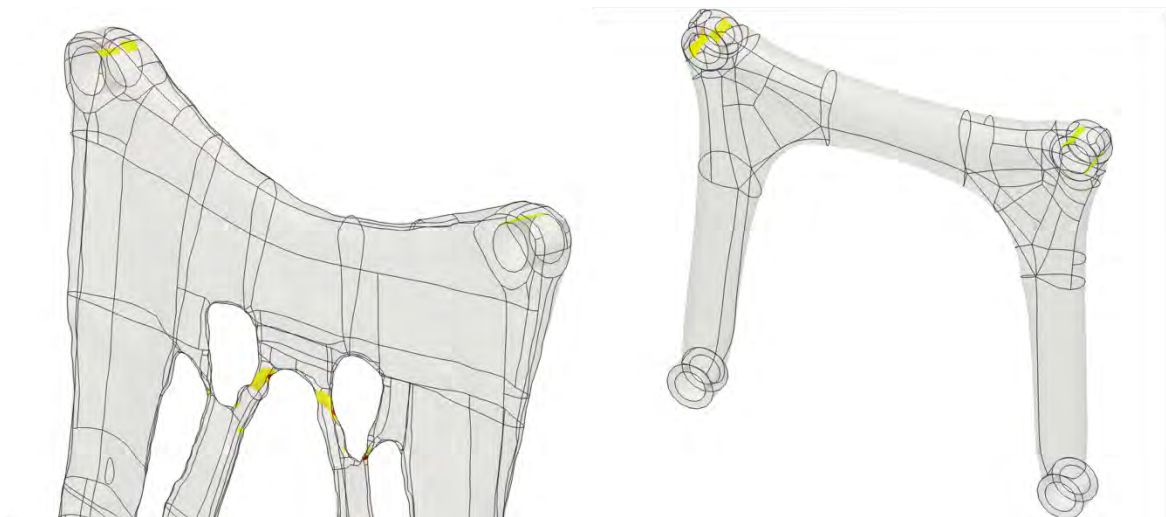


Abbildung 30: FE-Analyseergebnisse: Links Apex, rechts Fusion. Bereiche mit Sicherheitsfaktor unter 1,5 farbig dargestellt

Die FE-Analyse beide Optimierungen ermittelt kleine Bereiche, die einen Sicherheitsfaktor von 1,5 unterschreiten. Sowohl in Apex als auch in Fusion wird der minimale Sicherheitsfaktor als zusätzliche Randbedingung neben der zulässigen Masse definiert. Die Berichte der FE-Analyse zu den Ergebnissen der Optimierung mit Überhangswinkelrestriktion in Apex und in Fusion, werden in Anhang 23 bis Anhang 26 dargestellt.

Die unter dem Steifigkeit maximieren Optimierungsziel entstandenen Geometrien sind sowohl mechanisch als auch bezüglich der benötigten Supportstruktur leistungsfähiger als die Optimierungsergebnisse aus Szenario 1. Ein erwartbares Ergebnis, die Geometrien aus Szenario 2 bestehen aus mehr Material, das die Algorithmen verteilen können, um die mechanischen- und Fertigungscharakteristika zuverlässiger einhalten zu können. Dennoch ist keiner der Algorithmen in der Lage eine Geometrie zu erstellen, die vergleichbar gute Supporteigenschaften, wie die händisch durchgeführte Optimierung hat.

6.3 TestszENARIO 3

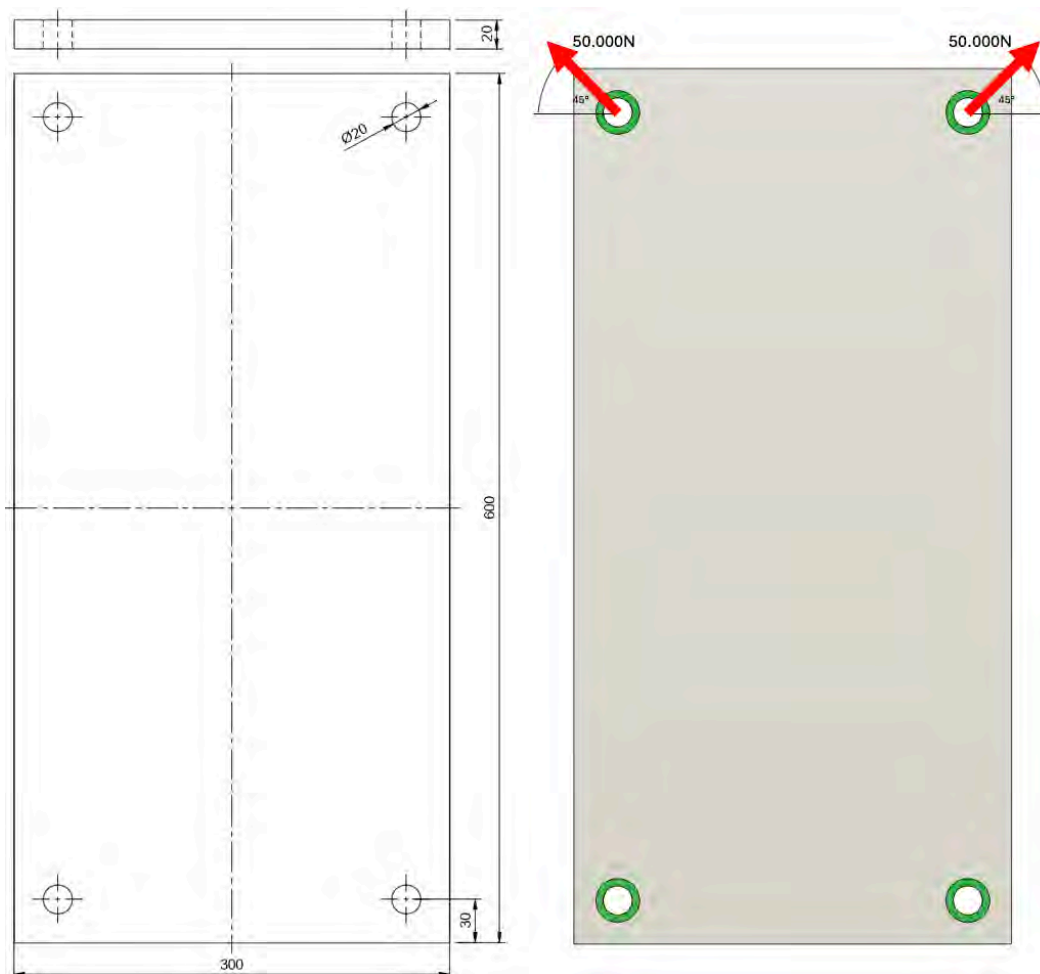


Abbildung 31: Geometrie und Lastfall Szenario 3

Im dritten Szenario wird den drei Algorithmen noch mehr Freiraum gelassen. Dafür wird der Designspace vergrößert, die Geometrie angepasst und die wirkenden Kräfte verringert. In Szenario 2 wird gezeigt, dass die Vorgabe einer Zielmasse in Kombination mit der Maximierung der Steifigkeit als Optimierungsziel der Stützstrukturreduktion zuträglich sein kann. Entsprechend werden Optimierungen mit diesen Einstellungen mit in dieses Szenario aufgenommen. Für dieses Szenario durchlaufen die Level Set und BESO Algorithmen vier Mal die Optimierung. Dabei sind die Einstellungen wie folgt (Optimierungsziele in grün hinterlegt):

	Masse	Sicherheitsfaktor	Steifigkeit	Überhangswinkelrestriktion
1. Durchlauf	minimieren	minimal 1,5	-	keine
2. Durchlauf	minimieren	minimal 1,5	-	max. 45°
3. Durchlauf	maximal 3,96kg	Minimal 1,5	maximieren	keine
4. Durchlauf	maximal 3,96kg	Minimal 1,5	maximieren	max. 45°

Tabelle 4: Optimierungseinstellungen Szenario 3

Die maximale Masse von 3,96kg entspricht 40% der Masse des Designspaces und liegt damit prozentual ungefähr bei dem Doppelten der 21%, die für Szenario 2 angesetzt wurden. Auch hier soll die höher angesetzte maximale Masse als einfach zu erfüllende Randbedingung dienen und so die Einhaltung des vorgegebenen Überhangwinkels begünstigen. Für die Optimierungen in Inspire wird kein minimaler Sicherheitsfaktor vorgegeben, dies ist für die steifigkeitsbasierten Optimierungen nicht möglich.

6.3.1 Inspire

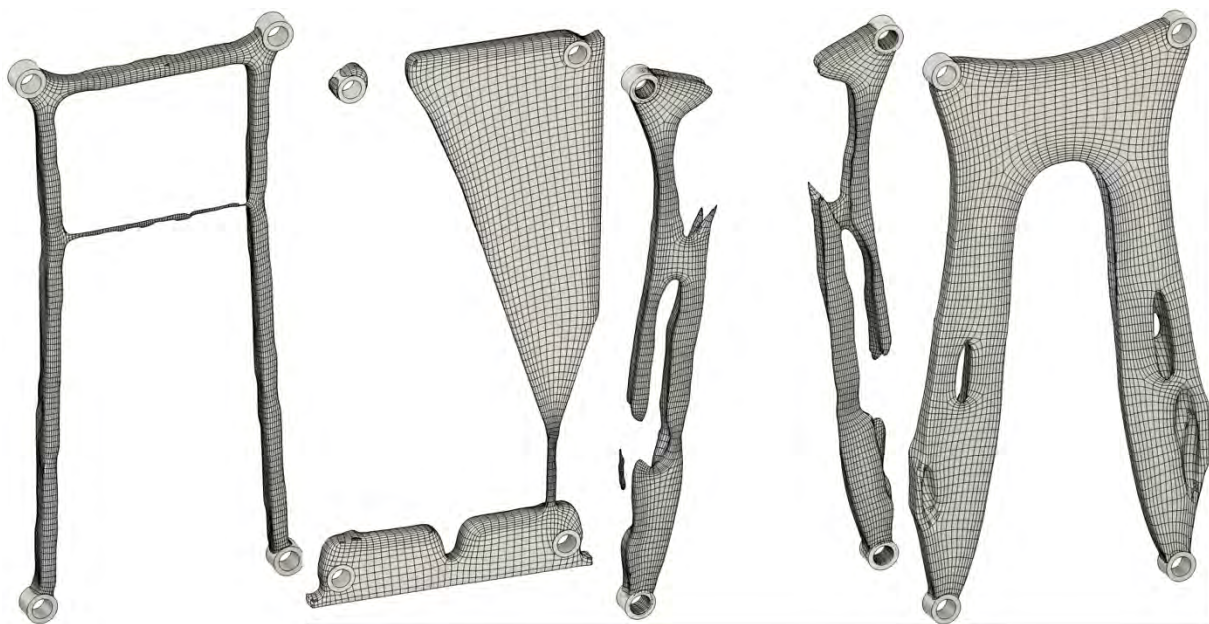


Abbildung 32: Optimierungsergebnisse Inspire, Durchlauf 1 - 4 von links nach rechts

Die Ergebnisse in Inspire waren für die bisherigen Szenarien stets nicht zusammenhängend. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu erzeugen, werden zusätzliche Einstellungen in Inspire vorgenommen. Folgende Optimierungsdurchläufe werden betrachtet (Optimierungsziele in grün hinterlegt):

	Masse	Sicherheitsfaktor	Steifigkeit	Überhangwinkelrestriktion
1. Durchlauf	minimieren	min. 1,5	-	keine
2. Durchlauf	minimieren	min. 1,5	-	max. 45° strikt
3. Durchlauf	minimieren	min. 1,5	-	max. 45° gemildert
4. Durchlauf	minimieren	min. 1,5	-	max. 45° gemildert
5. Durchlauf	max. 3,96kg	-	maximieren	keine
6. Durchlauf	max. 3,96kg	-	maximieren	max. 45° strikt
7. Durchlauf	max. 3,96kg	-	maximieren	max. 45° gemildert

Tabelle 5: Optimierungsdurchläufe Inspire

Durchlauf 3 und 4 werden mit den gleichen Einstellungen gestartet, die Ausgangsgeometrie allerdings händisch angepasst. Inspire erlaubt diese händische Anpassung nach der Optimierung in Form eines Schiebereglers, der die Masse der Geometrie beeinflusst. Da das Ergebnis aus Durchlauf 3 nicht zusammenhängend ist, wurde mit Hilfe dieser manuellen Nachbearbeitung eine zusammenhängende Geometrie erstellt, um Vergleichbarkeit zu schaffen. Die Geometrien aus den ersten vier Durchläufen werden in Abbildung 32 bildlich festgehalten. Die Geometrie aus Durchlauf 3 soll aufgrund ihres nicht Zusammenhängens nicht weiter behandelt werden. Das Gleiche gilt für die Geometrie aus Durchlauf 2. Auch diese Geometrie ist nicht zusammenhängend und somit offensichtlich nicht valide.

	Masse [g]	Supportmasse [g]	min. Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie
1. Durchlauf	1061,30	905,85	0,014
2. Durchlauf	3803,42	114,00	-
3. Durchlauf	1748,32	118,72	-
4. Durchlauf	4176,78	206,20	3,794
5. Durchlauf	3918,79	141,85	5,688
6. Durchlauf	4174,00	43,75	0,503
7. Durchlauf	2724,33	349,06	1,793

Tabelle 6: Kennwerte Optimierungslauf 1 bis 7 Inspire

Durchlauf 2 und Durchlauf 3 sind nicht zusammenhängend, von den mit Überhangswinkelrestriktion optimierten Durchläufen mit Optimierungsziel Masse minimieren, bleibt Durchlauf 4 übrig. Dessen Masse liegt deutlich über den Massen seiner Äquivalente aus Apex und Fusion. Ein Vergleich zu diesen ist aufgrund der händischen Nacharbeit nicht zulässig und aufgrund der deutlich höheren Masse nicht sinnvoll. Die manuelle Nacharbeit über den Schieberegler stellt sich somit als valides Mittel für die Erzeugung zusammenhängender Geometrien heraus, Vergleichbarkeit bieten die so erzeugten Ergebnisse allerdings nicht mehr. Somit ist der Einsatz der Schieberegels insbesondere für die Veränderung von Optimierungsergebnissen, die mit Massenrestriktion entstanden sind, nicht sinnvoll.



Abbildung 33: Optimierungsergebnisse Inspire, Durchlauf 5 - 7 von links nach rechts

Die Durchläufe mit Optimierungsziel Steifigkeit maximieren erweisen sich erneut als vielversprechender. Durchlauf 6 zeigt den Vorteil einer strikten Überhangswinkelrestriktion auf. Auch hier ist Support notwendig, allerdings nur 12,53% der Masse, die die mit gemilderter Überhangswinkelrestriktion optimierte Geometrie benötigt. Allerdings verfügt die Geometrie aus Durchlauf 7 über den höheren minimalen Sicherheitsfaktor. Die minimalen Sicherheitsfaktoren, die innerhalb der optimierten Geometrien auftreten (beizubehaltende Geometrien ausgenommen) werden in Tabelle 6 dargestellt. Außer an den Stellen der Lasteinwirkung treten in der Geometrie keine Bereiche mit Sicherheitsfaktor unter 1,5 auf. Auszüge aus der FE-Analyse zu Durchlauf 6 und 7 sind Anhang 27 und Anhang 28 zu finden. Bilder der notwendigen Supportgeometrien für alle Durchläufe sind in Anhang 29 und Anhang 30 zu finden.

6.3.2 Apex



Abbildung 34: Optimierungsergebnisse Apex, im Vordergrund von links nach rechts: Durchlauf 1-4; im Hintergrund von links nach rechts Durchlauf 2,1,4,3

Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der Apexoptimierungen. Zur Vergleichbarkeit sind die mit Überhangswinkelrestriktion optimierten Geometrien in Blau dargestellt und die ohne Überhangswinkelrestriktion optimierten Geometrien in Grün. Links die beiden Ergebnisse für die Optimierung mit Randbedingung minimaler Sicherheitsfaktor 1,5, rechts die beiden Geometrien aus der Optimierung mit maximaler Masse 3,96 kg als Randbedingung. Die ersten beiden Durchläufe erzeugen jeweils dünnstrebige Geometrien, die dem Lastfall nicht standhalten. Große Teile der beiden Geometrien weisen einen Sicherheitsfaktor unter 1,5 auf. Auszüge aus der FE-Analyse zu Durchlauf 2 werden in Anhang 31 dargestellt. Zudem ist die Masse der notwendigen Supportstruktur, festgehalten in Tabelle 7, für die Optimierung mit Überhangswinkelrestriktion höher als für die uneingeschränkte Optimierung. Bildlich festgehalten werden alle vier Supportstrukturen in Anhang 32.

	Masse [g]	Supportmasse [g]	min. Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie
1. Durchlauf	515,54	261,45	0,515
2. Durchlauf	516,61	332,78	0,71
3. Durchlauf	4122,87	425,99	7,378
4. Durchlauf	4222,66	13,91	4,168

Tabelle 7: Kennwerte für die Optimierungen in Szenario 4 durch Apex

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die Ergebnisse der FE-Analyse in Fusion von den Ergebnissen der FE-Analyse in anderen Programmen unterscheiden. Die der Optimierung zu Grunde liegende FE-Analyse in Apex errechnet eine maximale von Mises Vergleichsspannung von 298 MPa für die in Durchlauf 2 entstehende Geometrie, Fusion eine maximale Vergleichsspannung von 778,177 MPa. Ursache dafür können leichte Veränderungen an der Geometrie im Zuge der Dateierstellung, die unterschiedliche Vernetzung in den unterschiedlichen Programmen oder andere Eigenheiten der Programme sein. Zudem sind Singularitäten nicht ausgeschlossen. Im Fall der Analyse des zweiten Apex Durchlaufs führt eine feinere Vernetzung im Bereich des minimalen Sicherheitsfaktors zu stetig steigenden Spannungswerten, was auf eine Singularität hindeutet. In anderen Fällen, etwa für Durchlauf 3 und 4 in Fusion, werden die höchsten Spannungswerte an den Stellen der Krafteinleitung oder an den Kanten der Ösen festgestellt. Beides häufig Ursachen für Singularitäten. Das ist auch der Grund, warum nicht alleine der minimale Sicherheitsfaktor als Vergleichswert für die mechanische Güte der optimierten Geometrien zugrunde gelegt wird. In zu vielen Fällen erscheint es wahrscheinlich, dass dieser Wert auf Singularitäten beruht. Den Sicherheitsfaktor außerhalb der beizubehaltenden Geometrien zu betrachten oder den Sicherheitsfaktor auf ganze Bereiche innerhalb der Geometrie zu beziehen, erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoller, da diese Betrachtung weniger anfällig für Singularitäten ist. Gleichzeitig erlaubt Fusion keine Auswertung des Volumens dieser Bereiche, weshalb kein numerischer Parameter daraus abgeleitet werden kann. Die Größenunterschiede dieser Volumina sind jedoch so deutlich, dass auch eine Sichtprüfung dieser, wie bisher geschehen, als hinreichend angenommen werden kann, um die Güte der Optimierungsergebnisse in Bezug zueinander setzen zu können.

Genauere Ergebnisse können unter Einsatz einer unabhängigen Analysesoftware, etwa Ansys, generiert werden. Diese Arbeit soll sich allerdings auf Mechanismen der Supportvermeidung und den Vergleich zwischen SIMP, BESO und Level Set Methode konzentrieren, weshalb solch eine Analyse mit einem Drittanbieter-Programm nicht durchgeführt wird. Es sei jedoch festgehalten, dass die Analyseergebnisse divergieren. Für weitere FE-Analysen in dieser Arbeit wird weiterhin Fusion verwendet.

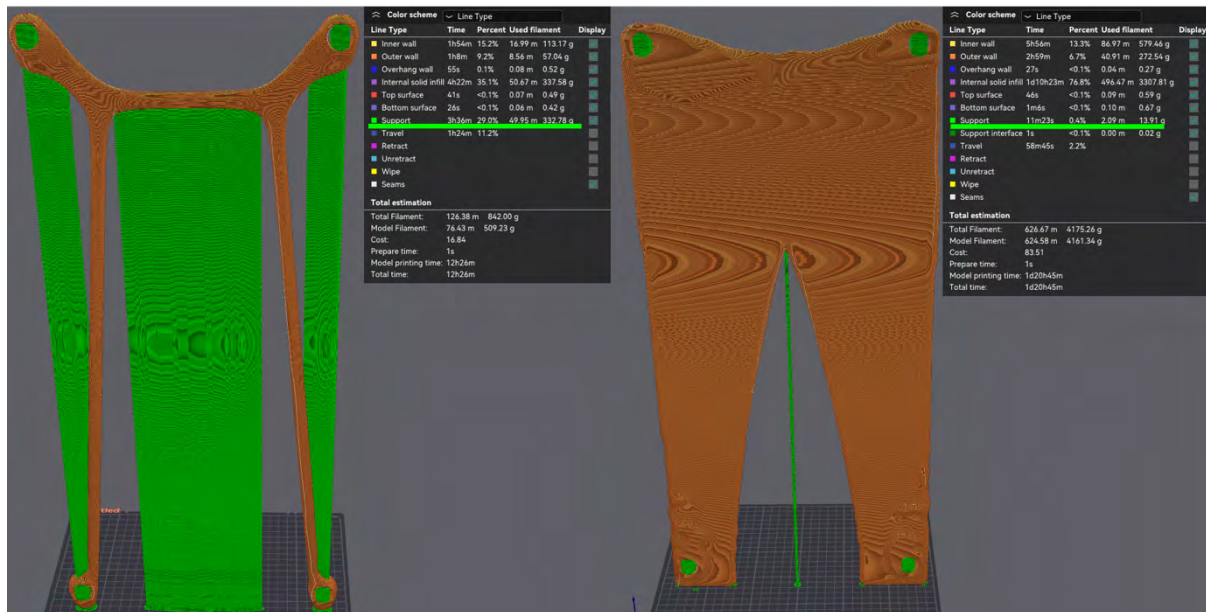


Abbildung 35: Supportstruktur für die Optimierungsergebnisse aus Apex, links Durchlauf 2, rechts Durchlauf 4

Ein erfolgversprechenderes Ergebnis als die ersten beiden Optimierungsdurchläufe, liefert Durchlauf 4. Der Überhangswinkel wird weitestgehend eingehalten, wie in Abbildung 35 dargestellt wird. Das Ergebnis der FE-Analyse, Bericht dazu in Anhang 33 und Anhang 34, hält zudem vollständig die Randbedingung eines minimalen Sicherheitsfaktors von 1,5 ein. Diese Geometrie kann als erstes als vollständig zufriedenstellendes Ergebnis betrachtet werden. Dennoch überschreitet auch dieses Ergebnis die vorgegebene Randbedingung einer Masse von unter 3,96 kg. Die Masse aller Optimierungsergebnisse sind in Tabelle 7 festgehalten. Das primäre Ziel der Supportvermeidung oder Supportminimierung setzt Durchlauf 4 von allen bisherigen Optimierungen in allen Szenarien (ausgenommen die händische Optimierung aus Szenario 1) am vielversprechendsten um.

6.3.3 Fusion



Abbildung 36: Optimierungsergebnisse Fusion, Durchlauf 1-4 von links nach rechts

Die Optimierung in Fusion zeigen ein Charakteristikum auf, das sich in allen betrachteten Szenarien für Fusion ergeben hat. Der Einfluss der Überhangswinkelrestriktion ist weniger produktiv als in Inspire oder Apex und führt teilweise bis hin zu kontraproduktiven Ergebnissen. Die notwendigen Supportmassen für die Ergebnisse der Optimierungen sind in Tabelle 8 festgehalten. Zwischen Durchlauf 1 und 2 sorgt die Überhangswinkelrestriktion für eine um 7,91% geringere Supportmasse. Zwischen Durchlauf 3 und 4 für eine um 41,48% höhere Supportmasse. In ihren geometrischen Ausbildungen unterscheiden sich die mit Einschränkung optimierten Strukturen kaum von ihren ohne Überhangswinkelrestriktion gefertigten Gegenstücken. Bildlich dargestellt wird das in Abbildung 36. Im Vordergrund sind die Geometrien aus Durchlauf 1-4 dargestellt, im Hintergrund ihre Gegenstücke mit bzw. ohne Überhangswinkelrestriktion. In blau jeweils die Ergebnisse der Optimierungen mit Überhangswinkelrestriktion, in grün die Ergebnisse der Optimierungen ohne Überhangswinkelrestriktion. Die Ausprägung der Supportstrukturen aller vier Optimierungsläufe wird in Abbildung 37 dargestellt.

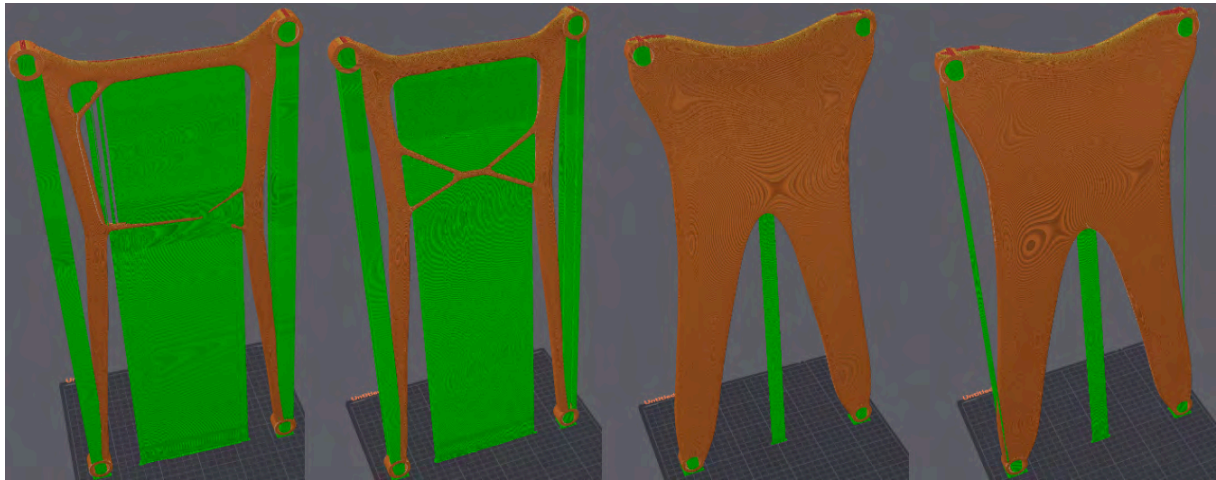


Abbildung 37: Supportgeometrien, Durchlauf 1 bis 4 von links nach rechts

Die Ergebnisse aus Durchlauf 3 und 4 sind vergleichsweise leistungsstark. Die Supportmassen beider Durchläufe sind geringer als die niedrigste Supportmasse aller Inspire Optimierungen in diesem Szenario. Die fast identische Geometrie für Durchlauf 3 und Durchlauf 4 und die höhere Supportmasse in Durchlauf 4 gegenüber Durchlauf 3 lässt jedoch Zweifel daran aufkommen, ob das auf Supportvermeidungsmechanismen in Fusion zurückzuführen ist. Vielmehr deuten auch die Ergebnisse der vorherigen Szenarien darauf hin, dass die Überhangwinkelrestriktion eine stark untergeordnete Rolle in der Level-Set basierten Optimierung durch Fusion spielt.

	Masse [g]	Supportmasse [g]	min. Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie
1. Durchlauf	957,54	401,45	1,636
2. Durchlauf	1019,30	369,97	1,560
3. Durchlauf	3846,64	27,07	8+
4. Durchlauf	3843,59	38,30	7,471

Tabelle 8: Kennwerte der Optimierungsläufe in Fusion

Anders als Inspire und Apex hält Fusion die Massen-Randbedingung für Durchlauf 3 und 4 ein. Durchlauf 1 und 2 halten die Sicherheitsfaktor-Randbedingung ein. Niedrigere Sicherheitsfaktoren treten zwar an den Punkten der Lasteinleitung auf, sind allerdings auf Singularitäten zurückzuführen. Die restliche Geometrie unterschreitet den Sicherheitsfaktor in beiden Fällen nicht. Und auch Durchlauf 3 und 4 erzeugen Geometrien, die den minimalen Sicherheitsfaktor von 1,5 einhalten. Bilder der FE-Analyse von Durchlauf 2 und 4 werden in Anhang 35 und Anhang 36 gezeigt.

6.4 Leistungsfähigkeit der Überhangswinkelkontrolle in Inspire, Apex und Fusion

Die betrachteten Szenarien zeigen auf, dass Topologieoptimierung und generatives Design ein komplexes Werkzeug und kein Allheilmittel sind. Ohne genaue Einstellungen, klare Zieldefinition und genaue Analyse der optimierten Geometrien, sind selbst für so einfache Szenarien, wie hier betrachtet, keine sinnvollen Ergebnisse zu erwarten.

Die Überhangswinkelkontrolle erweist sich dabei für alle drei untersuchten Algorithmen als nur in Ansätzen umsetzbar. Insbesondere in Kombination mit der Massenminimierung als Optimierungsziel ist zwar eine Verminderung der notwendigen Supportmasses möglich, völlig oder zumindest zu weiten Teilen, stützstrukturlose Designs waren in keinem Fall das Ergebnis. Größere Erfolge in der Supportvermeidung erreichten die Optimierungsläufe mit klar definierter Massenobergrenze und steifigkeitsbasierter Optimierung. Es ist davon auszugehen, dass das mit der Priorisierung der unterschiedlichen Bedingungen innerhalb der Optimierung zusammenhängt. Egal, ob die Massenminimierung oder die Steifigkeitsmaximierung als Optimierungsziel definiert wird, für jede Optimierung müssen die Faktoren Masse, Spannung oder/und Steifigkeit und (falls angegeben) Fertigungsrestriktionen gegeneinander abgewogen werden. Wie diese Priorisierung für jedes Programm aussieht, entscheidet über die entstehenden Ergebnisse.

Inspire priorisiert bei auf „strikt“ eingestellter Überhangswinkelkontrolle den Überhangswinkel. Das führt konstant zu geringen notwendigen Supportmassen. Im Großteil der Ergebnisse aus den betrachteten Szenarien hängen die Ergebnisse allerdings nicht zusammen und sind somit nicht zulässig.

Fusion priorisiert, nach den durchgeführten Optimierungen zu urteilen, die Erfüllung der vorgegebenen Randbedingungen der Optimierung. Die Ergebnisse erfüllen die Spannungsanforderungen eines Mindestsicherheitsfaktors von 1,5 und überschreiten die vorgegebene Massenrandbedingung nicht. Die Supportreduktion spielt eine untergeordnete Rolle. Die erreichten Supportvermindierungen sind im Vergleich zu den anderen beiden Programmen gering. In mehreren Fällen steigt die Supportmasse für die Geometrien mit Überhangswinkelrestriktion an.

Apex und Inspire mit gemilderter Überhangswinkelrestriktionseinstellung stellen einen Kompromiss zwischen den beiden beschriebenen Extremen dar. Apex ist konstant in der Lage Geometrien zu erzeugen, die eine geringere Supportmasse benötigen als ihre Gegenstücke aus Fusion. Gleichzeitig sind die Geometrien zusammenhängend, was in Inspire nur für einen Teil der Ergebnisse der Fall ist.

In den betrachteten Szenarien erreichen die Optimierungen mit Steifigkeitsmaximierung als Optimierungsziel Ergebnisse mit geringeren notwendigen Supportmassen. Daraus einen generellen Schluss abzuleiten, erscheint allerdings an dieser Stelle nicht gerechtfertigt. Dafür wäre die Untersuchung weiterer Lastfälle, Randbedingungen und vor allem weiterer Designspaces notwendig.

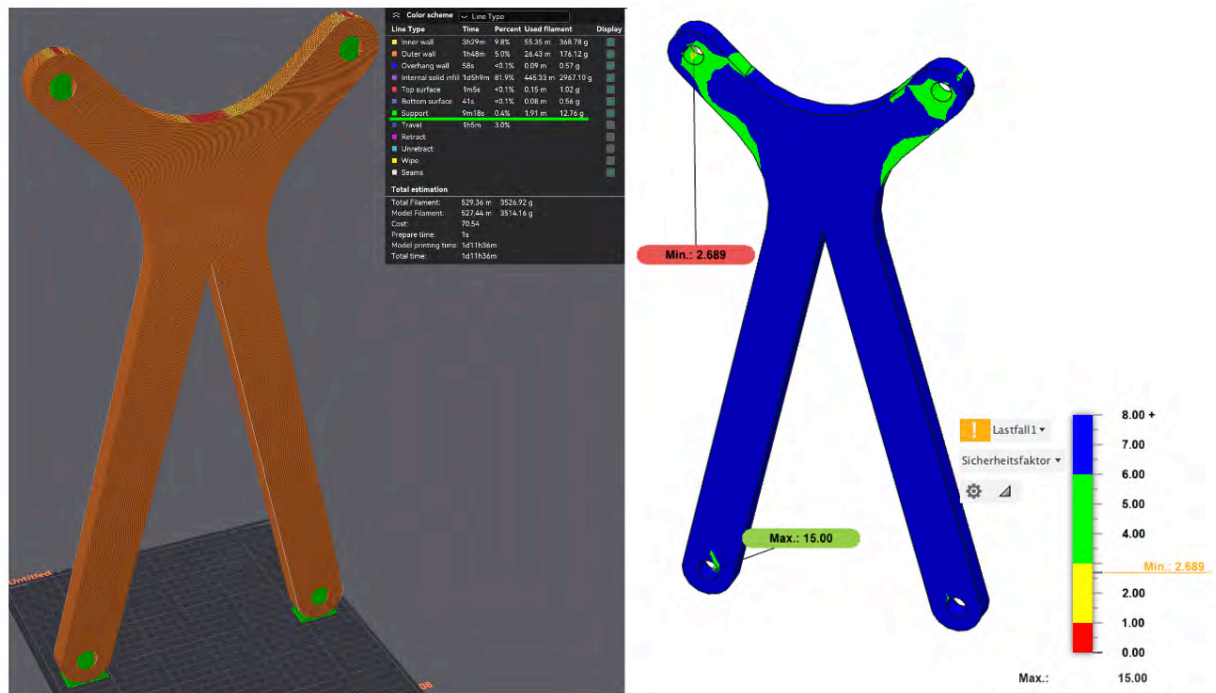


Abbildung 38: Von links nach rechts: Supportgeometrie, FE-Analyse Sicherheitsfaktor

Zum Schluss dieses Kapitels bleibt festzuhalten: Für solch einfache Szenarien ist die händische Optimierung eine nicht zu vernachlässigende Option. Sowohl für Szenario 1 als auch für Szenario 3 kann händisch schnell eine supportfrei zu fertigende Geometrie erstellt werden, die, bei Einhaltung der zulässigen maximalen Masse, ähnlich spannungsarm oder spannungsärmer als die Ergebnisse aller drei Optimierungsalgorithmen ist. Die händisch optimierte Geometrie zu Szenario 4 wird in Abbildung 38 dargestellt. Der Bericht zur FE-Analyse der händisch optimierten Geometrie für Szenario 4 wird in Anhang 37 und Anhang 38 dargestellt.

7 Dickenkontrolle in Inspire, Apex und Fusion

Neben der Überhangswinkelkontrolle bieten Apex, Inspire und Fusion alle eine Möglichkeit der Dickenkontrolle an. Wie in Tabelle 1 beschrieben, ist die Anwendung dieser in allen Programmen unterschiedlich. In allen drei Programmen ist die Restriktion der minimalen Dicke möglich. Die maximale Dicke lässt sich in Fusion nicht beschränken. Wie die Codeimplementierungen in Kapitel 5.3 gezeigt haben verfügen schon einfache Implementierungen von SIMP, BESO und Level Set über eine Möglichkeit die Dicken der entstehenden Geometrien zu beeinflussen. Dort wird Dicke über einen Regulierungsparameter beeinflusst. Konkrete Werte für die Dicke können in diesen grundlegenden Implementierungen von SIMP, BESO und Level-Set Methode nicht vorgegeben werden.

In Apex, Fusion und Inspire ist diese Vorgabe konkreter Werte möglich bzw. notwendig. Inspire und Fusion erlauben keine Optimierungen ohne die Definition einer minimalen Dicke. In Apex ist die Eingabe optional. Genauere Angaben, wie die minimale Dicke gemessen wird, macht keiner der drei Hersteller. Als für diese Arbeit geeignet, da auch für komplexere Geometrien anwendbar, hat sich folgende Definition durchgesetzt: Die Dicke wird als das kleinste Maß innerhalb eines beliebigen Querschnitts einer Geometrie, zwischen zwei Begrenzungsflächen dieser Geometrie definiert. Das Maß und der Querschnitt müssen dabei orthogonal zu wenigstens einer der Begrenzungsflächen sein.

7.1 Minimale Dicke

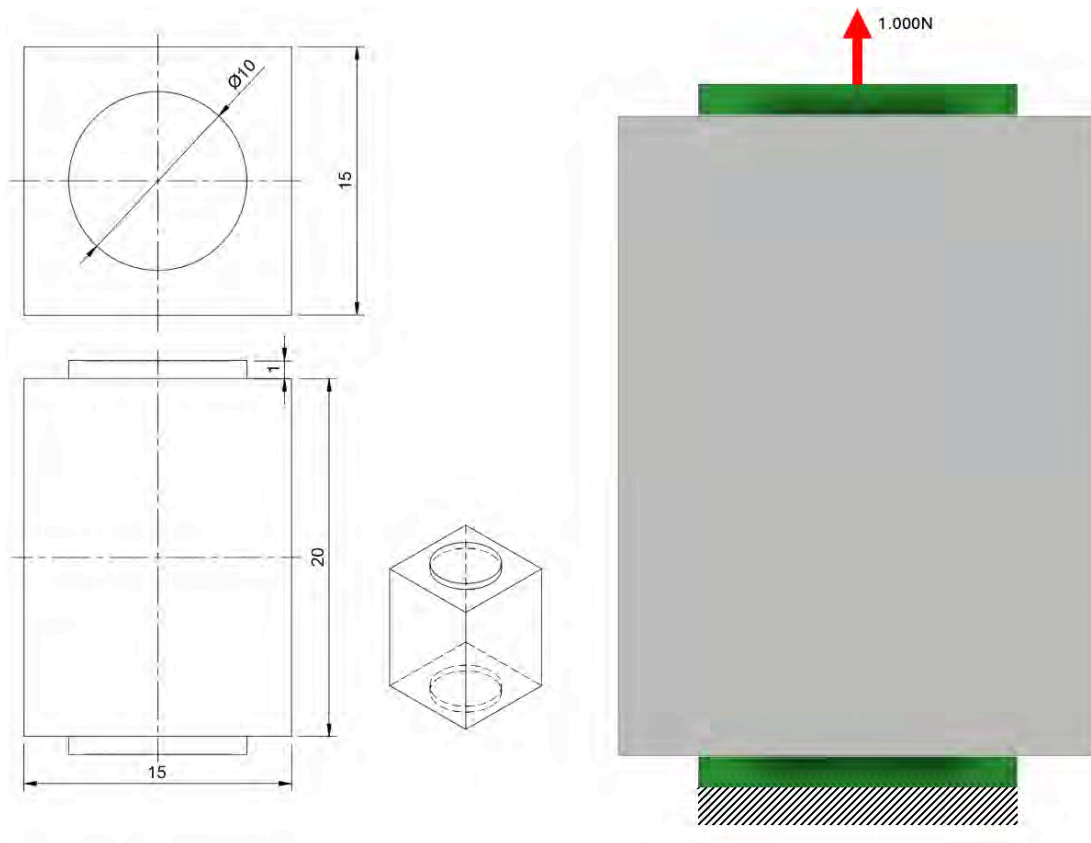


Abbildung 39: Maße und Lastfall für die Untersuchung der Dickenrestriktion

Untersucht wird ein Lastfall mit einer wirkenden Kraft und einer Einspannung. Als beizubehaltende Geometrie werden zwei Zylinder einer Höhe von 1 mm definiert. Der Designspace liegt dazwischen und ist quaderförmig. Alle relevanten Maße und der Aufbau des Szenarios können Abbildung 39 entnommen werden. Der untere Zylinder ist an der Unterseite fest eingespannt, die Kraft wirkt auf die Oberseite des oberen Zylinders. Für dieses Szenario werden die Anforderung an die minimale Dicke variiert. Initialer Wert sind 2 mm. Es wird in allen drei Programmen eine spannungsbasierte Optimierung genutzt. Somit lautet das Optimierungsziel aller Optimierungen Masse minimieren. Die Randbedingung ist die Einhaltung eines minimalen Sicherheitsfaktors von 1,5.

Die im weiteren Verlauf dieses Kapitels angegebenen Maße sind Näherungen. Die erzeugten Geometrien verfügen alle über eine säulenartige Ausprägung. Deren Querschnitt ist meist nicht exakt rund, dennoch werden sie im Laufe dieses Kapitels als näherungsweise rund angesehen. Diese Näherung kann genau genug vorgenommen werden, um ein realistisches Bild bezüglich der Einhaltung der hier betrachteten Dickenrestriktion abzugeben.

7.1.1 Inspire



Abbildung 40: Von links nach rechts Optimierungen mit den vorgegebenen Mindestdicken: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm

Inspire erlaubt keine Optimierung ohne die Definition einer minimalen Dicke. Über diese minimale Dicke bestimmt Inspire die Elementgrößen des FE-Netzes. Kleinere minimale Dicken führen somit in Inspire zu höherem Rechenaufwand. In dem betrachteten Szenario ist der genutzte Rechner nicht in der Lage eine Lösung für eine minimale Dicke von 1 mm zu berechnen, der Rechenaufwand ist zu groß. Da das Netz direkt über die minimale Dicke gesteuert wird, kommt es auch für unrealistisch hoch angenommene minimalen Dicken zu Berechnungsproblemen. Ab einer Vorgabe der minimalen Dicke von 8 mm ist das Ergebnis ein leerer Designspace. Das ist auf die Größe der einzelnen Elemente des Netzes zurückzuführen. Der SIMP-basierte Algorithmus in Inspire berechnet für keins der Elemente Spannungen, die hoch genug sind, um die Elemente als notwendig für den Lastfall zu kategorisieren. Das Gleiche geschieht bei zu geringen Lastfällen oder falscher Materialauswahl.

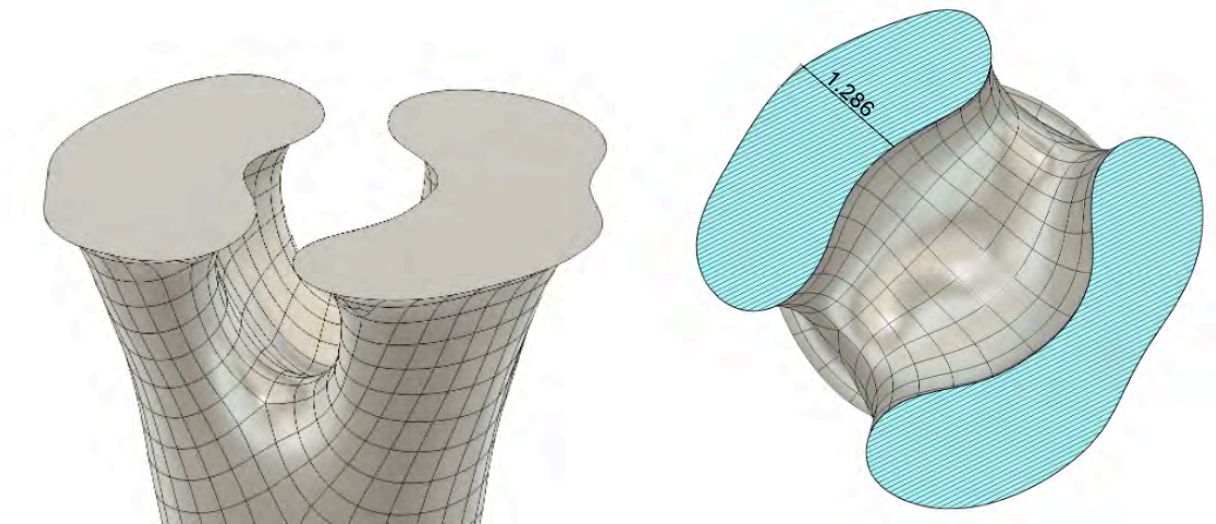


Abbildung 41: Links: Oberer Teil der Geometrie für die Optimierung mit vorgegebener Mindestdicke 2mm, rechts Schnittansicht

Somit generiert Inspire für dieses Szenario zwischen 2 mm und 7 mm minimaler Dicke Ergebnisse. Für alle Optimierungen wird die vorgegebene minimale Dicke nicht eingehalten. Für 2 mm minimale Dicke generiert Inspire unter der oberen Platte eine aufgeteilte Geometrie. Während die Geometrie im unteren Teil säulenartig geformt ist, ist sie oben in zwei Teile geteilt. In diesem Bereich wird weder die Dickenrestriktion noch der minimale Sicherheitsfaktor eingehalten. Im unteren, säulenartigen Bereich wird beides eingehalten. Die Geometrie für die vorgegebene Mindestdicke von 2 mm wird in Abbildung 40 und vergrößert in Abbildung 41 dargestellt. Der zugehörige FE-Analysebericht ist in Anhang 39 und Anhang 40 zu finden.



Abbildung 42: Von links nach rechts: Optimierungsergebnisse für vorgegebene Mindestdicken von: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm. Unten mit eingebettetem Zylinder des Durchmessers 3 mm

Weiterhin untersucht werden vorgegebene Mindestdicken von 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm und 7 mm. Alle erzeugten Geometrien weisen an der dünnsten Stelle Dicken von unter 3 mm auf. In alle Geometrien wird im Bereich der Säule ein Zylinder mit dem Durchmesser 3 mm eingebettet. Für die Optimierungen mit 4 mm, 5 mm, 6 mm und 7 mm Mindestdicke umgibt der Zylinder stellenweise die gesamte Säule. Somit muss selbst die maximale Dicke in diesen Bereichen unter 3 mm liegen. Bildlich dargestellt wird das in Abbildung 42. Die kleinste gemessene Dicke tritt dabei im Modell mit 7 mm vorgegebener Mindestdicke auf und liegt bei unter 0,5 mm. Es folgt das Modell mit vorgegebener Mindestdicke 4 mm mit einer gemessenen minimalen Dicke von unter 1,8 mm, das Modell vorgegebene Mindestdicke 6 mm mit einer gemessenen minimalen Dicke von 2 mm und das Modell vorgegebene Mindestdicke 5 mm mit einer gemessenen minimalen Dicke von 2,6 mm. Die gemessene Mindestdicke ist somit in vielen der hier untersuchten Optimierungen gegenläufig zur vorgegeben minimalen Dicke. Dies ist vermutlich auf das die mit zunehmender vorgegebener minimaler Dicke steigenden Elementgrößen in Kombination mit den in Inspire stark ausgeprägten Glättungsalgorithmen im Zuge der Modellerstellung zurückzuführen.

7.1.2 Apex



Abbildung 43: Ganz Links: Uneingeschränkte Geometrie. Dann, von links nach rechts, jeweils mit eingebettetem Zylinder des Durchmessers 2,4 mm in grün: Uneingeschränkte Geometrie, Mindestdicke 1 mm, Mindestdicke 2 mm

Ohne Dickenvorgabe erzeugt Apex eine Geometrie aus einer einzelnen Säule mit einem Durchmesser von 2,4 mm. Dargestellt wird das in Abbildung 43. Diese Geometrie erfüllt den Mindestsicherheitsfaktor von 1,5. Bericht der FE-Analyse dazu in Anhang 41 und Anhang 42. Diese Geometrie kann als Referenz für die anderen erzeugten Geometrien genutzt werden. Die 2,4 mm minimale Dicke treffen auch für die Ergebnisse der Mindestdicke 1 mm und 2 mm zu. Die uneingeschränkte Optimierung zeigt auf, dass eine minimale Dicke von 2,4 mm notwendig ist, um die Randbedingung des minimalen Sicherheitsfaktors von 1,5 einzuhalten. Entsprechend erzeugen die Optimierungen mit den Vorgaben minimale Dicke 1 mm und minimale Dicke 2 mm auch Geometrien mit einer Dicke von mindestens 2,4 mm. Diese Dicken sind somit nicht auf die Dickenrestriktion, sondern auf das Szenario selbst zurückzuführen.

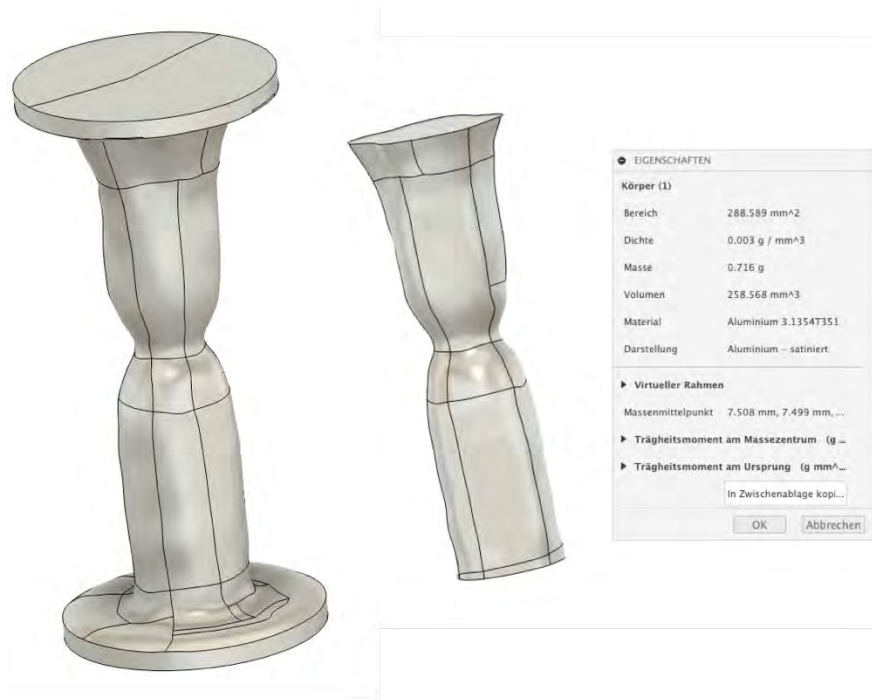


Abbildung 44: Links gesamte Geometrie für Mindestdicke 3mm, rechts Säulenteil der Geometrie

Ergebnisse, die nicht auf den Lastfall, sondern die Dickenrestriktion zurückzuführen sind, können entsprechend erst ab einer vorgegebenen Mindestdicke von über 2,4 mm auftreten. Entsprechend soll als nächstes eine vorgegebene Mindestdicke von 3 mm betrachtet werden. Diese Vorgabe wird nicht eingehalten. Die Einschnürung in der Mitte der Geometrie, zu sehen in Abbildung 44, hat eine minimale Dicke von 2,7 mm. Neben dem Unterschreiten der minimalen Dicke wird auch der minimale Sicherheitsfaktor nicht eingehalten, der FE-Analysenbericht dazu wird in Anhang 43 dargestellt.

Ein weiteres Anheben der minimalen Dicken führt zu ähnlich verfehlten Ergebnissen. Die vorgegebenen minimalen Dicken werden unterschritten, teilweise sind die Geometrien nicht zusammenhängend. Beispielhaft werden die erzeugten Geometrien für minimale Dicken von 4 mm, 5 mm und 10 mm in Anhang 44 dargestellt. Sie alle erfüllen die Anforderung an die minimale Dicke nicht.

7.1.3 Fusion



Abbildung 45: Ergebnisse für minimalen Dicke von: uneingeschränkt, 1 mm, 2 mm (von links nach rechts)

Die uneingeschränkte Geometrie in Fusion erfüllt die Mindestanforderung an den Sicherheitsfaktor (FE-Analysebericht in Anhang 45 und Anhang 46). Wie in Apex, wird eine Geometrie in Form einer einzelnen Säule ausgebildet. Diese hat einen minimalen Durchmesser von 3 mm. Dieser stark von der in Apex ausgebildeten minimalen Dicke, hängt mit der Rechenweise gegen Streckgrenze für Fusion und gegen Zugfestigkeit in Apex zusammen. Die Geometrien mit Dickenvorgabe von mindestens 1 mm und mindestens 2 mm sind schematisch gleich aufgebaut, die ausgebildete Säule ist mit einem minimalen Durchmesser von 2,8 mm allerdings dünner. Gleichzeitig erfüllen beide Geometrien die Anforderung an den Sicherheitsfaktor. Fusion generiert für die beiden Fälle dieselbe Geometrie. Die FE-Analyse beider Geometrien fällt identisch aus, der Bericht zur FE-Analyse der Optimierung mit vorgegebener minimalen Dicke 1 mm wird in Anhang 47 und Anhang 48 dargestellt. Da die Geometrien sowohl den minimalen Sicherheitsfaktor einhalten als auch leichter sind als das Ergebnis der uneingeschränkten Geometrie, sind sie als leistungsstärkere Ergebnisse einzustufen als das uneingeschränkte Ergebnis. Somit kann das Ergebnis der uneingeschränkten Optimierung in diesem Fall als suboptimal eingestuft werden.

Bilder zur minimalen Dicke aller Optimierungsergebnisse werden in Anhang 49 dargestellt. Dabei wird jeweils ein Zylinder in die Mitte der generierten Säule eingebettet. Dieser ist in grün eingefärbt. Um die minimale Dicke der Säule zu ermitteln, wird der Durchmesser des Zylinders variiert. Zu allen Optimierungsläufen ist jeweils ein Bild mit dem Zylinder der entsprechenden Mindestdicke und ein Bild mit dem Zylinder der entsprechenden Mindestdicke + 0,1 mm dargestellt. Ist der Zylinder im ersten Bild nicht zu sehen und im zweiten Bild auf gegenüberliegenden Seiten zu sehen, muss die Mindestdicke

zwischen den beiden Durchmessern liegen. Da die Geometrien für Durchmesser mindestens 1 mm und mindestens 2 mm identisch sind, wird nicht weiter auf weitere eingegangen.



Abbildung 46: Ergebnisse für minimalen Dicke von: 3 mm, 4 mm, 5 mm, 10 mm (von links nach rechts)

Die Geometrien für die minimale Dicke von 3 mm, 4 mm, 5 mm und 10 mm erfüllen die Dickenanforderung alle näherungsweise. Die Abweichungen von der vorgegebenen minimalen Dicke in absoluten Werten und prozentual sind in Tabelle 9 festgehalten.

	Mindestens 3 mm	Mindestens 4 mm	Mindestens 5 mm	Mindestens 10 mm
Abweichung	+0,1 mm	-0,2 mm	-0,1 mm	-1 mm
Abweichung Prozentual	3,33%	5%	2%	10%

Tabelle 9: Abweichungen von der Dickenrestriktion

Die Optimierungen weisen ein neues Charakteristikum auf. Mit steigender minimaler Dicke bilden sich größer werdende Materialansammlungen an der Oberseite der unteren Platte und der Unterseite der oberen Platte aus. Es liegt nahe, dass so die Dickenanforderung auch für die beiden Platten erfüllt werden soll. Somit bezieht Fusion, anders als Apex, auch die beizubehaltende Geometrie mit in die Berechnung der minimalen Dicke mit ein. Dennoch erfüllen die Optimierungen im Bereich nahe den beizubehaltenden Geometrien die Dickenrestriktion nur stellenweise.

7.1.4 Auswertung

	min. 1 mm	min. 2 mm	min. 3 mm	min. 4 mm	min. 5 mm	min. 7 mm	min. 10 mm
Abweichung absolut [mm]	-	1,1	0,1	2,2	2,4	6,5	-
Abweichung prozentual	-	55	3,33	55	48	92,86	-
Abweichung absolut [mm]	+	+	0,3	+	2,2	-	8,9
Abweichung prozentual	+	+	10	+	44	-	89
Abweichung absolut [mm]	+	+	+	0,1	0,1	-	1
Abweichung prozentual	+	+	+	2,5	2	-	10

Tabelle 10: Abweichungen von der vorgegebenen Dicke im Vergleich. Grün Inspire, rosa Apex, blau Fusion

In Tabelle 10 werden die Abweichungen zu den vorgegebenen minimalen Dicken aufgeführt. Es werden nur Abweichungen aufgeführt, die die minimale Dicke unterschreiten. Positive Abweichungen sind in der Tabelle durch ein „+“ gekennzeichnet. Betrachtet werden die Ergebnisse für die Optimierungen mit minimaler Dickenvorgabe von 1-5 mm und 10 mm. Da Inspire für 10 mm einen leeren Designspace als Optimierungsergebnis erzeugt, wird die höchste noch umgesetzte minimale Dicke (7 mm) für Inspire in die Tabelle mit aufgenommen. Die Ergebnisse aus Inspire sind grün hinterlegt, die aus Apex rosa und die Ergebnisse aus Fusion blau. In dieser Reihenfolge ergeben sich die durchschnittlichen prozentualen Abweichungen zu: 50,84%; 47,67%; 4,83%. Somit ist die Vorgabe der minimalen Dicke in Fusion am effizientesten umgesetzt, die durchschnittliche Abweichungen zur Vorgabe ist gegenüber Inspire und Apex um nahezu den Faktor 10 kleiner. Die Dickenrestriktionen in Apex und Inspire erweisen sich in diesem Szenario als weitgehend nicht verlässlich. Beide Programme erzeugen für vorgegebene Dicken, die oberhalb der durch den Lastfall bedingten Dicke liegen, keine verlässlichen Ergebnisse. In beiden Programmen treten gravierende Fehler auf, die erzeugten Dicken sinken tendenziell mit steigender vorgegebener Dicke weiter ab.

7.2 Maximale Dicke

In diesen Szenario soll die Restriktion der maximalen Dicke analysiert werden. Inspire und Apex erlauben die Definition einer maximalen Dicke, Inspire allerdings nur in Kombination mit einer

minimalen Dicke. Zudem muss die maximale Dicke wenigstens das doppelte der minimalen Dicke betragen. Fusion verfügt über keine Möglichkeit die maximale Dicke zu kontrollieren.

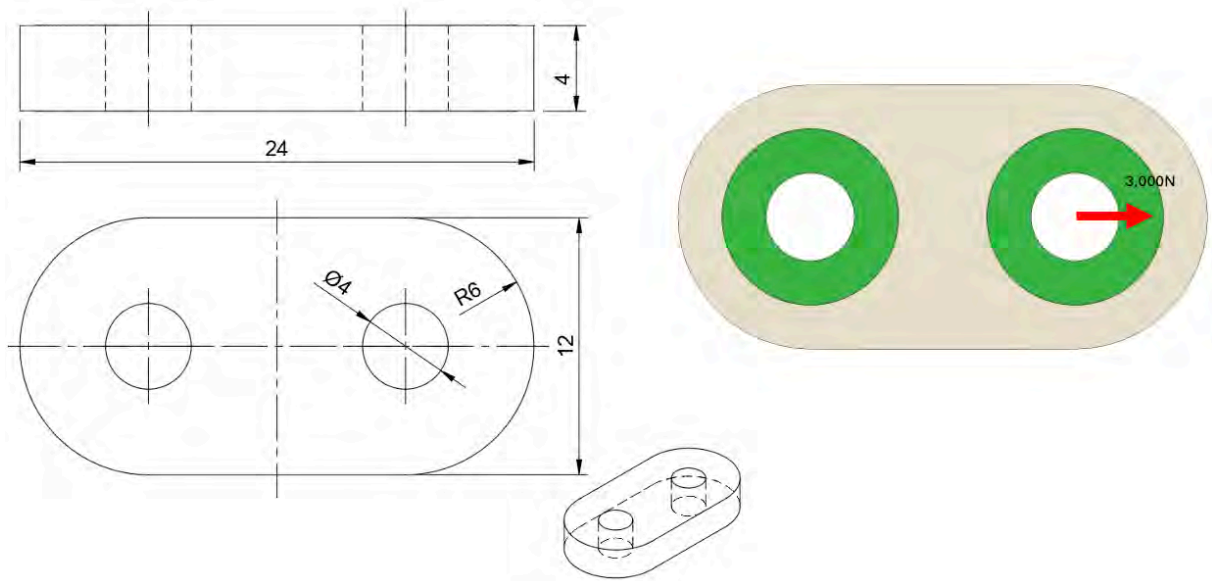


Abbildung 47: Szenario zum Überprüfen der Restriktion der maximalen Dicke

Für die Kontrolle der maximalen Dicke wird das in Abbildung 47 dargestellte Szenario verwendet. Die rechte Öse wird mit einer Zugkraft von 3000 N belastet, die linke Öse fest eingespannt. Um beide Ösen wird ein Kreisring mit dem äußeren Durchmesser 8 mm und dem inneren Durchmesser 4 mm als beizubehaltende Geometrie festgelegt. Dieser Aufbau erlaubt es den Kraftfluss durch die Mitte der des Designspaces (grau eingezeichnet in Abbildung 47) als auch an den Rändern der Öse entlang zu leiten. Händische Optimierungen für beide Vorgehen werden in Abbildung 48 dargestellt. Ein minimaler Sicherheitsfaktor von 1,5 wird als Randbedingung für die Optimierungen vorgegeben. Beide händische Optimierungen halten diesen ein. Berichte zur FE-Analyse von beiden Ergebnissen werden in Anhang 50 bis Anhang 53 dargestellt.

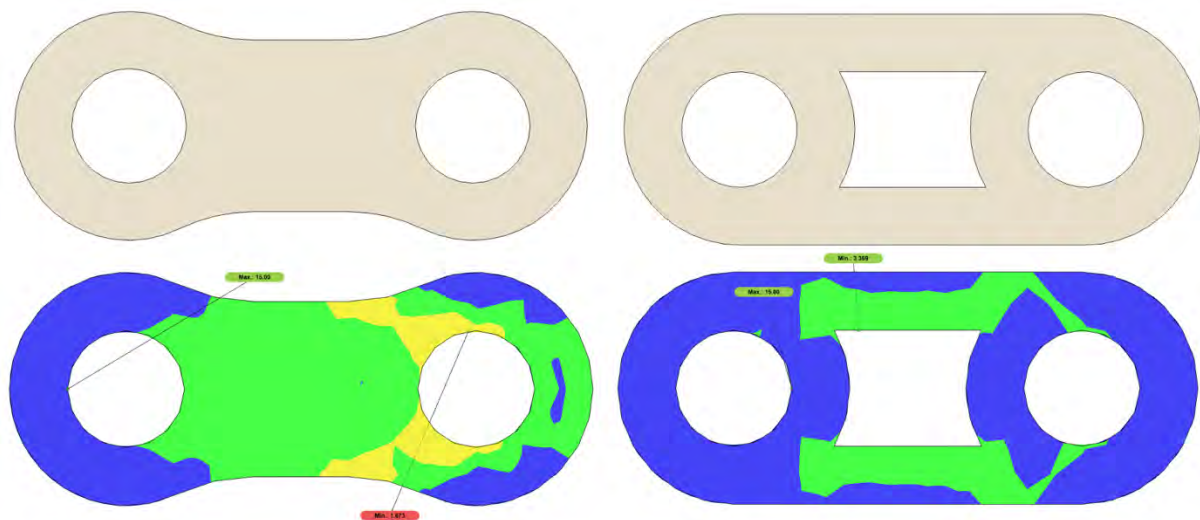


Abbildung 48: Händische Optimierungen, links Kraftfluss durch die Mitte, rechts Kraftfluss an den Rändern

Für die Betrachtung der folgenden automatisierten Optimierungen von zentraler Bedeutung, sind die unterschiedlichen maximalen Dicken beider händisch optimierter Geometrien. Die rechts abgebildete Geometrie hält eine maximale Dicke von 2 mm ein. Die links abgebildete Geometrie nicht. Betrachtet wird lediglich die Geometrie innerhalb des Designspaces. Auch hier wird die Dicke als das kleinste Maß innerhalb eines beliebigen Querschnitts einer Geometrie, zwischen zwei Begrenzungsflächen dieser Geometrie definiert. Das Maß und der Querschnitt müssen dabei orthogonal zu wenigstens einer der Begrenzungsflächen sein.

Die beizubehaltenden Geometrien werden nicht mit einbezogen. Aus den händischen Optimierungen ist abzuleiten, dass für das betrachtete Szenario Geometrien existieren, die den minimalen Sicherheitsfaktor einhalten und dabei eine maximale Dicke von 2 mm nicht überschreiten.

7.2.1 Inspire

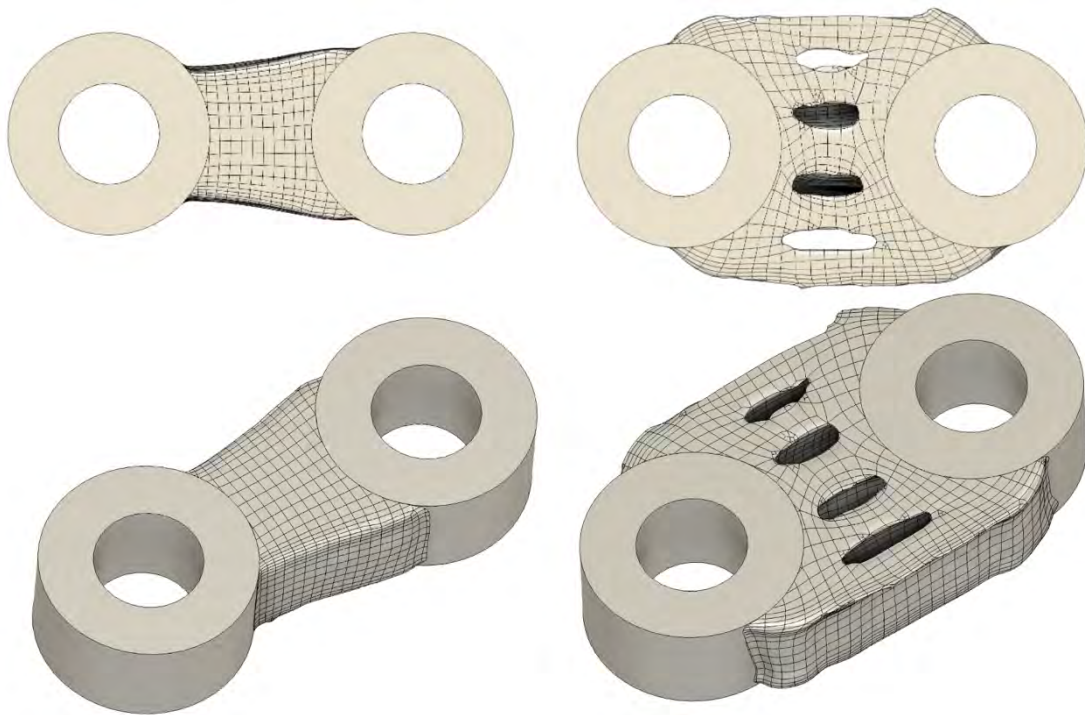


Abbildung 49: Links: Ohne Restriktion der maximalen Dicke erzeugte Geometrie, rechts: mit Restriktion der maximalen Dicke erzeugte Geometrie

In Inspire wird zunächst eine Optimierung mit vorgegebener Mindestdicke von 1 mm durchgeführt, diese stellt die Referenz dar. Die zweite Optimierung wird mit vorgegebener Mindestdicke 1 mm und vorgegebener maximalen Dicke 2 mm durchgeführt. Beide Ergebnisse erfüllen den minimalen Sicherheitsfaktor nicht vollständig. Beide Geometrien werden in Abbildung 49 abgebildet, Ausschnitte aus den FE-Analyseberichten werden in Anhang 54 und Anhang 55 dargestellt. In beiden Fällen ist das nicht Einhalten des Sicherheitsfaktors auf fehlende Abrundungen an den Übergängen zwischen optimierter und beizubehaltender Geometrie zurückzuführen. Der Fokus soll hier allerdings auf der Restriktion der maximalen Dicke liegen.

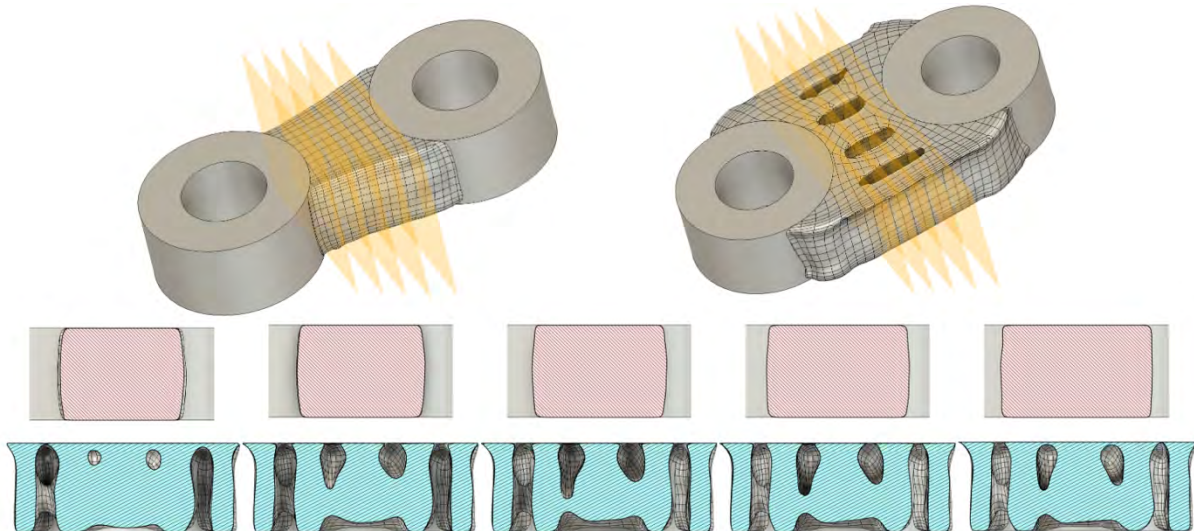


Abbildung 50: Querschnitte der Optimierungen in Inspire

Dafür wird die in Durchlauf 2 generierte Geometrie betrachtet. Diese erfüllt die Anforderung an eine maximale Dicke von 2 mm nicht durchgängig. Dennoch stellt die erzeugte Geometrie eine Verbesserung gegenüber der ohne Dickenrestriktion erzeugten Geometrie dar. Hohlräume werden in die Geometrie integriert, was die maximale Dicke der Geometrie großflächig unter 2 mm senkt. Beispielfhaft zu erkennen in das in Abbildung 50. Dort sind die Querschnitte der erzeugten Geometrien dargestellt. Abstand zwischen den Querschnitten ist jeweils 1 mm. In rosa die Querschnittsflächen der Geometrie ohne maximale Dicken Restriktion, in blau die Querschnitte der Geometrie mit Restriktion der maximalen Dicke. Der Querschnitt ganz links verläuft tangential zur beizubehaltenden Geometrie an der fest eingespannten Öse, am Punkt des kleinsten Abstands zwischen beiden Ösen. Die Positionierung der einzelnen Querschnitte ist in der obersten Reihe in der Abbildung dargestellt.

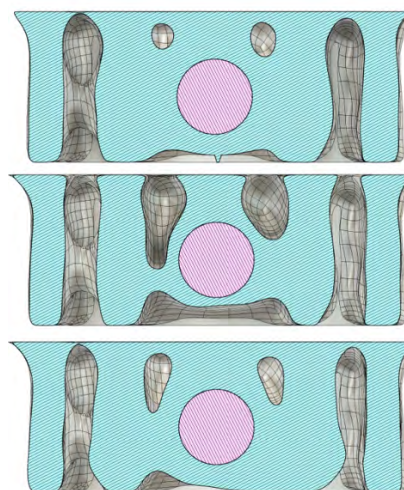


Abbildung 51: Querschnitte der mit Restriktion der maximalen Dicke erzeugten Geometrie mit eingebundem Zylinder des Durchmessers 2 mm in rosa

Die Restriktion der maximalen Dicke wird insbesondere im oberen Bereich der Geometrie eingehalten, darunter kommt es allerdings zu Überschreitung der vorgegebenen 2 mm. Im Zentrum der erzeugten Geometrie befindet sich eine Materialansammlung, die die maximale Dicke über die ganze Länge der Geometrie überschreitet. Dargestellt in Abbildung 51 werden die Querschnitte tangential zu beiden Ösen und der Querschnitt in der Mitte des Designspaces. In die Geometrie eingebunden ist ein Zylinder des Durchmessers 2 mm. Dieser Zylinder ist in den drei Querschnitten jeweils komplett von der optimierten Geometrie umgeben. Somit wird die Restriktion der maximalen Dicke in Inspire in diesem Szenario nicht eingehalten, allerdings ist das Programm in der Lage eine Geometrie zu erzeugen, die Bereiche aufweist, die die Restriktion einhalten.

7.2.2 Apex



Abbildung 52: Optimierungsergebnisse, links ohne Dickenrestriktion, rechts mit Restriktion der maximalen Dicke

Analog zu dem Vorgehen in Inspire werden zwei Geometrien generiert, anders als in Inspire ist in Apex keine Vorgabe einer minimalen Dicke erforderlich, entsprechend wird diese für die beiden Optimierungen nicht getätigt. Die Vorgabe der maximalen Dicke für den zweiten Durchlauf ist analog zu Inspire eine maximale Dicke von 2 mm.

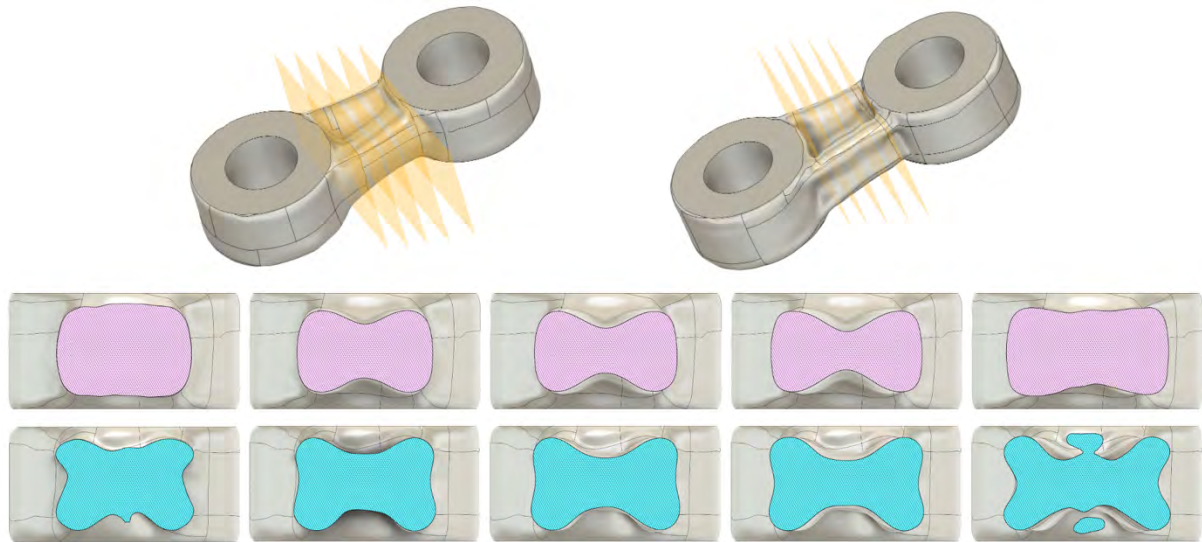


Abbildung 53: Querschnitte der beiden Optimierungsläufe, rosa ohne Restriktion, blau mit Restriktion der maximalen Dicke

Die beiden entstehenden Geometrien sind einander ähnlicher als in Inspire der Fall. Die Geometrien sind strukturell gleich aufgebaut, unterscheiden sich nur in ihrer Ausprägung. Beide leiten den Kraftfluss durch die Mitte des Designspaces und erzeugen dabei eine in Ansätzen Doppel-T-Träger ähnliche Geometrie. Anders als in Fusion ist keine relevante Einhaltung der Restriktion zu erkennen. Dargestellt wird das in Abbildung 53. Die Querschnitte der Optimierungen sind übereinander dargestellt, oben die uneingeschränkte Geometrie unten die Geometrie mit maximal vorgegebener Dicke 2 mm. Darüber ist schematisch die Positionierung der einzelnen Querschnitte dargestellt. Abstand zwischen den Querschnitten ist jeweils 1mm.

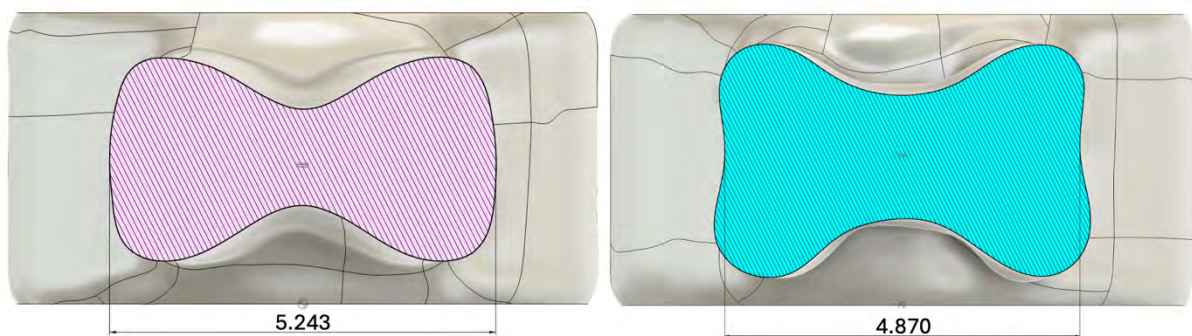


Abbildung 54: Bemaßter Querschnitt in der Mitte der generierten Geometrien. Links ohne Dickenrestriktion, rechts mit Restriktion der maximalen Dicke

Beispielhaft wird in Abbildung 54 für beide Geometrien der Querschnitt in der Mitte der Geometrie mit dem Maß einer Dicke versehen, die die Vorgabe überschreitet. Die Geometrie, für die eine maximale Dicke vorgegeben ist (auf Abbildung 54 rechts) ist dünner, überschreitet die maximale Dicke dennoch um mehr als den Faktor 2. Beide Geometrien halten den vorgegeben minimalen Sicherheitsfaktor

großflächig nicht ein. Der Analysebericht zu beiden Optimierungsdurchläufen wird in Anhang 56 und Anhang 57 dargestellt.

7.2.3 Ergebnisvergleich Inspire und Apex

Sowohl Inspire als auch Fusion sind für das betrachtete Szenario nicht in der Lage Geometrien zu erzeugen, die die Restriktion der maximalen Dicke einhalten. Da Optimierungen möglich sind, die die vorgegebenen Randbedingungen erfüllen, zeigen die händisch optimierten Geometrien am Anfang dieses Kapitels. In Apex ist nur in Ansätzen zu erkennen, dass die maximale Dicke sich gegenüber der uneingeschränkten Optimierung verändert. In Fusion ist das Ergebnis klarer, durch die Integration von Hohlräumen nimmt die Dicke innerhalb der Geometrie an vielen Stellen ab. Ähnlich, wie bei der Restriktion des Überhangwinkels zeigt sich, dass Inspire die Fertigungsrestriktionen stärker in die Optimierungen mit einbindet als Apex und Fusion – welches die Restriktion der maximalen Dicke nicht anbietet.

8 Bracket

Die Restriktionen für Überhangswinkel und Dicke sollen im Folgenden auf ein komplexeres, realitätsnäheres Bauteil angewendet werden. Gewählt wird dafür die Abwandlung einer Halterung (englisch = Bracket) der SACS Aerospace GmbH. Das hier betrachtete Bracket wird durch veränderte Positionierung von Bohrungen und Anpassungen an der Geometrie vereinfacht. Die Zeichnung der das hier betrachtete Bracket nachempfunden ist, wird in Anhang 58 abgebildet.

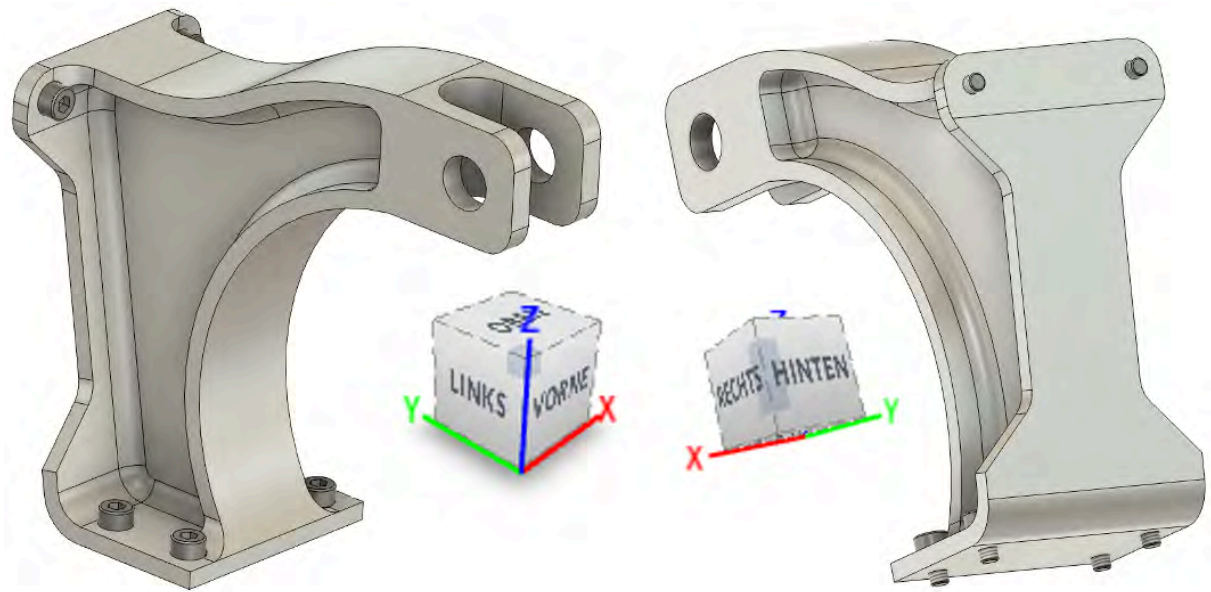


Abbildung 55: Vereinfachtes Bracket

Zunächst wird das Bracket in seiner bestehenden Form vereinfacht und in CAD modelliert. Dafür wird Fusion genutzt, die anschließenden FE-Analysen des Bauteils finden ebenfalls in Fusion statt. Als Material für das Bracket wird EN AW-2024 gewählt. Dieses Material ist von SACS für das Bauteil vorgesehen, sein Verhalten ist aus den vorherigen Optimierungen in Ansätzen bekannt. Die Geometrie des Brackets wird in Abbildung 55 gezeigt. Neben den sechs Schrauben, die das Bracket mit seiner Umgebung verbinden, ist dort ebenfalls die Benennung der Seiten des Brackets und das zugehörige Koordinatensystem dargestellt. Die abgebildeten Seitennamen und Achsen werden im weiteren Text referenziert. Die Materialkennwerte zu EN AW 2024 sind für Apex, Fusion und Inspire in Anhang 6 bis Anhang 8 zu finden. Die Masse des modellierten Brackets liegt bei 106,036 Gramm. Dieses Masse wird für einen Teil der folgenden Optimierungen in Form einer maximal zulässigen Masse als Randbedingung genutzt.

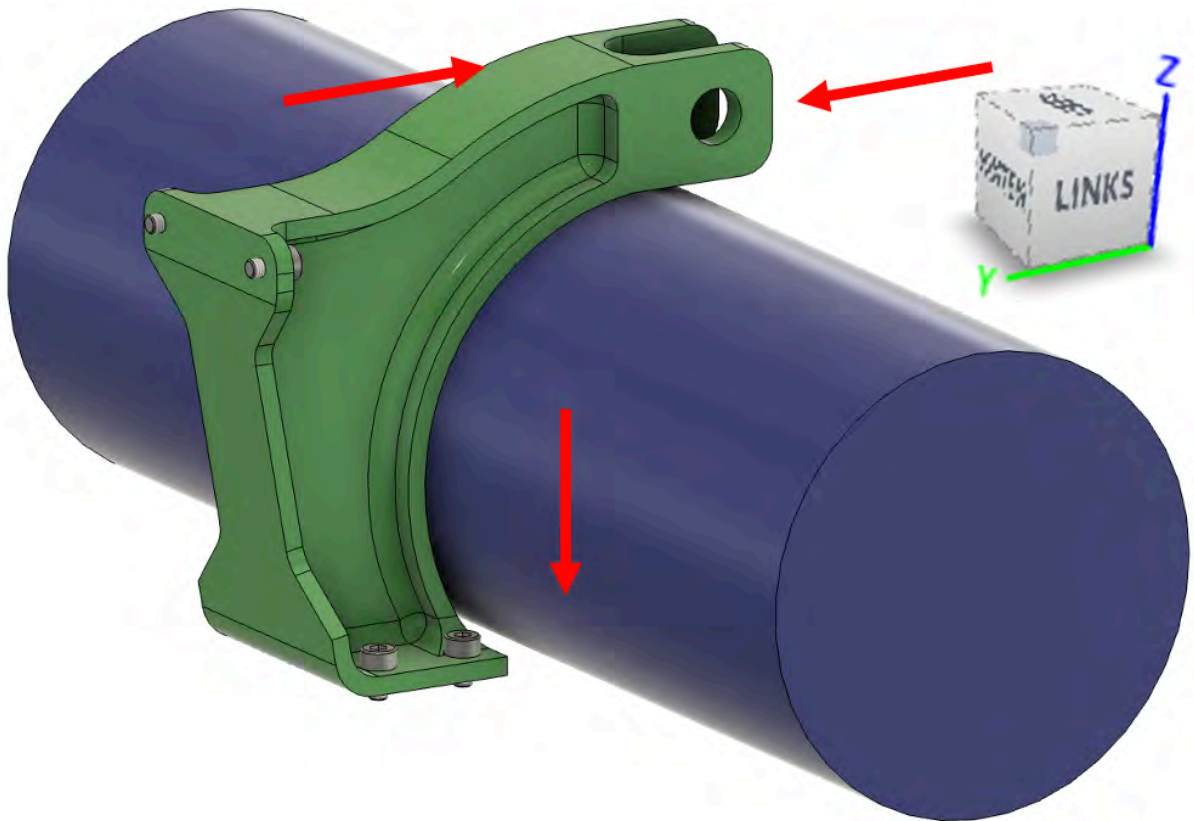


Abbildung 56: Bracket, Rohr und wirkende Kräfte

Vor der Optimierung durch Inspire, Apex und Fusion werden Lastfälle für das Bracket bestimmt. Die Belastungen, die auf das originale Bauteil wirken sind unbekannt, es müssen Annahmen getroffen werden. Durch die beiden Bohrungen an der Spitze des Brackets läuft vermutlich eine Welle oder Achse, über diese werden Kräfte in das Bracket eingeleitet. Es wird weiterhin angenommen, dass das Bracket ein Rohr oder ähnliches trägt, das parallel zu der Rundung auf der Vorderseite des Brackets läuft. Der erste Lastfall soll die Masse dieses Rohrs abbilden, in Form einer Gewichtskraft wirkt diese auf das Bracket. Zusätzlich werden zwei Lastfälle angenommen, die Torsion um die Z-Achse darstellen. Diese Lastfälle beruhen auf der Annahme, dass das durch das Bracket auf einer Seite ungleichmäßig belastet wird. Das Bracket (in grün), das Rohr (in blau) und die durch das Rohr induzierten Kräfte (in rot und rein qualitativ) sind in Abbildung 56 abgebildet.

Die Kräfte werden so dimensioniert, dass das Bauteil für die aufgebrachten Lastfälle minimale Sicherheitsfaktoren zwischen 1 und 2 aufweist. Ziel der Optimierungen wird es diese Sicherheitsfaktoren zu überbieten. Die Definition aller Kräfte für die drei angenommen Lastfälle sind in Anhang 59 zu finden. Der Bericht zur FE-Analyse wird in Anhang 60 bis Anhang 65 dargestellt. Aus dem Bericht geht hervor, dass die Bereiche um die beizubehaltenden Geometrien die höchsten Spannungen aufweisen. Da diese Spannungen in den meisten Fällen direkt an den Kanten der Bohrungen für die Schrauben auftreten, sind sie mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Singularitäten zurückzuführen. Eine Netzverfeinerung für die beizubehaltenden Geometrien führt über vier Verfeinerungsschritte hinweg zu stetig steigenden Spannungen an den betroffenen Stellen. Das deutet ebenfalls auf

Singularitäten hin. Da diese Kanten an den Bohrungen auf in den folgenden Optimierungsergebnissen auftreten werden, wird sich im Folgenden vorrangig auf die Spannungswerte außerhalb der Funktionsflächen konzentriert. Diese sind großflächig deutlich geringer.

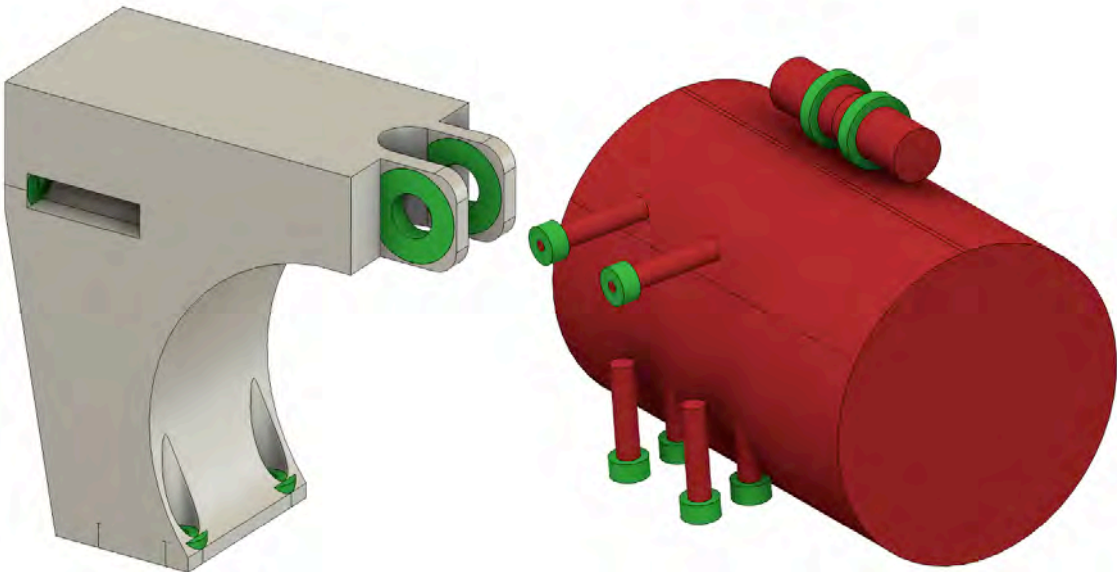


Abbildung 57: Links Designspace und beizubehaltende Geometrien für Inspire und Apex, rechts Hindernis- und beizubehaltende Geometrien für Fusion

In weiterer Vorbereitung auf die Optimierungen wird der Designspace für Inspire und Apex definiert. Analog werden die Hindernis-Geometrien für die Optimierungen in Fusion definiert. Die umgebende Geometrie des originalen Bauteils ist unbekannt, es müssen erneut Annahmen getroffen werden. Das durch das Bracket getragene Rohr stellt die zentrale Hindernis-Geometrie dar. Sein Umriss wird als zusammenfallend mit der Krümmung an der Vorderseite des Brackets angenommen. Die Ausprägung von Designspace für Apex und Inspire und Hindernis-Geometrien für Fusion sind in Abbildung 57 dargestellt. Dabei ist der Designspace in grau dargestellt, die Hindernis-Geometrien in rot und die beizubehaltenden Geometrien in grün. Die beizubehaltenden Geometrien befinden sich um die Bohrungen herum, diese Bereiche müssen erhalten bleiben, da das Bauteil über sie befestigt wird. Über den Bohrungen wird im Designspace Freiraum bzw. für Fusion Hindernis-Geometrien definiert. So wird sichergestellt, dass die Schrauben in das optimierte Bauteil eingesetzt werden können und Freiraum für Werkzeug zum Befestigen und Lösen der Schrauben sichergestellt ist.

8.1 Vergleich der Supportminimierung in Inspire, Apex und Fusion für das Bracket

Bevor auf den Leichtbau eingegangen wird, soll untersucht werden, wie leistungsfähig die untersuchten Algorithmen sind. So soll ermittelt werden, welche Algorithmen für die Leichtbauergebnisse vielversprechend sind. Um Vergleichbarkeit zu schaffen ist möglichst die gleiche Masse für alle Optimierungen notwendig. Diese wird für diesen Vergleich vorgegeben. Es werden 106 g gewählt, was der Masse des nicht optimierten Brackets entspricht. Somit sind die Ergebnisse der folgenden

Optimierungen untereinander und mit dem originalen Bracket vergleichbar. Der Fokus wird dabei auf die mechanische Güte und die Supportvermeidung gelegt. Vorgegeben werden die Druckrichtungen Z-, Z+, Y- und X+. Die Auswahl beruht auf den Designgrundlagen für FFF aus Kapitel 3.2. In jeder dieser Druckrichtungen liegen Funktionsflächen parallel zum Druckbett, was die höchste Genauigkeit für diese zentralen Elemente im Druck erlaubt. Neben der maximalen Masse von 106 g werden 45° als maximal zulässiger Überhangswinkel vorgegeben. In Inspire wird die Überhangswinkelrestriktion auf gemildert eingestellt, um möglichst zusammenhängende Geometrien zu erzeugen. Da Inspire die Vorgabe einer minimalen Dicke erfordert, wird diese auf 4 mm festgesetzt. Neben dem zulässigen Überhangswinkel von 45° wird in Apex die Supportreduktion auf hoch eingestellt.

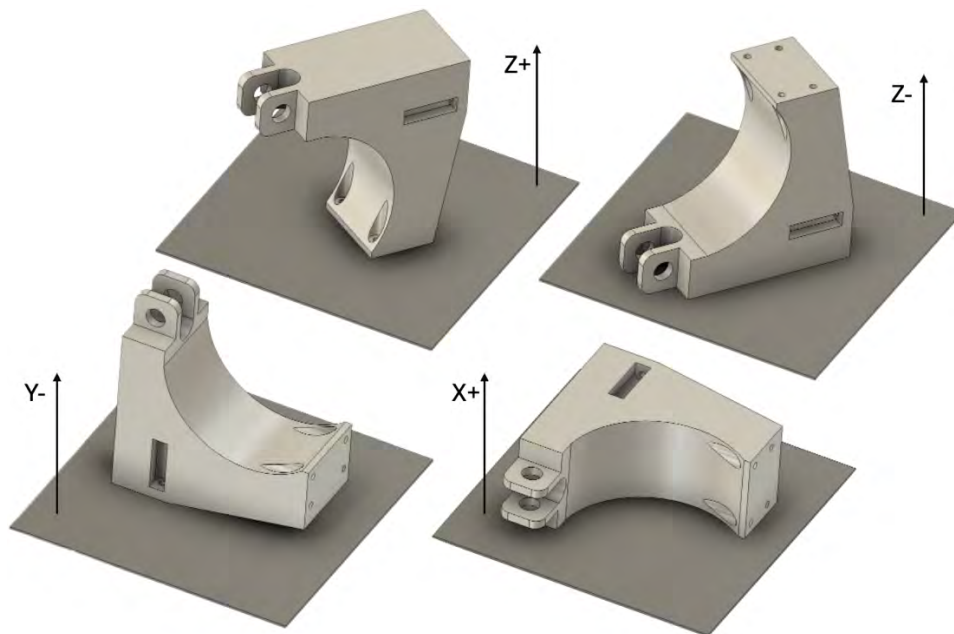


Abbildung 58: Ausrichtungen des Designspaces für den Druck

Die Vorgabe von 106 g maximaler Masse führt nicht zu Leichtbau. Allerdings wird den Algorithmen durch die große Menge an Material Freiraum gelassen auch mechanisch nicht notwendige Strukturen auszubilden, um den Überhangswinkel einzuhalten. Vorstellbar sind etwa Streben in mechanisch suboptimalen Winkeln, die dicker ausgebildet werden müssen, dafür allerdings den Überhangswinkel einhalten oder zusätzlich generierte Streben, die mechanisch wenig zur Leistungsfähigkeit des Bauteils beitragen, dafür allerdings andere Teile der ausgebildeten Geometrie stützen und für Einhaltung des Überhangswinkels verantwortlich zeichnen. Die Optimierungen mit Massenbeschränkung aus Kapitel 6.2 und 6.3 erweisen sich bei Restriktion auf 20% respektive 40% der Gesamtmasse (106 g entsprechen rund 21% der Masse des vorgegeben Designspaces) als effizienter in der Supportminimierung als ihre Pendanten geringerer Masse. Die Erkenntnisse bezüglich der Supportminimierung aus diesem einfacher zu realisierendem Szenario, mit viel zur Verfügung stehendem Material, sollen im Weiteren in die Optimierungen mit dem Ziel des Leichtbaus eingehen.

8.1.1 Bewertungskriterien

Als Bewertungskriterium in Bezug auf die Stützstrukturreduktion wird die Masse des notwendigen Supports herangezogen. Es wird von dem Druck mit einem Material ausgegangen. Entsprechend liegt der Supportmasse die Dichte von EN AW-2024 zugrunde. Diese liegt bei $2,77e^{-6} \frac{kg}{mm^3}$. [38]

Weiteres Bewertungskriterium für die entstehenden Bauteile ist der minimale Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie. Zudem wird die maximale Verschiebung einbezogen. Diese ist weniger anfällig für mathematische Eigenheiten der FE-Analyse und liefert somit einen zuverlässiger zu bewertenden Wert als der Sicherheitsfaktor. Für den Vergleich der minimalen Sicherheitsfaktoren wird auch für die Apex Ergebnisse in der FE-Analyse die Streckgrenze als Versagenskriterium eingestellt, um Vergleichbarkeit sicherzustellen.

Zur Überprüfung der Robustheit wird zudem ein weiterer Lastfall angenommen, der in der Optimierung nicht einbezogen wurde. Dieser Lastfall soll eine unerwartet auftretende Belastung simulieren. Angenommen wird eine Belastung auf einer Seite des Rohrs, die über die beiden vorderen Ösen in das Bauteil geleitet wird. Der Betrag der Kraft wird als 600N pro Öse angenommen. Somit bewegt sich der neue Lastfall leicht unter der Größenordnung der anderen Lastfälle. Der Wert beruht auf der Annahme, dass die Geometrien so nicht überfordert werden und auswertbare Ergebnisse für Spannung und Verschiebung generieren. Alle Lastfälle werden in Anhang 66 grafisch dargestellt. Alle Winkel sind relativ zur Z-Achse in - Richtung definiert.

Durch das, im Zuge der Geometrieerstellung aus den Optimierungsergebnissen stattfindende, Verschneiden der Optimierungsergebnisse mit den beizubehaltenden Geometrien / dem Designspace werden scharfe Kanten und somit für Singularitäten anfällige Stellen in die Geometrien eingebracht. Dass diese entstehen, wird beispielhaft anhand von Netzverfeinerungen (dargestellt in Anhang 67 und Anhang 68) und dabei stetig steigenden Spannungswerten für die Optimierung Inspire X+, Apex Y- und Fusion Z- in Anhang 69 bis Anhang 71 gezeigt. Ausgewertet wird der minimale Sicherheitsfaktor in der feinsten Netzeinstellung und wie sich dieser Sicherheitsfaktor für die beiden größeren Netze entwickelt. Ergebnis ist die für Singularitäten typische stetige Zunahme der Spannungen bei Netzverfeinerung. Um die Auswertung von Singularitäten zu vermeiden, werden die Spannungen im Weiteren innerhalb der optimierten Geometrien selbst untersucht, die scharfen Kanten und Lasteinleitungen innerhalb der beizubehaltenden Geometrien werden nicht in die Auswertung einbezogen.

8.1.2 Auswertung

Inspire bindet in den vier Optimierungsergebnissen nicht alle beizubehalten Geometrien in die entstehende Geometrie mit ein. Somit sind die Ergebnisse nicht valide. Das Gleiche gilt für die Optimierung Fusion X+. In dieser ist eine beizubehaltende Geometrie nicht zugänglich und somit keine Schraube einsetzbar. Grafisch wird das in Anhang 72 dargestellt. Die Ergebnisse werden dennoch in die

Auswertung mit einbezogen, da es zunächst um die mechanischen Kennwerte und Supportvermeidung geht. Beides kann auch an den nicht validen Ergebnissen analysiert werden. Die Fusion Optimierung wird dafür nicht angepasst, für die drei Inspire Optimierungen werden die nicht angebunden Geometrien gelöscht.

Alle erzeugten Geometrien werden in Anhang 73 bis Anhang 76 abgebildet. Die erzeugten Supportgeometrien werden in Anhang 77 bis Anhang 80 abgebildet. In Anhang 81 und Anhang 82 wird beispielhaft an der Optimierung Fusion Z- gezeigt, wie die Einstellungen für die FE-Analysen und die Definition der Lastfälle für die FE-Analysen vorgenommen wurden. Diese Einstellungen und Lastfalldefinitionen sind für alle untersuchten Optimierungsergebnisse dieselben. Da für Lastfall 2 stets dieselben Ergebnisse, wie für Lastfall 1 ermittelt werden, wird dieser Lastfall nicht weiter in die Auswertung mit einbezogen. Die Ergebnisse der FE-Analysen zu den Optimierungen werden in Anhang 83 bis Anhang 94 dargestellt. Ausgewertet werden die Analysen mit der feinsten Netzeinstellung nach Anhang 67. Der minimale Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie wird grau hinterlegt dargestellt, falls er vom globalen minimalen Sicherheitsfaktor abweicht. Minimale Sicherheitsfaktoren über 8,00 werden aufgrund mangelnder Auswertungsmöglichkeit in der Analyse nicht dargestellt. Die Auswertung der minimalen Sicherheitsfaktoren wird in Anhang 96 dargestellt.

8.1.3 Mechanische Eigenschaften

Die Auswertung für die maximalen Verschiebungen der Optimierungsergebnisse werden in Anhang 95 dargestellt, die Auswertung der minimalen Sicherheitsfaktoren in Anhang 96. Inspire erweist sich bezüglich der Verschiebungen als Bestperformer. In allen Druckrichtungen weist die durch Inspire optimierte Geometrie die geringste durchschnittliche maximale Verschiebung auf. In jeder Druckrichtung werden 3 Lastfälle untersucht. In 9 der insgesamt 12 Lastfälle weist die durch Inspire optimierte Geometrie die geringste maximale Verschiebung auf. Fusion liegt bei den durchschnittlichen maximalen Verschiebungen in allen Druckrichtungen auf Platz 2. Apex weist die größten Verschiebungen auf. Da Inspire und Fusion steifigkeitsbasiert optimieren und Apex spannungsbasiert ein erwartbares Ergebnis.

Bezüglich der Spannungen in der optimierten Geometrie kann sich Fusion als Bestperformer durchsetzen. Der über die drei Lastfälle gemittelte minimale Sicherheitsfaktor ist für drei der vier Druckrichtungen in Fusion der höchste. In 7 der insgesamt 12 untersuchten Lastfälle ist der minimale Sicherheitsfaktor in Fusion am höchsten. Auffällig ist, dass Apex trotz der spannungsbasierten Optimierung in drei der vier Druckrichtungen das Ergebnis mit dem niedrigsten durchschnittlichen minimalen Sicherheitsfaktor generiert. Insgesamt erweisen sich somit die mechanischen Kennwerte der Apex Optimierungen als denen von Inspire und Fusion unterlegen.

Für den nicht in der Optimierung vorkommenden Lastfall, Lastfall 4, ergeben sich die über die vier Druckrichtungen gemittelten minimalen Sicherheitsfaktoren zu: 3,33 für Inspire, 2,30 für Apex und 4,45

für Fusion. Damit beträgt der Wert von Fusion rund 93% mehr als der Wert von Apex und 34% mehr als der Wert von Inspire. Die durchschnittlichen maximalen Verschiebungen liegen bei: 0,086 (Inspire), 0,378 (Apex) und 0,104 (Fusion). Damit liegt der Wert für Inspire rund 77% unter dem Wert von Apex und 17% unter dem Wert aus Fusion. Hier erweisen sich Inspire und Fusion erneut als leistungsfähiger als die Ergebnisse aus Apex. Dabei kann Fusion als der Bestperformer bezeichnet werden, da die Ergebnisse bezüglich des Versagenskriteriums, den Spannungen, performanter abschneiden. Es sei darauf hingewiesen, dass dies auf den gewählten Lastfall und nicht generell auf den Optimierungsalgorithmus zurückzuführen sein kann. Überprüfungen weiterer Lastfälle werden für ein abschließendes Urteil benötigt.

8.1.4 Vergleich zum Originalbauteil

Für das Originalbauteil wird die gleiche FE-Analyse durchgeführt, wie für die optimierten Bauteile. Die Ergebnisse werden in Anhang 62 bis Anhang 65 dargestellt. Die Auswertung der Ergebnisse wird in Anhang 97 abgebildet. Die mechanischen Kennwerte des Originalbauteils sind ähnlich zu denen der optimierten Brackets. Dabei können sich die Fusion Ergebnisse bezüglich Verschiebung und Spannungen konsequent (bis auf für den minimalen Sicherheitsfaktor der Optimierung Fusion Y-, Lastfall 4) als leistungstärker erweisen als das Originalbauteil. Inspire liefert konsequent überlegene Verschiebungswerte, in einigen Fällen allerdings unterlegene Spannungswerte. Die Kennwerte der Apex Ergebnisse liegen unter dem Niveau der Werte des Originalbauteils. Die Spannung ist in 10 der 12 untersuchten Lastfälle in den Apex Ergebnissen größer als im Originalbauteil. Die durchschnittliche maximale Verschiebung liegt für drei der vier Apex Optimierung über der des Originalbauteils.

8.1.5 Gewicht und Supportreduktion

Die Apex Optimierungen überschreiten die zulässige maximale Masse um bis zu 6%. Gleichzeitig schneiden die Optimierungsergebnisse, wie Kapitel 8.1.3 zeigt, mechanisch schlechter ab, als ihre Pendants aus Inspire und vor allem Fusion. Während die Werte bezüglich maximaler Masse und mechanischer Kennwerte defizitär sind, erweist sich Apex in der Supportvermeidung als Bestperformer. Die Auswertung der geslicten Modelle (Anhang 77 bis Anhang 80) bezüglich ihrer Supportmasse wird in Anhang 98 dargestellt. Für drei der vier Druckrichtungen benötigen die Geometrien aus Apex die geringste Supportmasse. Mit einer durchschnittlichen Supportmasse von 10,06 g liegt Apex bei unter 50% der Supportmassen die Inspire (26,47 g) und Fusion (23,25 g) benötigen.

8.1.6 Auswahl des leistungsstärksten Optimierungsalgorithmus

	Supportmasse		max. Verschiebung		min. Sicherheitsfaktor	
	[g]	[%]	[mm]	[%]	[]	[%]
Inspire	26,47	263,12	0,09	100	5,02	76,99
Apex	10,06	100	0,27	300,00	4,11	63,04
Fusion	23,25	231,11	0,13	144,44	6,52	100

Tabelle 11: Durchschnittswerte der Kennwerte der optimierten Brackets, den Optimierungsprogrammen zugeordnet

Die Auswertung der Daten aus FE-Analyse und Supportgenerierung zeigt, dass Inspire, Apex und Fusion bezüglich jeweils eines Bewertungspunkts am leistungsstärksten sind. Die durchschnittlichen Kennwerte werden in Tabelle 11 dargestellt. Apex erzeugt Supportmassen, die durchschnittlich weniger als die Hälfte ihrer Pendanten aus Inspire und Fusion wiegen. Die Inspire Optimierungen stechen durch die geringsten maximalen Verschiebungen hervor. Gleichzeitig sind die Optimierungsergebnisse in allen Fällen nicht valide, da sie nicht vollständig zusammenhängen. Fusion setzt sich als mechanisch am leistungsstärksten durch, da die Spannung durchschnittlich am geringsten sind und somit die größten Sicherheiten gegen das Versagenskriterium bestehen.

8.2 Optimierungen mit Dickenrestriktion

Neben der Überhangswinkelkontrolle sind die erzeugten Dicken von zentraler Bedeutung für metal FFF. Während FFF wie in Kapitel 3.2 aufgeführt, nur durch die Strangbreite in der minimalen Dicke eingeschränkt ist, muss für metal FFF für einen reibungslosen Entbinderungsprozess zusätzlich eine maximale Dicke eingehalten werden. Für das Signal Projekt liegt diese bei 10 mm. Die Untersuchungen aus Kapitel 7.2 legen nahe, dass die Restriktion der maximalen Dicke nur bedingt eingehalten wird. Dazu später mehr. In diesem Kapitel soll zunächst nur auf die Restriktion der minimalen Dicke eingegangen werden, da die Vermutung nahe liegt, dass die hoch angesetzte Massenrandbedingung aus dem vorangegangenen Vergleich dickere Ausprägungen der Geometrie begünstigt. Somit sollte es für die optimierten Brackets möglich sein eine minimale Dicke einzuhalten. Die Restriktion der maximalen Dicke wird an den Leichtbauerergebnissen des folgenden Kapitels bewertet.

Die minimale Dicke für Wände im FFF liegt bei 2 Strangbreiten. Typische Strangdurchmesser im FFF sind unter 0,5 mm. Für die folgenden Optimierungen wird der Wert höher angesetzt, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erzielen, da keine der betrachteten Optimierungen auch nur stellenweise über Elemente einer Dicke von unter 1 mm verfügt.

8.2.1 Inspire

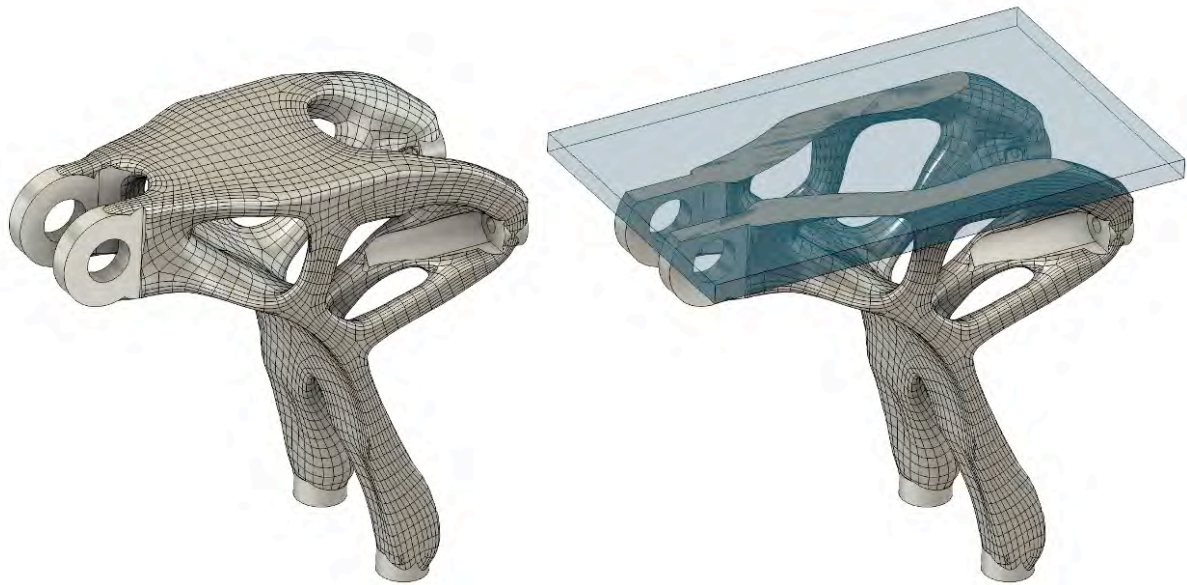


Abbildung 59: Optimierung Inspire Y-. Links original, rechts mit Abzug der minimalen Dicke

Die Optimierungen in Inspire müssen mit Vorgabe einer minimalen Dicke vorgenommen werden. Für das Bracket wurden minimal 4 mm gewählt. Kleine Werte steigern den Rechenaufwand und haben die zur Verfügung stehende Rechenkapazitäten überschritten. Kapitel 7.2.1 hat aufgezeigt, dass die Beschränkung der minimalen Dicke keine verlässlichen Ergebnisse abliefert, was sich bei der Optimierung des Brackets bestätigt. Alle in Inspire optimierten Brackets unterschreiten die vorgegebene minimale Dicke von 4 mm großflächig. Beispielhaft dargestellt wird das in Abbildung 59. Auf der linken Seite wird das unveränderte Optimierungsergebnis der Optimierung Inspire Y- abgebildet. Für den rechten Teil der Abbildung wurde eine Platte mit der Stärke 4 mm von der Oberseite der Geometrie ausgeschnitten. Die Oberseite der Platte wurde als zusammenfallend mit der Oberseite der optimierten Geometrie definiert. Die Platte ist in blau-durchsichtig dargestellt. Der gesamte wegfallende Bereich auf der rechten Seite von Abbildung 59 unterschreitet die minimale Dicke von 4mm.

8.2.2 Apex

Die Optimierungen aus Kapitel 7.1.2 zeigen, dass Dickenrestriktion in Apex kaum Auswirkungen auf die entstehenden Geometrien hat. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich bei der Optimierung des Brackets mit Dickenbeschränkung. Zunächst wird eine Optimierung gewählt, für die ein verbessertes Ergebnis durch die Dickenbeschränkung vermutet werden kann. Die Wahl fällt auf die Optimierung Apex Z-. Die Geometrie weist eine deutlich variablere Dicke auf als es ihre Pendants aus Fusion und Inspire. Unter anderem wird die in eine unter 1,5 mm dicke Strebe ausgebildet. Diese wird auf der linken Seite von Abbildung 60 gezeigt. Für die Abbildung auf der rechten Seite wurde ein Zylinder des Durchmesser 1,5 mm in das Optimierungsergebnis eingebettet. Dieser ist auf zwei gegenüberliegenden Seiten der Strebe zu sehen. Somit muss die Strebe stellenweise dünner als 1,5 mm sein.

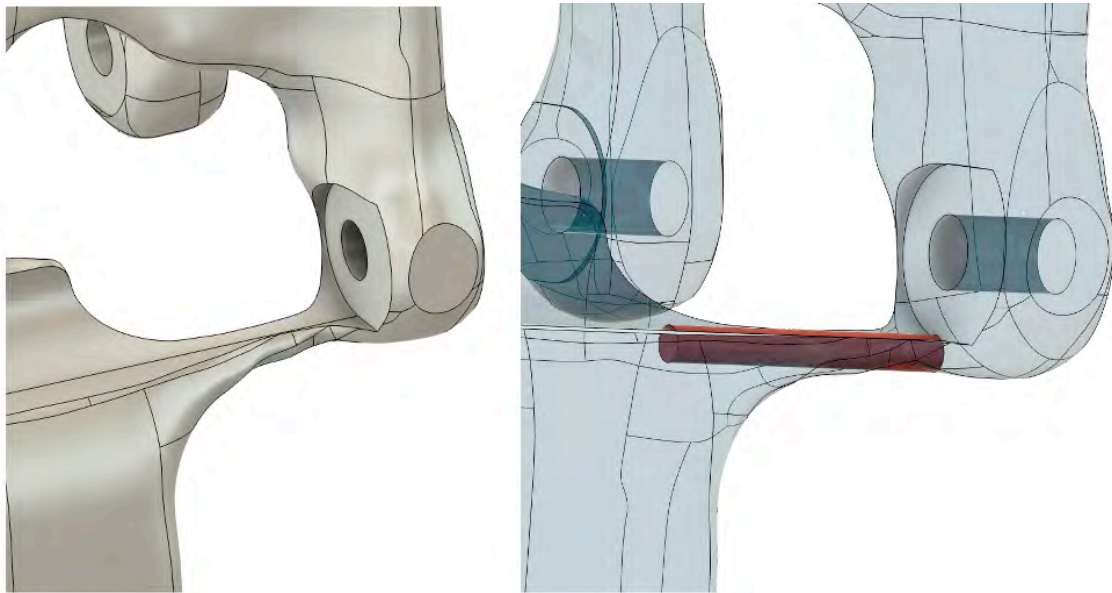


Abbildung 60: Bereiche problematischer Dicke in der Optimierung Apex Z-

Es wird eine Optimierung mit Restriktion der minimalen Dicke auf 3 mm durchgeführt. Die dabei entstehende Geometrie erfüllt die Dickenrestriktion nicht. Die dünnste Stelle befindet sich nun an anderer Stelle in der Geometrie, ist allerdings dünner als die Strebe aus der Optimierung ohne Dickenrestriktion. Das Optimierungsergebnis wird in Anhang 99 dargestellt. Die kritische Stelle wird in Abbildung 61 gezeigt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist erneut ein Zylinder eingebettet, der Durchmesser dessen liegt bei 1,2 mm. Da dieser Zylinder die Strebe stellenweise vollständig umgibt, muss die minimale Dicke bei unter 1,2 mm liegen. Somit bestätigt sich das Ergebnis der teilweise kontraproduktiven Auswirkungen der Restriktion der minimalen Dicke aus Kapitel 7.1.2.

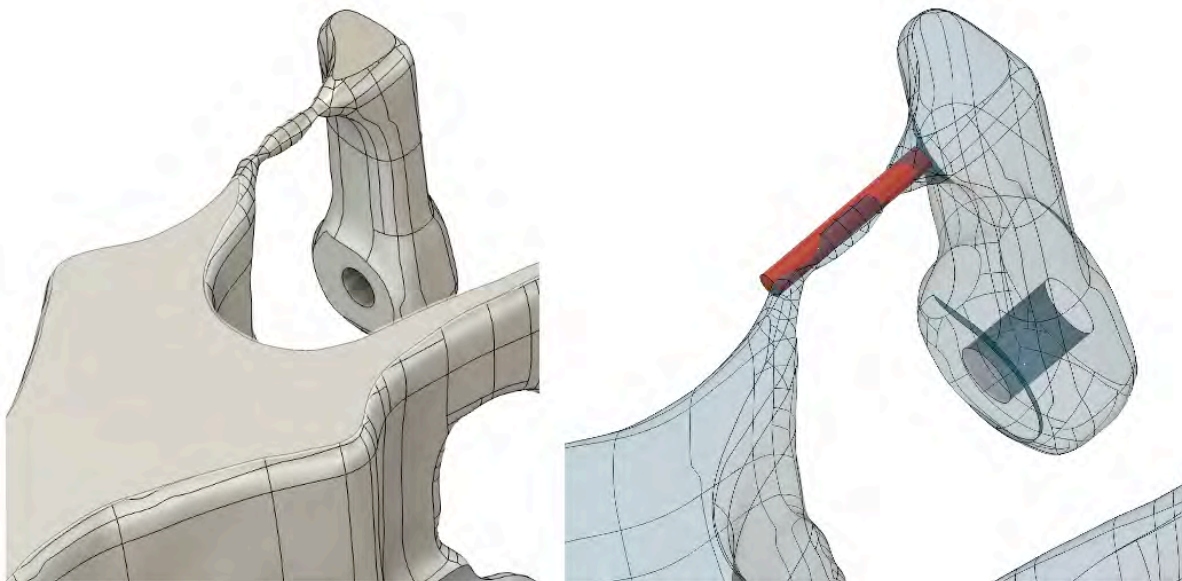


Abbildung 61: Ergebnis der Optimierung mit Restriktion der minimalen Dicke. Links mit eingebettetem Zylinder des Durchmessers 1,2 mm in rot.

8.2.3 Fusion

Fusion erlaubt keine Definition einer maximalen Dicke, die Restriktion der minimalen Dicke ist hingegen möglich und liefert nach den Ergebnissen aus Kapitel 7.1.3 die vielversprechendsten Ergebnisse der drei Programme. Die Restriktion der minimalen Dicke kann auch in der Optimierung des Brackets überzeugende Ergebnisse liefern. Die Bereiche, in denen die minimale Dicke von 3 mm unterschritten wird, werden von Fusion, bei eingesetzter Dickenrestriktion, zuverlässig verändert.

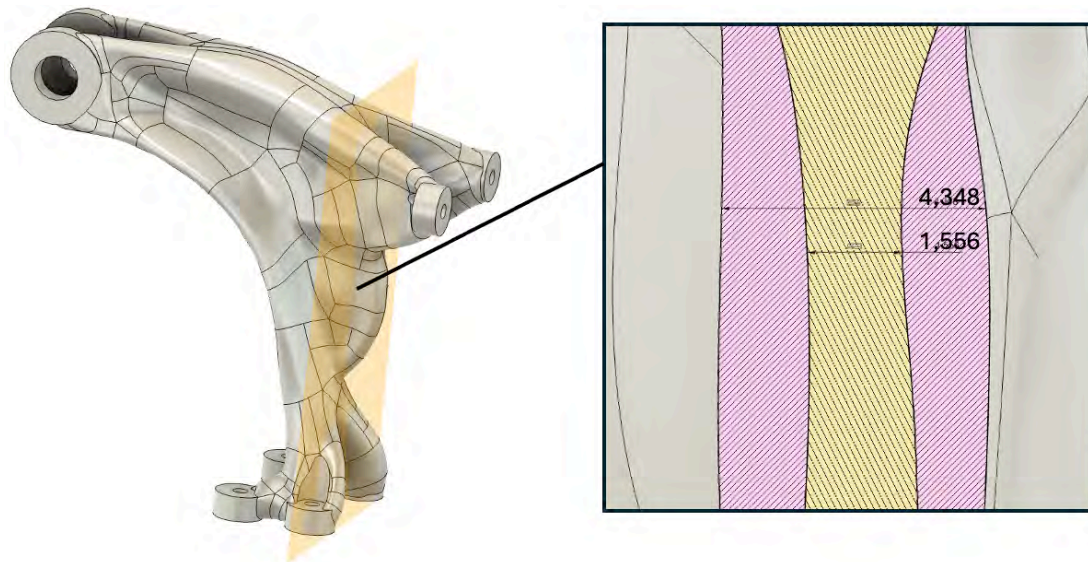


Abbildung 62: Veränderung der minimalen Dicke bei vorgegebener minimaler Dicke von 3 mm für die Optimierung Fusion Z+

Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 62 dargestellt. Der Querschnitt der Geometrie mit Dickenrestriktion ist auf der rechten Seite der Abbildung in rosa dargestellt, der Querschnitt der ursprünglichen Geometrie in gelb. Fusion verändert die globale Geometrie des Optimierungsergebnisses nur wenig, erhöht an den entscheidenden Stellen allerdings die Dicken, um die vorgegebene minimale Dicke einzuhalten. Ein weiteres Beispiel dafür ist in Anhang 100 zu finden.

8.2.4 Bewertung der praktischen Nutzbarkeit der Restriktion der minimalen Dicke

Die Restriktion der minimalen Dicke erweist sich auch in den Optimierungen des Brackets als teilweise unzuverlässig. Inspire und Apex bestätigen die in Kapitel 7.1 erlangten Erkenntnisse. Beide Programme halten die Dickenrestriktion nicht zuverlässig ein. Das gilt selbst für die hier durchgeführten Optimierungen mit hoch angesetzter Massenvorgabe.

Fusion hält die vorgegebenen minimalen Dicken hingegen ein und bestätigt so ebenfalls die in Kapitel 7.1 erlangten Erkenntnisse. Die Vorgabe einer maximalen Dicken soll für das Bracket im folgenden Kapitel untersucht werden. Es ist zu vermuten, dass die dort erzeugten geringeren Massen der Einhaltung einer maximalen Dicke zugutekommen.

9 Leichtbau

Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel zeigen unter vergleichbaren Bedingungen auf, dass Apex und Fusion den SIMP basierten Optimierungsalgorithmus von Inspire outperformen. In Apex in Form von überlegener Stützstrukturreduktion, in Fusion durch überlegene mechanische Kennwerte und geringfügig leichtere notwendige Supportmassen. Im vorangegangenen Kapitel lag der Fokus auf dem Vergleich der drei Optimierungsalgorithmen. Das erlaubt zwar einen objektiveren Vergleich der Eigenschaften der drei Optimierungsalgorithmen, vernachlässigt allerdings den Haupteinsatzzweck der Topologieoptimierung/des generativen Designs: Den Leichtbau. Im folgenden Kapitel wird der Fokus auf dieses Thema gelegt. Ziel ist es mit den beiden leistungsstärken Optimierungsalgorithmen stützstrukturlose Versionen des Brackets zu erzeugen, die über eine geringere Masse verfügen als das Originalbauteil. Dafür wird nun die direkte Vergleichbarkeit der entstehenden Ergebnisse als zweitrangig angesehen. Einstellungen für die Optimierung in Fusion und Apex werden jeweils so angepasst, dass das Ziel der Gewichtseinsparung und Supportminimierung bestmöglich erfüllt werden.

Eine neue, vielversprechende, Aufbaurichtung wird definiert. Anders als im vorangegangenen Kapitel werden nun Richtungen einbezogen, die nicht parallel zu einer der Achsen liegen. Damit wird die Genauigkeit, mit der die beizubehaltenden Geometrien gefertigt werden, abnehmen, da diese alle parallel zu einer der Achsen ausgerichtet sind. Gleichzeitig wird von dem Schritt die größtmögliche Supportreduktion erwartet. Da für metal FFF eine Nachbearbeitung der Funktionsflächen nach dem Entbindern und Sintern und der damit verbundenen Schrumpfung des Bauteils nicht zu umgehen ist, bedeutet die neue Ausrichtung des Bauteils einen akzeptablen Mehraufwand.

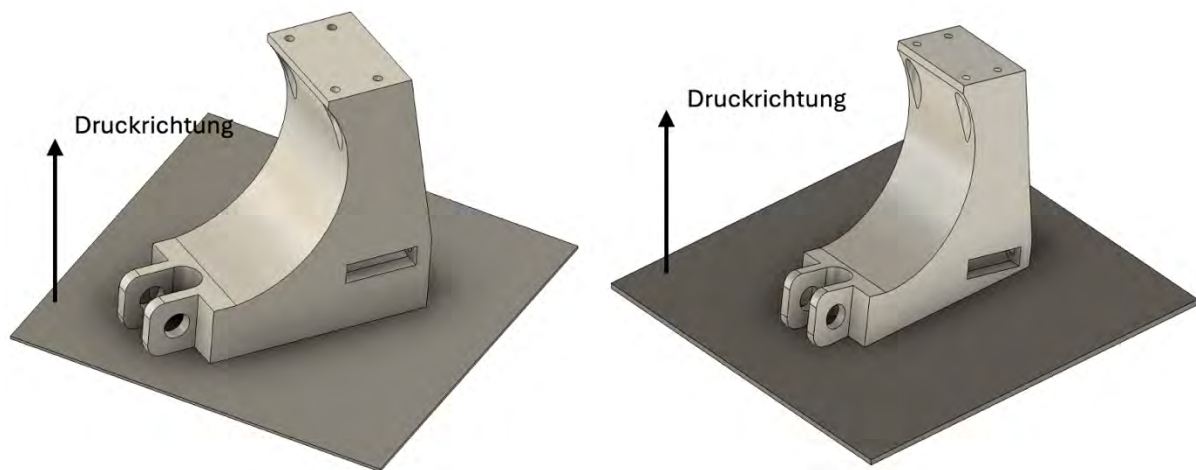


Abbildung 63: Definition der neuen Druckrichtung für den angepassten Designspace. Links alter Designspace, rechts neuer Designspace

Zur Realisierung der neuen Ausrichtung des Bauteils, wird dieses rotiert und der Designspace neu definiert. Die neue Ausrichtung wird in Abbildung 63 dargestellt. Die beizubehaltenden Geometrien verändern sich nicht signifikant, entsprechend ist in Fusion nur das Rotieren notwendig. Ein erster

Optimierungsdurchlauf ergibt, dass trotz neuer Ausrichtung noch weiteres Supportminimierungspotenzial besteht. Dafür werden geometrische Anpassungen in beiden Programmen vorgenommen.

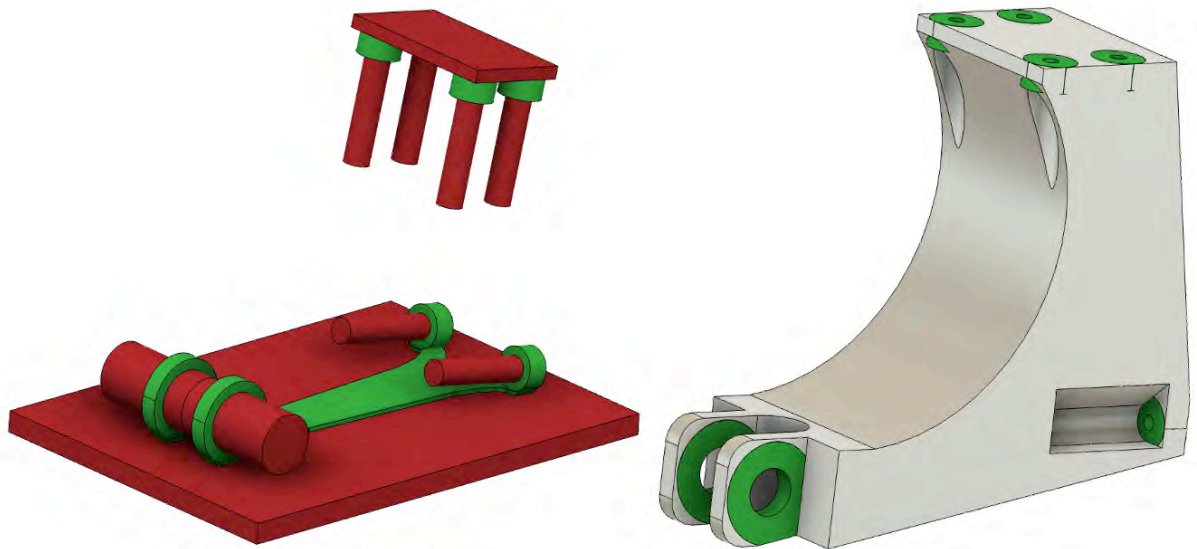


Abbildung 64: Links Aufbau generatives Design Fusion (Hindernis-Geometrie Rohr ausgeblendet), rechts Designspace Apex

In Apex wird die Aussparung an den oberen beiden Schrauben angepasst. Fusion benötigt größere Eingriffe, um die Supportstruktur zu minimieren. Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel zeigen, dass Fusion zu stark gekrümmten Geometrien neigt. An den Druckbettauflageflächen führt das zu generiertem Support an den Seiten der Ergebnisgeometrien (siehe Anhang 77). Um das zu verhindern, wird händisch eine Druckbettauflagefläche für die Optimierung in Fusion definiert. Das gleiche Problem ergibt sich zwischen den beizubehaltenden Geometrien und dem Druckbett. Statt diese als Kreisringe zu definieren, wie im vorangegangenen Kapitel, werden sie mit Kanten versehen, die den 45° Überhangswinkel einhalten. Der endgültige Designspace für Apex und der Aufbau für das generative Design in Fusion werden in Abbildung 64 dargestellt. Detaillierter werden die Veränderungen in Anhang 101 und Anhang 102 dargestellt.

Die Einstellungen der Optimierungen unterscheiden sich ebenfalls von denen des vorangegangenen Kapitels. Als minimaler Sicherheitsfaktor wird 5 vorgegeben. Dies leitet sich aus Kapitel 8.1.4 ab, in dem ein minimaler Sicherheitsfaktor von 4,1 für das Originalbauteil ermittelt wurde. Mit einem minimalen Sicherheitsfaktor von 5 soll sichergestellt werden, dass auch bei abweichenden Ergebnissen von den Voreinstellungen, ein ähnlich belastbares Ergebnis entsteht, wie das Originalbauteil. Für Apex wird ein zulässiger Überhangswinkel von 45° festgelegt, für Fusion ein zulässiger Überhangswinkel von 25°. Da Fusion, wie die vorangegangenen Optimierungen gezeigt haben, den zulässigen Überhangswinkel nur sehr bedingt einhält, soll der als steiler definierte Winkel dabei helfen, den eigentlich für den Druck vorgesehenen Winkel von 45° einzuhalten. Hier ist erneut die Definition des Überhangswinkels durch Autodesk als relativ zur Aufbaurichtung zu beachten.

9.1 Ergebnisse

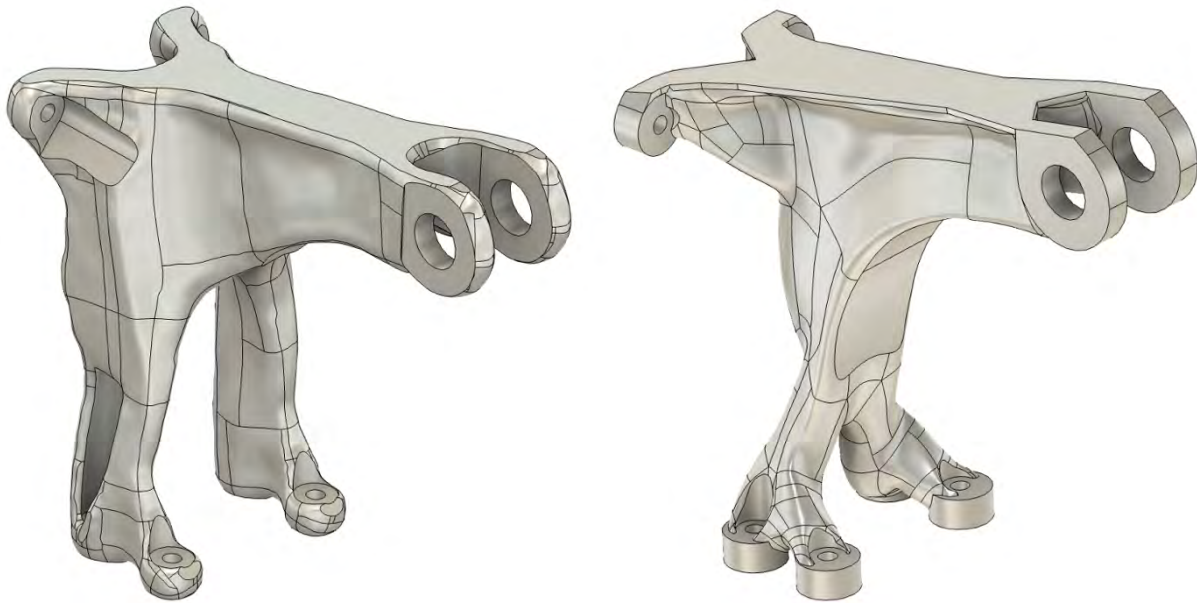


Abbildung 65: Links das Ergebnis der Apex Optimierung, rechts das Ergebnis der Fusion Optimierung

Sowohl Fusion als auch Apex sind in der Lage unter den angepassten Voraussetzungen weitestgehend stützstrukturlose Geometrien zu erzeugen. Die erzeugten Geometrien werden Abbildung 65 dargestellt. Stützstrukturen sind jeweils nur für die beizubehaltenden Geometrien notwendig. Wie schon in Kapitel 8 erzeugt Apex die Geometrie, für die die geringe Supportmasse notwendig ist. Damit bestätigen sich eins der Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel. Beide Algorithmen erzeugen mit einer Masse von 95,54 g (Apex) und 83,18 g (Fusion) Geometrien mit Gewichtseinsparungen gegenüber dem Originalbauteil. Diese liegen bei rund 10%, respektive 21%. Die Ausprägung der Stützstrukturen wird in Abbildung 66 gezeigt.

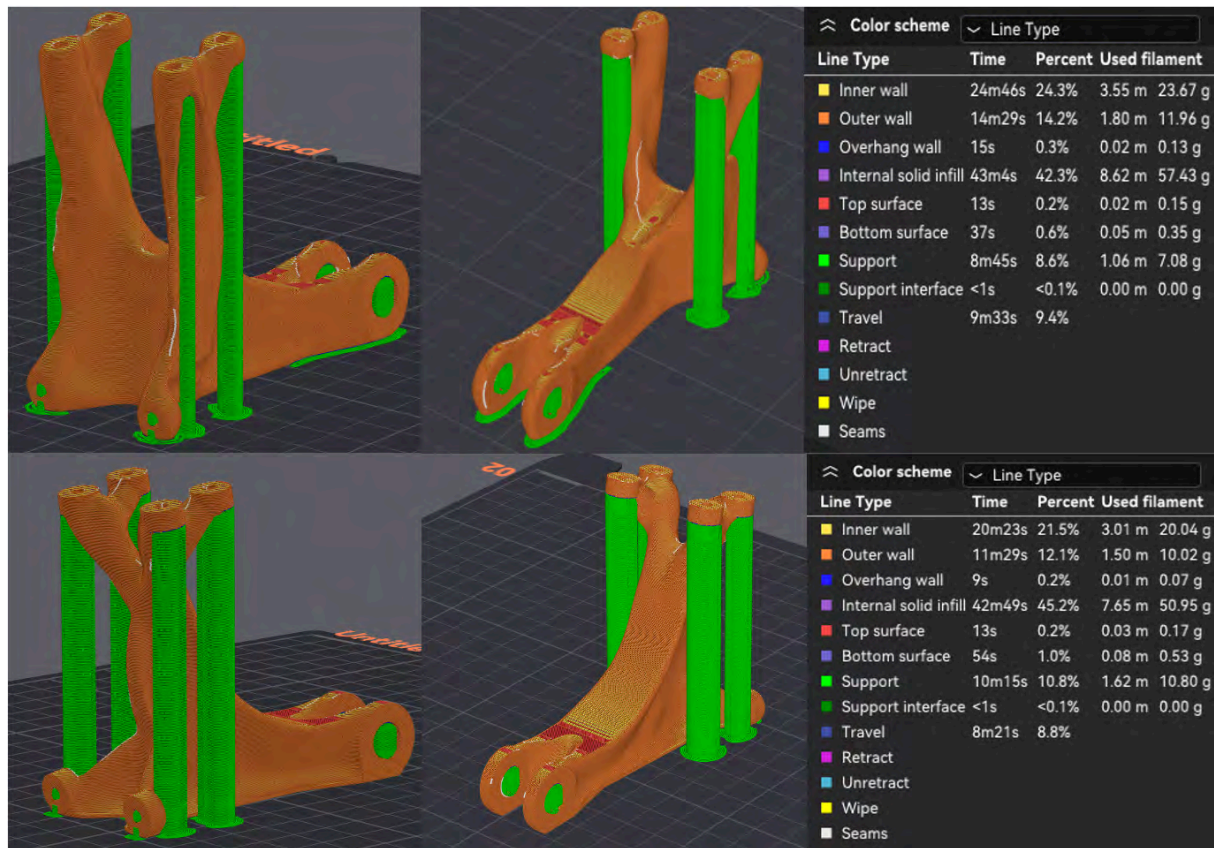


Abbildung 66: Supportstrukturen für Apex und Fusion. Oben Apex unten Fusion

Die ermittelten mechanischen Kennwerte beider Optimierungsergebnisse werden in Tabelle 12 dargestellt. Ausgewertet wird erneut der Sicherheitsfaktor außerhalb der beizubehaltenden Geometrien und den direkt daran angrenzenden Bereiche, da hier erneut Singularitäten vermutet werden müssen. Der für Kapitel 8.1.1 zusätzlich definierte Lastfall wird auch für die hier entstanden Optimierungsergebnisse untersucht.

	Apex				Fusion			
	Lastfall 1	Lastfall 3	Lastfall 4	Durchschnitt	Lastfall 1	Lastfall 3	Lastfall 4	Durchschnitt
maximale Verschiebung [mm]	0,180	0,302	0,174	0,219	0,273	0,227	0,178	0,226
minimaler Sicherheitsfaktor	8	4,2	2,7	5,0	8,0	5,7	4,0	5,9

Tabelle 12: Mechanische Kennwerte der beiden Optimierungen

Die Apex Optimierung weist einen niedrigeren durchschnittlichen minimalen Sicherheitsfaktor als das Originalbauteil auf. Für die FE-Analyse der Apex Ergebnisse (siehe Anhang 103) wurde erneut das Versagenskriterium auf Streckgrenze gesetzt, um Vergleichbarkeit zu schaffen. Die durchschnittlichen mechanischen Kennwerte der Fusion Optimierung, Ergebnisse der FE-Analyse in Anhang 104, zeigen eine geringfügig höhere Leistungsfähigkeit gegenüber dem Originalbauteil auf. Eine Zusammenfassung der Kennwerte wird in Tabelle 12 gezeigt.

Insgesamt kann aufgrund der mechanisch ähnlichen Ergebnisse zum Originalbauteil bei gleichzeitig realisierter Gewichtsreduktion und supportminimierendem Design von zwei erfolgreich optimierten Geometrien gesprochen werden. Hierbei gilt es zu beachten, dass die vorgegebenen Geometrien für die Befestigung an der Umgebung des Brackets dafür verantwortlich sind, dass kein vollständig stützstrukturloses Ergebnis erzeugt werden kann. Der optimierte Teil beider Geometrien ist vollkommen stützstrukturlos. Bei einem Neudesign des optimierten Brackets könnten die noch verbleibenden Stützstrukturen durch Veränderungen der Befestigung des Brackets beseitigt werden.

9.2 Dickenrestriktion

Die beiden erzeugten Geometrien zeigen, wieso es auch für die Topologieoptimierung / das generative Design in Bezug auf Leichtbau eine Dickenrestriktion braucht. Die Dicke wird primär, wie in Kapitel 7.1 für die minimale Dicke gezeigt, über die wirkenden Kräfte gesteuert. Je größer die wirkenden Kräfte, desto dicker die ausgeprägten Geometrien. Mehr Material kann größere Lasten aufnehmen. Sind die Kräfte groß genug, braucht es eine Restriktion der maximalen Dicke, um vorgegebene maximale Dicken einzuhalten. Ohne Restriktion der maximalen Dicke können, durch den Lastfall bedingt, Geometrien entstehen, die für bestimmte Fertigungsverfahren zulässige Dicken nicht einhalten. Für den Entbinderungsprozess in metal FFF sind das 10 mm. In Fusion steht keine Möglichkeit zur Verfügung die maximale Dicke zu beschränken. Der hier betrachtete Lastfall führt in der Optimierung zu der Ausbildung einer Geometrie, die stellenweise dicker ist als 10 mm. Gezeigt wird das in Abbildung 67. Abgebildet ist die Ergebnisgeometrie aus Fusion, in die eine Kugel des Durchmessers 10 mm eingebettet wurde. Diese ist vollständig von der Ergebnisgeometrie umgeben, die globale maximale (und auch die lokale minimale Dicke) muss entsprechend >10 mm sein.

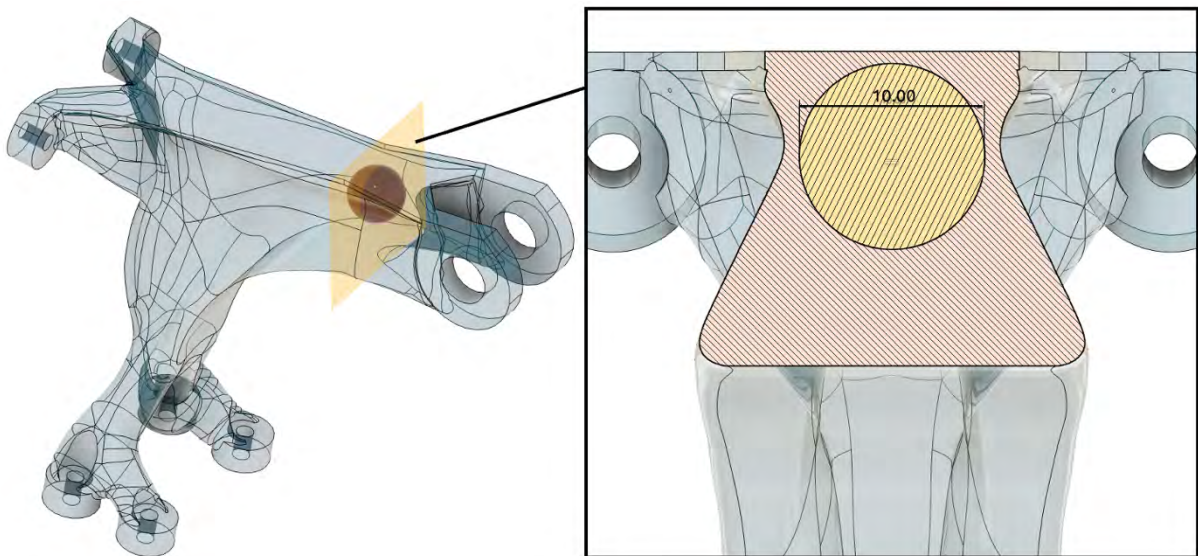


Abbildung 67: Erzeugte Dicke aus der Optimierung mit Fusion. Eingebettet in das Optimierungsergebnis ist eine Kugel des Durchmessers 10 mm.

In der Theorie könnte die Restriktion der maximalen Dicke beispielsweise zur Ausbildung von zwei dünneren, statt einer dickeren Strebe führen. Dass dies in der Umsetzung in Inspire, Apex und Fusion nicht zuverlässig möglich ist, zeigt das optimierte Beispiel aus Kapitel 7.2. Dort wird händisch eine Lösung mit zwei dünneren Geometrien modelliert, um die Restriktion der maximalen Dicke umzusetzen. Lediglich Inspire ist in der Lage das näherungsweise abzubilden. Allerdings ist in Inspire die Restriktion der maximalen Dicke nicht in Kombination mit der Vorgabe eines zulässigen Überhangwinkels möglich, was im Hinblick auf Stützstrukturreduktion in der Optimierung von metal FFF Bauteilen nicht sinnvoll ist.

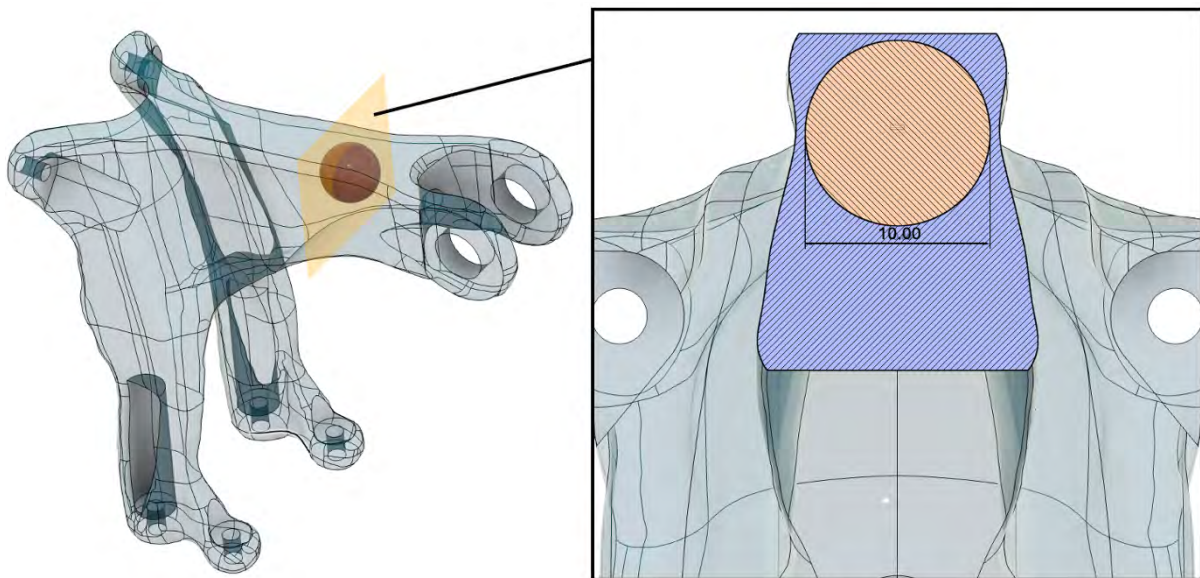


Abbildung 68: Erzeugte Dicke aus der Optimierung mit Apex. Eingebettet in das Optimierungsergebnis ist eine Kugel des Durchmessers 10 mm.

Apex ist bereits in Kapitel 7.2.2 nicht in der Lage die Restriktion der maximalen Dicke für eine einfache Geometrie einzuhalten und ist es hier auch nicht. Das in Abbildung 65 dargestellte Optimierungsergebnis wurde mit Restriktion der maximalen Dicke auf 10 mm optimiert. Während das Ergebnis die Überhangwinkelrestriktion erfolgreich umsetzt, wird die maximale vorgegebene Dicke überschritten. Gezeigt wird das in Abbildung 68. Analog zu dem Ergebnis aus Fusion ist die erzeugte Geometrie stellenweise dicker als 10 mm. Somit bestätigt sich die Einschätzung aus Kapitel 7.2.3 und Kapitel 7.1.4. Momentan ist es mit Apex nicht zuverlässig möglich die Dicke erzeugter Geometrien zu kontrollieren.

9.3 Optimierung mit angepassten beizubehaltenden Geometrien

Die durchgeführten Optimierungen bieten einen Anhaltspunkt inwiefern Inspire, Apex und Fusion auch im Leichtbau für den Designprozess von metal FFF Teilen bei der Stützstrukturreduktion helfen können. Während die Generierung stützstrukturreduzierter Bauteile möglich ist, tun sich alle Programme und deren zugrunde liegenden Optimierungsalgorithmen schwer damit die durch den metal FFF bedingten Fertigungsrestriktionen zuverlässig umzusetzen.

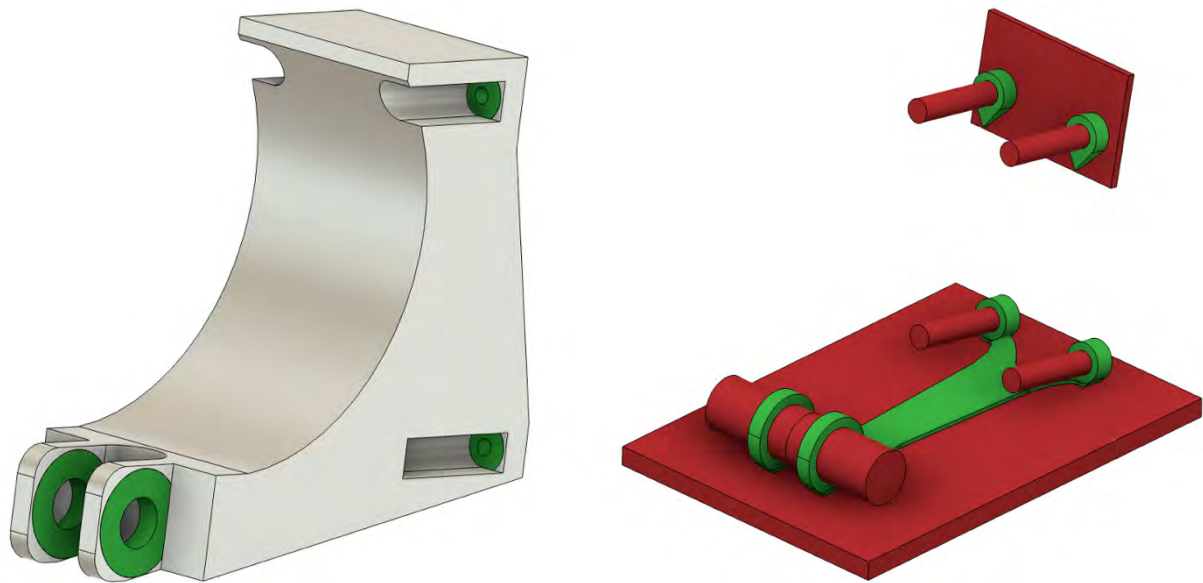


Abbildung 69: Setup für stützstrukturlose Bauteile. Links Designspace für Apex, rechts Setup für das generative Design in Fusion (Hindernis-Geometrie Rohr ausgeblendet)

Dies ist unter anderem auf die vorgegebenen Befestigungen des Brackets zurückzuführen. Wie zum Ende von Kapitel 9.1 aufgeführt, kann durch die Veränderung der vorgesehen Befestigungspunkte eine weitere Stützstrukturreduktion erreicht werden. Zentral dafür ist die Ausrichtung möglichst vieler Befestigungspunkte parallel zu derselben Achse. Beispiele für einen Designspace und ein generatives Design-Setup dafür werden in Abbildung 69 dargestellt. Für diese wurden die Anzahl an Verschraubungen auf vier reduziert und die Positionierung und Ausrichtung zweier beizubehaltender Geometrien angepasst.

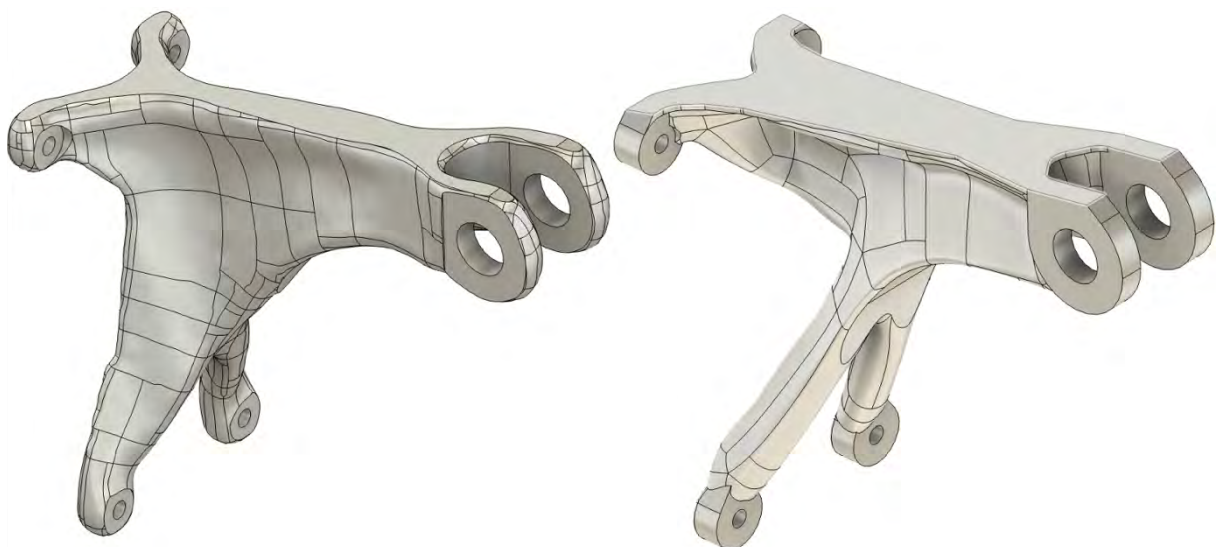


Abbildung 70: Stützstrukturlose Designs, links Apex, rechts Fusion

Die für die in Abbildung 69 dargestellten Setups erzeugten Ergebnisgeometrien werden in Abbildung 70 gezeigt. Die notwendigen Supportstrukturen beschränken sich auf ein Minimum und dienen dem

Support innerhalb der beizubehaltenden Geometrien selbst. Nach den in Kapitel 3.2 erläuterten Designregeln für FFF, kann allerdings auch auf diese verzichtet werden, da alle Bohrungen einen geringeren Durchmesser als 10 mm aufweisen. Für die in Abbildung 71 und Abbildung 72 gezeigten Supportgenerierungen, wird der Support für die kleineren Bohrungen manuell blockiert, da für die Bohrungen davon ausgegangen werden kann, dass sie problemlos stützstrukturfrei gedruckt werden können. Die restlichen Einstellungen entsprechen Anhang 5.

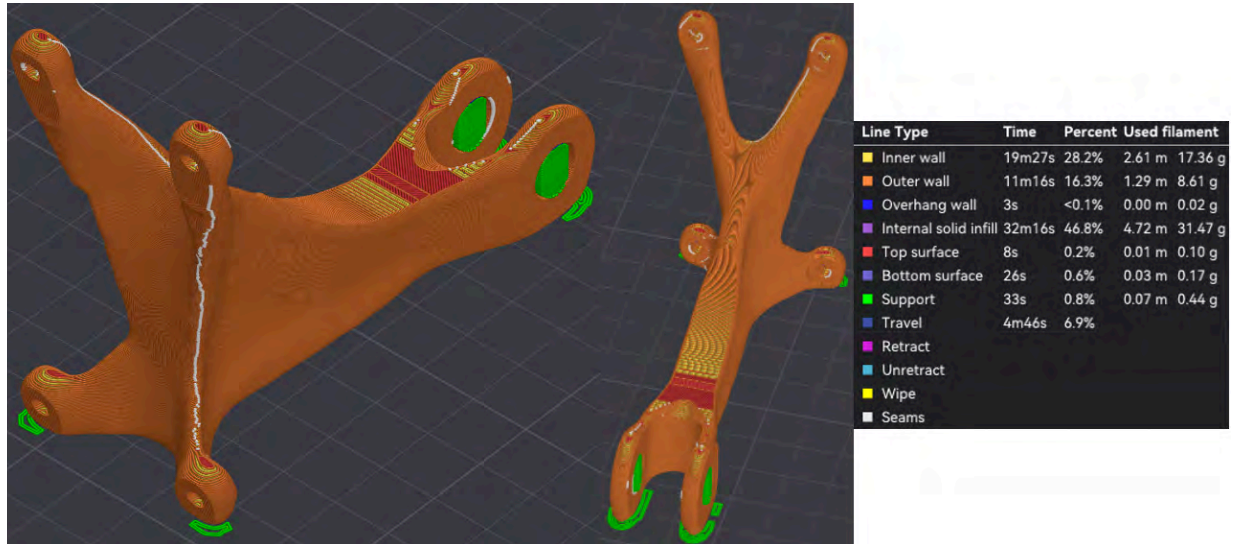


Abbildung 71: Erzeugte Supportstruktur für das stützstrukturlose Design in Apex

Das durch Fusion erzeugte Ergebnis benötigt ebenfalls keine Stützstruktur, außer innerhalb der beizubehaltenden Geometrien. Die ausgebildete Geometrie wird in Abbildung 72 dargestellt.

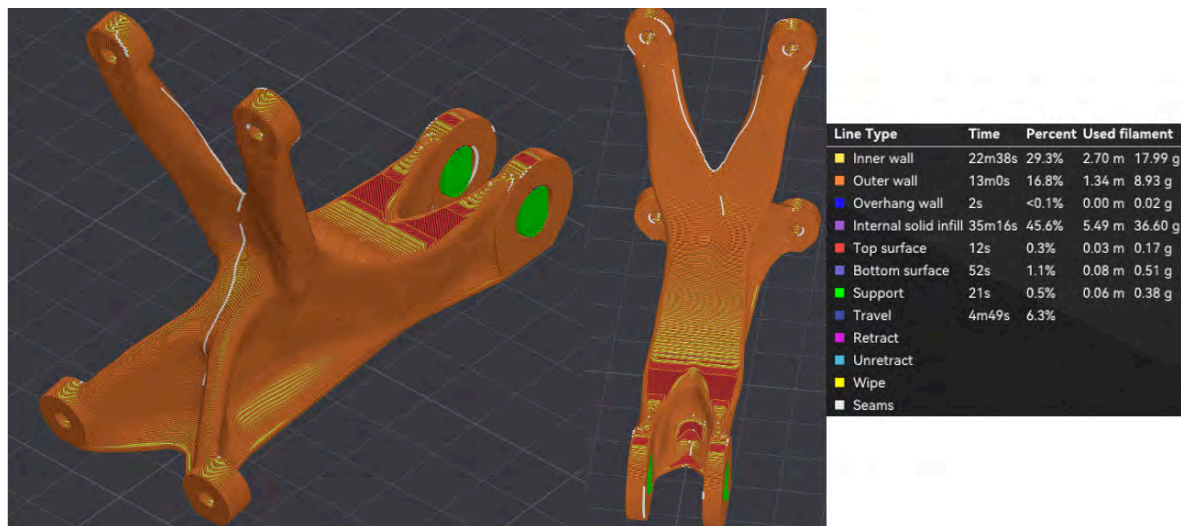


Abbildung 72: Erzeugte Supportstruktur für das stützstrukturlose Design in Fusion

Neben der Minimierung benötigter Stützstrukturen führt die Anpassung der beizubehaltenden Geometrien zu einer weiter reduzierten Masse. Das durch Apex optimierte Bauteil wiegt 59,00 g, das durch Fusion optimierte Bauteil 65,66 g. Somit zeigen die beiden Optimierungen, dass kleine

Veränderungen bereits deutliche Auswirkungen auf die notwendige Supportstruktur und die erreichbaren Leichtbauziele haben. Die Designregeln für den metal FFF bereits bei der Konstruktion von Bauteilen zu beachten, vereinfacht die anschließende Optimierung deutlich. Dieses Beispiel zeigt insofern, dass es lohnenswert ist, Topologieoptimierung/ generatives Design nicht erst zur Optimierung von bereits bestehenden Bauteilen zu nutzen, sondern von Grund auf in den Konstruktionsprozess zu integrieren.

	Apex				Fusion			
	Lastfall 1	Lastfall 3	Lastfall 4	Durchschnitt	Lastfall 1	Lastfall 3	Lastfall 4	Durchschnitt
maximale Verschiebung [mm]	1,047	0,405	0,174	0,542	0,268	0,251	0,222	0,247
minimaler Sicherheitsfaktor	2,5	3,3	2,0	2,6	7,0	4,6	2,8	4,8

Tabelle 13: Mechanische Kennwerte der Optimierungen mit angepassten beizubehaltenden Geometrien

Zugleich muss die Auswirkungen solcher Veränderungen auf die mechanische Leistungsfähigkeit der Optimierungsergebnisse bedacht werden. FE-Analyseergebnisse zu maximaler Verschiebung und minimalem Sicherheitsfaktor zu den beiden durchgeführten Optimierungen werden in Anhang 105, Anhang 106 und Tabelle 13 dargestellt. Trotz gleichen Einstellungen für die Optimierungen, wie in Kapitel 9.1, sind die erzeugten Geometrien sowohl bezüglich der Spannungen als auch bezüglich der Verschiebungen weniger leistungsfähig als sie es mit der vorangegangenen Anordnung der beizubehaltenden Geometrien waren.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend ist auf die Frage zurückzukommen, wie gut Geometrieoptimierung auf Grundlage von SIMP, BESO und Level Set Methode für das Minimieren von Supportstrukturen für Leichtbauteile im Zuge der Fertigung mittels metal FFF geeignet ist. Dafür wurden zunächst einfache Geometrien und Lastfälle optimiert, um die Mechanismen der Supportreduktion innerhalb der drei Algorithmen nachvollziehen zu können. Im Anschluss daran wurde die Restriktion der Dicke in einfachen Beispielen untersucht. Die Erkenntnisse aus den einfachen Optimierungen mit Überhangswinkelrestriktion und Dickenrestriktion wurden im Anschluss auf ein komplexeres Bauteil angewandt. Zur Einschätzung der generierten Ergebnisse wurden deren Kennwerte mit den Kennwerten des Originalbauteils verglichen und evaluiert unter welchen Bedingungen welcher Optimierungsalgorithmus welche Ergebnisse erreicht. Zum Abschluss wurden Szenarien erstellt, in denen mittels Apex und Fusion gewichtsreduzierte Optimierungsergebnisse generiert wurden, die gleichzeitig mit einem Minimum an Support auskommen.

Die Optimierungen des Brackets und der vorangegangenen Beispiele haben gezeigt, dass die drei untersuchten Optimierungsalgorithmen in der Lage sind das originale Bauteil zu verbessern. Dabei

beweist jeder der drei Algorithmen eine Paradedisziplin. Inspire geringe Verschiebungswerte, Apex geringe benötigte Supportmassen und Fusion niedrige Spannungen innerhalb der Optimierungsergebnisse. Die in Kapitel 9 entstandenen Leichtbauergebnisse zeigen darauf aufbauend auf, wie generatives Design und Topologieoptimierung stützstrukturfreie Designs generieren können, die zugleich mechanisch konkurrenzfähig zu traditionell gefertigten Bauteilen sind und dabei eine signifikante Gewichtsreduktion erlauben.

Dennoch stellt sich insgesamt die automatisierte Optimierung von Bauteilen für metal FFF unter Einhaltung aller zu beachtenden Randbedingungen als herausfordernd für alle drei Optimierungsalgorithmen heraus. Insbesondere die Dickenrestriktion kann bisher in keinem der untersuchten Programme zuverlässig im Rahmen des metal FFF genutzt werden. Fusion erlaubt zuverlässig die Restriktion der minimalen Dicke. Die für metal FFF notwendige Einschränkung der maximalen Dicke auf 10 mm in Kombination mit stützstrukturminimierendem Design setzt allerdings keins der untersuchten Programme zuverlässig um. Weitere Besonderheiten des metal FFF, etwa die Begrenzung von maximalen Strebenlängen oder die Schrumpfung des Bauteils in der Nachbearbeitung, finden in keinem der Programme Beachtung.

Insgesamt ist keines der drei genutzten Programme in der Lage zum gewünschten Grad effizient Geometrieoptimierung mit den Fertigungsrestriktion des FFF oder gar des metal FFF zu kombinieren. Gleichzeitig fehlt es an Dokumentation um die zur Verfügung gestellten Funktionen und ihre Funktionsweisen herum. Der von Autodesk uneinheitlich definierte Überhangswinkel, die konsequent nicht umgesetzte Einhaltung der minimalen Dicke in Inspire und die ohne relevante Veränderung stattfindende Definition von Dickenrestriktionen in Apex sind Beispiele dafür.

Im Rahmen des Leichtbaus und der Supportminimierung kann die Topologieoptimierung und das generative Design beachtliche Performancesteigerungen möglich machen. Als die All-In-One Lösung als die insbesondere das generative Design durch Hersteller*innen präsentiert wird, können sich die hier untersuchten Programme allerdings nicht behaupten. Insbesondere für wenig verbreitete Herstellungsverfahren, wie metal FFF, fehlt es an spezifischen Einstellungsmöglichkeiten, um Ergebnisgeometrien ohne Nacharbeit nutzen zu können. Dennoch erweisen sich die erzeugten Geometrien als oftmals leistungstärker gegenüber ihren traditionell designten und hergestellten Pendants. Die Topologieoptimierung und das generative Design erweisen sich somit als performante Werkzeuge in der Konstruktion von für metal FFF geeigneten Leichtbauteilen.

10.1 Ausblick

Neben dem für metal FFF geeignetem Konstruieren von Leichtbauteilen, bietet diese Studie weitere untersuchenswerte Anknüpfungspunkte. Anschließend an diese Studie könnte evaluiert werden unter welchen Umständen eine striktere Einhaltung vorgegebener Fertigungsrestriktion in der Topologieoptimierung und dem generativen Design umsetzbar ist. Vorstellbar wäre die Kombination

mehrerer Programme oder aufeinander aufbauende Optimierungen, in denen ein zweiter Optimierungslauf das Ergebnis einer ersten Optimierung verbessert. So wäre etwa eine Kombination der besseren mechanischen Kennwerte der Fusion Optimierungsergebnisse mit der überlegenen Supportreduktion von Apex vorstellbar.



Abbildung 73: Uneingeschränkt optimiertes Optimierungsergebnis aus Fusion

In diesem Themenfeld weiter zu untersuchen ist zudem der Zusammenhang zwischen Überhangswinkelvorgabe und Dickenvorgabe. Um die Überhangswinkelrestriktion einzuhalten, erzeugen Apex und Fusion, wie zum Beispiel in Abbildung 65 zu erkennen, zusammenhängende Geometrien, Hohlräume sind darin nicht zu finden. So muss der Überhangswinkel nur für eine zentrale Geometrie eingehalten werden. Ohne Überhangswinkelrestriktion optimierte Geometrien, wie in Abbildung 73 dargestellt, verfügen hingegen über Freiräume und Streben. Das Leiten des Kraftflusses durch mehrere voneinander getrennten Streben ermöglicht dünnere Streben, während die zusammenhängenden Geometrien der mit Überhangswinkelrestriktion optimierten Ergebnisse den Kraftfluss durch eine Geometrie leiten, die dafür dicker sein muss. Somit führen Überhangswinkelrestriktion und Restriktion der maximalen Dicke zu gegenläufigen Ergebnissen. Inwiefern sich Überhangswinkelrestriktion und Restriktion der maximalen Dicke gegenseitig beeinflussen, kann weiter untersucht werden.

Daneben stellen auch die zur Verfügung stehenden Fertigungsrestriktionen Gegenstand weiterer möglicher Untersuchungen dar. Dabei wäre interessant zu evaluieren, inwiefern die weiteren Fertigungsbeschränkungen von metal FFF in den Optimierungsprozess mit eingebunden werden können.

Auch diese Studie selbst bietet Potentiale für weitere Untersuchungen. Die überprüften Lastfälle sind niedrig angenommen um den Optimierungsalgorithmen möglichst große Freiheit bei der Einhaltung der Fertigungsrestriktionen zu erlauben. Der Zusammenhang zwischen der Güte der Optimierungsergebnisse und wirkenden Lasten könnte weiter untersucht werden.

Weitergehend könnten die Unterschiede zwischen spannungs- und steifigkeitsbasierter Optimierungen in Hinblick auf die Einhaltung von Fertigungsrestriktion und ihren Effekt auf Supportminimierung untersucht werden. Diese Studie nutzt beide Optimierungsmethoden. Der spannungsbasierte Ansatz in Apex hat sich als am effizientesten in der Supportvermeidung herausgestellt, eine weitere Untersuchung in anderen Optimierungsumgebungen ist notwendig, um einen generellen Zusammenhang zwischen Berechnungsbasis des Optimierungsalgorithmus und Supportvermeidung zu prüfen.

Gegenstand weiterer Untersuchung kann auch Apex darstellen. Das Programm bietet über die in dieser Arbeit genutzten Einstellungen hinaus noch weitere Möglichkeiten, um die Optimierung anzupassen. So können etwa unterschiedliche Profile für unterschiedliche additive Fertigungsverfahren gewählt werden. Die Definition anisotroper Materialien und deren Einfluss auf die Nutzbarkeit von in Apex optimierten Bauteilen in der Praxis, bzw. ihr Einfluss auf den Umfang auf die notwendige Nacharbeit an einem Bauteil, stellt ebenfalls ein weiteres Untersuchungsthema dar. Darüber hinaus ist eine nähere Betrachtung der Randbedingungen von Nöten. Die aktuelle Vorgabe von Sicherheitsfaktoren wird nicht konsequent umgesetzt. Die Korrelation zwischen vorgegebenem Spannungsziel und erreichtem Spannungsziel stellt somit ein Thema dar, dass näher untersucht werden muss. Das Gleiche gilt für die Korrelation zwischen vorgegebenem Überhangswinkel und erzeugtem Überhangswinkel in allen drei Programmen, insbesondere in Fusion.

Neben der in dieser Arbeit untersuchten Supportvermeidung, ist auch die Supportoptimierung ein weiteres zu untersuchendes Thema. Aktuelle Slicer stellen bereits unterschiedliche Supportausprägungen bereit. Bekannt ist der Tree-Support, der Support nach dem Vorbild von Bäumen in verästelter Form aufbaut. Weitergehend wäre auch die Topologieoptimierung von Supportstrukturen denkbar. Neben minimaler Supportmasse könnte diese etwa die einfache Entfernbarkeit erzeugter Supportstrukturen einbeziehen. Gipfeln würde diese Herangehensweise in der Optimierung eines Bauteils inklusive der dafür benötigten Supportstruktur als eine Optimierung. Diese würde dabei auch die optimale Druckrichtung einbeziehen. Das Ergebnis wäre eine an die wirkenden Kräfte angepasste Geometrie mit minimalem notwendigem Support. Die Druckrichtung für das optimierte Teil wäre so ausgewählt, dass möglichst wenig Support benötigt wird und der benötigte Support wäre in sich auf minimalen Materialverbrauch und einfache Entfernbarkeit optimiert.

Literaturverzeichnis

- [1] Abbey, T.: Topology Optimization Methods.
„<https://www.digitalengineering247.com/article/topology-optimization-methods>“, Abruf am 19.08.2024
- [2] Altair Engineering, Inc.: Stress Constraints.
“https://2021.help.altair.com/2021/inspire/en_us/topics/inspire/structure/optimization_stress_constraints.htm“, Abruf am 10.10.2024
- [3] Altair Engineering, Inc.: Altair Inspire Overhang Shape Controls. In Altair Learning Center.
„<https://www.altair.de/resource/altair-inspire-overhang-shape-controls>“, Abruf am 01.09.2024
- [4] Andreassen, E. u.a.: Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code. In Structural and Multidisciplinary Optimization, 43 (1), hrsg. von Springer Verlag, S. 1-16, 2010
- [5] Anker Technology Ltd.: AnkerMake M5C 3D-Drucker. “<https://www.ankermake.com/eu-de/products/m5c>“. Abruf am 10.10.2024. Beschriftung nach: Tavares, J.: (2021) Illustration of Cartesian printer. “https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-Cartesian-printer-Cartesian3D-2019_fig4_350051043“, Abruf am 26.06.2024
- [6] Aremu, A. u.a.: Suitability of SIMP and BESO Topology Optimization Algorithms for Additive Manufacture, Loughborough, 2010
- [7] Autodesk Inc.: Set up a Static Stress analysis of a generative design outcome.
“<https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-D0947E92-01B7-47BC-ADD8-CB3745200228>“, Abruf am 10.10.2024
- [8] AutodeskInc.: Overhang angle. In Fusion Product Documentation.
„<https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GD-TERM-OVERHANG-ANGLE>“, Abruf am 01.09.2024
- [9] Beckmann, J.; Prof. Dr. Telgkamp, J.: Persönliches Gespräch am 22.07.2024
- [10] Beckmann, J.: Persönliches Gespräch am 11.07.2024
- [11] Centre for Innovative Structures and Materials: BESO 2D. „<https://www.cism.org.au/tools>“, Abruf am 23.08.2024
- [12] Darulis, A.: 6 Key Principles of resin 3D Printing Supports that Work.
„<https://ameralabs.com/blog/6-tips-3d-printing-supports/>“, Abruf am 10.10.2024
- [13] Dassault Systèmes: SIMP_Methode zur Topologieoptimierung.
„https://help.solidworks.com/2022/german/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm“, Abruf am 17.08.2024

- [14] Elliott, A. M.; Waters, C. K.: Additive Manufacturing for Designers: A Primer. SAE International, Warrendale, 2019
- [15] Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM: Metallischer 3D-Druck mittels Fused Filament Fabrication.
„https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Ueberuns/Standorte/Dresden/Zellulare_metallische_Werkstoffe/fused-filament-fabrication.html“, Abruf am 28.06.2024
- [16] Gonabadi, H.; Yadav, A.; Bull, S. J.: The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111, hrsg. Von School of Engineering, Newcastle University, UK, S. 706, 2020
- [17] Goncalves, F.: Introduction to Structural Optimization using the ESO and BESO Evolutionary Methods. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2018
- [18] Hankins, S.: Level Set Optimization Method Derivation.
„<https://www.youtube.com/watch?v=lsBPwNHH-RQ>“, Abruf 05.10.2024
- [19] Huang, X.; Xie, Y.: Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications. John Wiley & Sons, West Sussex, 2010
- [20] Huang, X.; Xie, Y.; Burry, M.: A new Algorithm for Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization. In: JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 49 (4), S. 1091-1099, 2006
- [21] Kinworthy, J.: How Do You Make Nylon Carbon Fiber Filament. „<https://filamatrix.com/how-do-you-make-nylon-carbon-fiber-filament/>“, Abruf am 18.06.2024
- [22] Krueger, L.: Mass Target. In MSC Apex Generative Design 2024.1 – Help Section.
„<https://amendate.atlassian.net/wiki/spaces/ApexGD241H/pages/3488776284/Mass+Target>“, Abruf am 13.09.2024
- [23] Krueger, Lennart.: Support Reduction. In MSC Apex Generative Design 2024.1 - Help Section.
„<https://amendate.atlassian.net/wiki/spaces/ApexGD241H/pages/3414492726/Support+Reduction>“, Abruf am 01.09.2024
- [24] Mark3D UK Limited: 3D Printing Process. „<https://www.mark3d.com/en/3d-printing-process/>“, Abruf am 04.07.2024
- [25] MarkForged, Inc., Mark3D GmbH: Design Guide for 3D Printing with Metals.
„<https://www.mark3d.com/de/ratgeber-markforged-metall-3d-druck-design-guide-2>“, Abruf am 03.07.2024

- [26] Montazeri, M.; Yavari, R.; Rao, P.; and Boulware, P.: In-Process Monitoring of Material Cross-Contamination Defects in Laser Powder Bed Fusion. In: Manufacturing Science and Engineering, 140 (11).
„<https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/140/11/111001/366217/In-Process-Monitoring-of-Material-Cross>“, 2018
- [27] Otomori, M. u.a.: Matlab code for a level set-based topology optimization method using a reaction diffusion equation. In Structural and Multidisciplinary Optimization, 51, hrsg. von Springer Verlag, S. 1159-1172, 2014
- [28] Pellegrini, A.; Palmieri, M.; Guerra, M.: Evaluation of anisotropic mechanical behaviour of 316L parts realized by metal fused filament fabrication using digital image correlation. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 120, 2022
- [29] Proto Labs Germany GmbH: Selektives Lasersintern – Vor- und Nachteile.
„<https://www.protolabs.com/de-de/ressourcen/blog/selektives-lasersintern-vor-und-nachteile/>“, Abruf am 24.06.2024
- [30] Robemetall GmbH: Werkstoffdatenblatt EN AW-2024 / WL 3.1354.
„https://www.robemetall.de/fileadmin/user_upload/robemetall_Datenblatt_EN_AW_2024_02.pdf“, Abruf am 01.08.2024
- [31] Schlich, S.: Funktionsintegration.
„<https://www.lkt.tf.fau.de/forschung/forschungsschwerpunkte/additive-fertigung-strahlschmelzen/funktionsintegration/>“, Abruf am 18.06.2024
- [32] Sculpteo: Which 3D printing technologies do you use? [Graph]. In Statista.
„<https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>“, Abruf am 18.06.2024
- [33] Telgkamp, J.: RAPID PROTOTYPING / ADDITIVE FERTIGUNG 2 – BEGRIFFSBESTIMMUNG. WiSe 21/22
- [34] Thompson, Y.: Additive Manufacturing by Metal Fused Filament Fabrication. In: FAU Studien Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, hrsg. von FAU University Press, Erlangen, S. 15, 20XX
- [35] Uskov, V.: 2D topology optimization code without using of Ersatz material.
„<https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55036-2d-topology-optimization-code-without-using-of-ersatz-material>“, Abruf am 23.08.2024

- [36] VDI 3405 Blatt 3.4: Additive Fertigungsverfahren - Gestaltungsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Materialextrusionsverfahren. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2021
- [37] VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren, Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2014
- [38] Wieland SMH GmbH: Werkstoffdatenblatt EN AW 2024 [EN AW-Al Cu4Mg1]. „https://www.wieland.com/en/content/download/17162/file/EN-AW-2024_DE.pdf“, Abruf am 01.08.2024
- [39] Xie, Y.; Huang, X.: Recent developments in evolutionary structural optimization (ESO) for continuum structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 10, Melbourne, Australia, 2010

Anhang

5.3 SIMP, BESO und Level-Set Methode für die additive Fertigung

```
%%% 2D topology optimization code with skip of DOFs %%%
% Example: topo2Skip(300,100,0.5,1.8,100)  topo2Skip(600,200,0.1,1.5,100)
function SIMP(nelx,nely,volfrac,rs,nloop)
penal = 3; % Penalization factor
eps0 = 1e-3; % Skip level
eta = 0.1; % Damping coefficient, initial
etamax = 1; % and max values
nu = 0.3; % Poisson's ratio
%% Isoparametric element stiffness matrix
a = [12 3 -6 3 0 -6 -3 -3];
b = [-4 3 -2 -9 4 2 -3 9];
k = (a+nu*b)/(24*(1-nu^2));
i1 = [1 2 3 8; 2 1 4 5; 3 4 1 7; 8 5 7 1];
i2 = [6 7 5 4; 7 6 8 3; 5 8 6 2; 4 3 2 6];
KE = k([i1 i2; i2 i1]);
%% Prepare for assembly of the global stiffness matrix
nel = nelx*nely; % Number of elements
nnodes = (1+nelx)*(1+nely); % Number of nodes
ndof = 2*nnodes; % Number of DOFs
nodenrs = reshape(1:nnodes,1+nely,1+nelx);
edofVec = reshape(2*nodenrs(1:end-1,1:end-1)+1,[],1);
edofMat = repmat(edofVec,1,8)+repmat([0 1 2*nely+[2 3 0 1] -2 -1],nel,1);
iK = reshape(kron(edofMat,ones(8,1))',[],1);
jK = reshape(kron(edofMat,ones(1,8))',[],1);
%% Loads and supports for half MBB beam
F = sparse(2,1,-1,ndof,1);
F((nely+1)*(nelx)*2:2:(nely+1)*nelx*2) = 1;
%og. Kraftdefinition F = sparse(2,1,-1,ndof,1);
%og Fixierungen fixeddof = union(1:2:2*(nely+1),ndof);
fixeddof=[1:2*(nely+1)];

%% Initialization
warning('off','MATLAB:singularMatrix');
warning('off','MATLAB:nearlySingularMatrix');
lm = 0;
reta = (etamax/eta)^(1/nloop); % Augment of damping
freedof = setdiff(1:ndof,fixeddof); % Free DOFs
U = zeros(ndof,1); % Displacements
x = repmat(volfrac,nel,1); % Densities

%% Iterations
for loop = 1:nloop
    %% Gaussian filtering of densities
    x = imgaussfilt(reshape(x,nely,nelx),rs); x = x(:);
    %% Sensitivity analysis
    y = x.^penal; % Young's modulus
    y(y < eps0*volfrac) = 0; % is 0 for skipped elements
    K = sparse(iK,jK,KE(:)*y'); % Global stiffness matrix
    d = diag(K); % Diagonal
    skip = find(d == 0); % Skipped DOFs
    remain = setdiff(freedof,skip); % Remaining DOFs
    K = K(remain,remain);
    U(remain) = (K+K')\F(remain)*2; % Solve for remaining DOFs only
    ue = U(edofMat);
    ce = max(0,y.*sum(ue*KE.*ue,2)); % Element energy
    %% Optimality criteria update of densities
    x = x.*(ce.^eta);
    xNew = @(a) min(1,x*exp(a));
    delta = @(a) sum(xNew(a)) - volfrac*nel;
    lm = fzero(delta,lm);
    x = xNew(lm);
    eta = min(etamax,eta*reta); % New value of damping coefficient
    %% Print info
    fprintf('%u\t C: %.6g\t Skip: %u%\n', ...
        loop,sum(ce),round(100*numel(skip)/numel(freedof)));

    %% Plot densities and capture image for GIF
    imagesc(reshape(1-x,nely,nelx));
    colormap(gray); caxis([0 1]); axis equal; axis off; drawnow;
```

```

        % Bild für GIF aufnehmen
        GifFrame(loop)
    %% Plot densities
        imagesc(reshape(1-x,nely,nelx));
        colormap(gray); caxis([0 1]); axis equal; axis off; drawnow;
end
end

function GifFrame(loop)
    filename = fullfile(getenv('HOME'), 'Desktop', 'SIMP100.gif');
    frame = getframe(gcf);
    im = frame2im(frame);
    [imind, cm] = rgb2ind(im, 256);

    if loop == 1
        imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'Loopcount', inf, 'DelayTime', 0);
    else
        imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'WriteMode', 'append', 'DelayTime', 0);
    end
end
end

```

Anhang 1: Code SIMP

```

%%%%% A SOFT-KILL BES0 CODE BY X. HUANG and Y.M. Xie %%%%
function BES0(nelx,nely,volfrac,er,rmin);
% INITIALIZE
x(1:nely,1:nelx) = 1.; vol=1.; i = 0; change = 1.; penal = 3.;
% START iTH ITERATION
%while change > 0.001
for iterNum = 1:202
    i = i + 1; vol = max(vol*(1-er),volfrac);
    if i > 1; olddc = dc; end
% FE-ANALYSIS
[U]=FE(nelx,nely,x,penal);
% OBJECTIVE FUNCTION AND SENSITIVITY ANALYSIS
[KE] = lk;
c(i) = 0.;
for ely = 1:nely
    for elx = 1:nelx
        n1 = (nely+1)*(elx-1)+ely;
        n2 = (nely+1)* elx +ely;
        Ue = U([2*n1-1;2*n1; 2*n2-1;2*n2; 2*n2+1;2*n2+2; 2*n1+1;2*n1+2],1);
        c(i) = c(i) + 0.5*x(ely,elx)^penal*Ue'*KE*Ue;
        dc(ely,elx) = 0.5*x(ely,elx)^(penal-1)*Ue'*KE*Ue;
    end
end
% FILTERING OF SENSITIVITIES
[dc] = check(nelx,nely,rmin,x,dc);
% STABILIZATION OF EVOLUTIONARY PROCESS
if i > 1; dc = (dc+olddc)/2.; end
% BES0 DESIGN UPDATE
[x] = ADDDEL(nelx,nely,vol,dc,x);
% PRINT RESULTS
if i>10;
    change=abs(sum(c(i-9:i-5))-sum(c(i-4:i)))/sum(c(i-4:i));
end
disp([' It.: ' sprintf('%4i',i) ' Obj.: ' sprintf('%10.4f',c(i)) ...
      ' Vol.: ' sprintf('%6.3f',sum(sum(x))/(nelx*nely)) ...
      ' ch.: ' sprintf('%6.3f',change) ])
% PLOT DENSITIES
colormap(gray); imagesc(-x); axis equal; axis tight; axis off;pause(1e-6);
GifFrame(i)
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [x]=ADDEL(nelx,nely,volfrac,dc,x)
l1 = min(min(dc)); l2 = max(max(dc));
while ((l2-l1)/l2 > 1.0e-5)
    th = (l1+l2)/2.;
    x = max(0.001,sign(dc-th));
    if sum(sum(x))-volfrac*(nelx*nely) > 0;
        l1 = th;
    else
        l2 = th;
    end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MESH-INDEPENDENCY FILTER %%%%%%%%%%%%%%%
function [dcf]=check(nelx,nely,rmin,x,dc)
dcf=zeros(nely,nelx);
for i = 1:nelx
    for j = 1:nely
        sum=0.0;
        for k = max(i-floor(rmin),1):min(i+floor(rmin),nelx)
            for l = max(j-floor(rmin),1):min(j+floor(rmin),nely)
                fac = rmin-sqrt((i-k)^2+(j-l)^2);
                sum = sum+max(0,fac);
                dcf(j,i) = dcf(j,i) + max(0,fac)*dc(l,k);
            end
        end
        dcf(j,i) = dcf(j,i)/sum;
    end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FE-ANALYSIS %%%%%%%%%%%%%%%
function [U]=FE(nelx,nely,x,penal)
[KE] = lk;
K = sparse(2*(nelx+1)*(nely+1), 2*(nelx+1)*(nely+1));
F = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),1); U = zeros(2*(nely+1)*(nelx+1),1);

```

```

for elx = 1:nlx
    for ely = 1:nely
        n1 = (nely+1)*(elx-1)+ely;
        n2 = (nely+1)* elx +ely;
        edof = [2*n1-1; 2*n1; 2*n2-1; 2*n2; 2*n2+1; 2*n2+2; 2*n1+1; 2*n1+2];
        K(edof,edof) = K(edof,edof) + x(ely,elx)^penal*KE;
    end
end
% DEFINE LOADS AND SUPPORTS (Cantilever)
F((nely+1)*(nelx)*2:2:(nely+1)*(nelx)*2) = 1;
%og Kraftdef.F(2*(nelx+1)*(nely+1)-nely,1)=-1.0;
fixeddofs=[1:2*(nely+1)];
alldofs = [1:2*(nely+1)*(nelx+1)];
freedofs = setdiff(alldofs,fixeddofs);
% SOLVING
U(freedofs,:) = K(freedofs,freedofs) \ F(freedofs,:);
U(fixeddofs,:)= 0;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [KE]=lk
E = 1.;
nu = 0.3;
k=[ 1/2-nu/6    1/8+nu/8 -1/4-nu/12 -1/8+3*nu/8 ...
    -1/4+nu/12 -1/8-nu/8  nu/6      1/8-3*nu/8];
KE = E/(1-nu^2)*[ k(1) k(2) k(3) k(4) k(5) k(6) k(7) k(8)
                  k(2) k(1) k(8) k(7) k(6) k(5) k(4) k(3)
                  k(3) k(8) k(1) k(6) k(7) k(4) k(5) k(2)
                  k(4) k(7) k(6) k(1) k(8) k(3) k(2) k(5)
                  k(5) k(6) k(7) k(8) k(1) k(2) k(3) k(4)
                  k(6) k(5) k(4) k(3) k(2) k(1) k(8) k(7)
                  k(7) k(4) k(5) k(2) k(3) k(8) k(1) k(6)
                  k(8) k(3) k(2) k(5) k(4) k(7) k(6) k(1)];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function GifFrame(i)
filename = fullfile(getenv('HOME'), 'Desktop', 'BES0.gif');
frame = getframe(gcf);
im = frame2im(frame);
[imind, cm] = rgb2ind(im, 256);
if i == 1
    imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'Loopcount', inf, 'DelayTime', 0);
else
    imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'WriteMode', 'append', 'DelayTime', 0);
end
end
end

```

Anhang 2: Code Beso

```

%Empfohlen: Levelset(300,100,0.5,0.0014)
function Levelset(nelx, nely, Vmax, tau)
%% Parameter definition
E0 = 1;
Emin = 1e-4;
nu = 0.3;
nvol = 100;
dt = 0.1;
d = -0.02;
p = 4;
phi = ones((nely+1)*(nelx+1), 1);
str = ones(nely, nelx);
volInit = sum(str(:)) / (nelx * nely);
%% Finite element analysis preparation
% For displacement field
A11 = [12 3 -6 -3; 3 12 3 0; -6 3 12 -3; -3 0 -3 12];
A12 = [-6 -3 0 3; -3 -6 -3 -6; 0 -3 -6 3; 3 -6 3 -6];
B11 = [-4 3 -2 9; 3 -4 -9 4; -2 -9 -4 -3; 9 4 -3 -4];
B12 = [2 -3 4 -9; -3 2 9 -2; 4 9 2 3; -9 -2 3 2];
KE = 1/(1-nu^2)/24*( [A11 A12; A12' A11] + nu*[B11 B12; B12' B11] );
% For topological derivative
a1 = 3*(1-nu)/(2*(1+nu)*(7-5*nu))*(-(1-14*nu+15*nu^2)*E0)/(1-2*nu)^2;
a2 = 3*(1-nu)/(2*(1+nu)*(7-5*nu))*5*E0;
A = (a1+2*a2)/24*( [A11 A12; A12' A11] + (a1/(a1+2*a2))*[B11 B12; B12' B11] );

nodenrs = reshape(1:(1+nelx)*(1+nely), 1+nely, 1+nelx);
edofVec = reshape(2*nodenrs(1:end-1,1:end-1)+1, nelx*nely, 1);
edofMat = repmat(edofVec, 1, 8) + repmat([0 1 2*nely+[2 3 0 1] -2 -1], nelx*nely, 1);
iK = reshape(kron(edofMat, ones(8,1))', 64*nelx*nely, 1);
jK = reshape(kron(edofMat, ones(1,8))', 64*nelx*nely, 1);

% For reaction diffusion equation
NNdife = 1/6 * [4 -1 -2 -1; -1 4 -1 -2; -2 -1 4 -1; -1 -2 -1 4];
NNe = 1/36 * [4 2 1 2; 2 4 2 1; 1 2 4 2; 2 1 2 4];
edofVec2 = reshape(nodenrs(1:end-1,1:end-1)+1, nelx*nely, 1);
edofMat2 = repmat(edofVec2, 1, 4) + repmat([0 nely+1 nely -1], nelx*nely, 1);
iN = reshape(kron(edofMat2, ones(4,1))', 16*nelx*nely, 1);
jN = reshape(kron(edofMat2, ones(1,4))', 16*nelx*nely, 1);
sNN = reshape(NNe(:)*ones(1, nely*nelx), 16*nelx*nely, 1);
NN = sparse(iN, jN, sNN);
sNNdif = reshape(NNdife(:)*ones(1, nely*nelx), 16*nelx*nely, 1);
NNdif = sparse(iN, jN, sNNdif);
%% Loads and boundary settings
F = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1), 1);
U = zeros(2*(nely+1)*(nelx+1), 1);
% og Kraft F((nely+1)*(nelx)*2+nely+2*(-
round(nely/32)+1)+100:2:(nely+1)*(nelx)*2+nely+2*(round(nely/32)+1)+100, 1) = 1;
F((nely+1)*(nelx)*2:2:(nely+1)*(nelx)*2) = 1;
fixeddofs = 1:2*(nely+1);
alldofs = 1:2*(nely+1)*(nelx+1);
freedofs = setdiff(alldofs, fixeddofs);
T = NN/dt + tau*(nely*nelx)*NNdif;
fixeddofsphi = sort([1:nely+1 nely+2:nely+1:(nely+1)*(nelx)
2*(nely+1):nely+1:(nely+1)*(nelx) ...
(nely+1)*nelx+1:(nely+1)*(nelx+1)]);
phi(fixeddofsphi) = 0;
alldofsphi = 1:(nely+1)*(nelx+1);
freedofsphi = setdiff(alldofsphi, fixeddofsphi);

%% Main loop
for iterNum = 1:202
% FE-analysis, calculate sensitivities
sK = reshape(KE(:)*(Emin+str(:)*(E0-Emin)), 64*nelx*nely, 1);
K = sparse(iK, jK, sK);
K = (K+K')/2;
U(freedofs) = K(freedofs, freedofs) \ F(freedofs);
SED = (Emin+str*(E0-Emin)).*reshape(sum((U(edofMat)*KE).*U(edofMat), 2), nely, nelx);
TD = (1e-4+str*(1-1e-4)).*reshape(sum((U(edofMat)*A).*U(edofMat), 2), nely, nelx);
td2 = [TD(1,1) TD(1,:) TD(1,end); TD(:,1) TD TD(:,end); TD(end,1) TD(end,:)]
TD(end,end)];
TDN = 0.25*(td2(1:end-1,1:end-1)+td2(2:end,1:end-1)+td2(1:end-
1,2:end)+td2(2:end,2:end));
objective(iterNum) = sum(SED(:));
vol = sum(str(:)) / (nelx * nely);

% Print results

```

```

        disp(['It.: ' num2str(iterNum) ' Compl.: ' sprintf('%10.4e',
objective(iterNum)/((nelx*nely))) ...
        ' Vol.: ' sprintf('%6.2f', vol)]);

% Hauptfenster
figure(1);
clf; % Clear figure
[X, Y] = meshgrid(0:nelx, 0:nely);
surf(X, Y, reshape(phi, nely+1, nelx+1));
colormap("jet"); % Bunte Farbskala
colorbar;
title(['Level-Set-Funktion - Iteration ', num2str(iterNum)]);
xlabel('X-Richtung');
ylabel('Y-Richtung');
zlabel('Level-Set-Wert');
axis tight;
view(3);

% Ebene auf Höhe 0 hinzufügen
hold on;
Z = zeros(size(X));
surf(X, Y, Z, 'FaceAlpha', 0.5, 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', [0.5 0.5 0.5]);
hold off;

% Kleines Fenster
axes('Position', [0.7, 0.7, 0.25, 0.5]);
imagesc(-str, [-1, 0]);
%colormap("gray");
title('Struktur');
axis equal; axis tight; axis off;

drawnow;

% Check for convergence
if iterNum > nvol && (abs(vol-Vmax) < 0.005) && all(abs(objective(end) - ...
objective(end-5:end-1)) < 0.01*abs(objective(end)))
    return;
end

% Set augmented Lagrangian parameters
ex = Vmax + (volInit-Vmax)*max(0, 1-iterNum/nvol);
lambda = sum(sum(TDN)) / ((nely+1)*(nelx+1)) * exp(p*((vol-ex)/ex+d));
C = 1 / sum(abs(TDN(:))) * (nely * nelx);
g2 = reshape(TDN, (nely+1)*(nelx+1), 1);

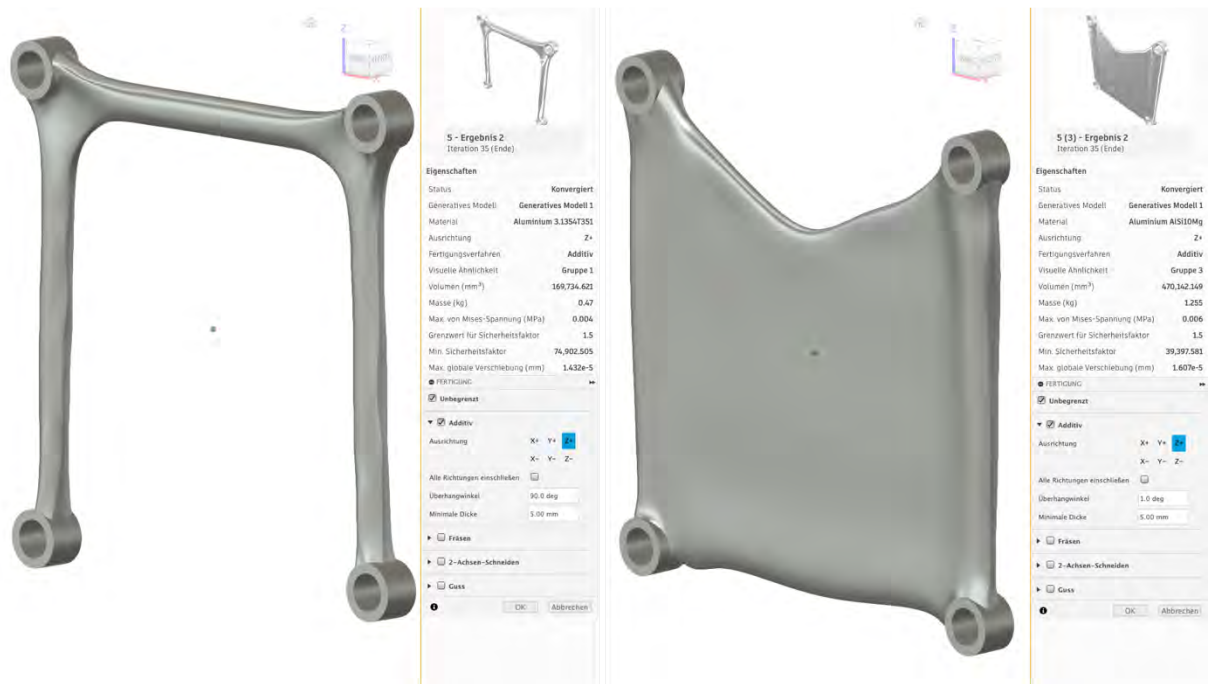
% Update level set function
Y = NN * (C*(g2-lambda*ones(size(g2))) + phi/dt);
phi(freedofsphi, :) = T(freedofsphi, freedofsphi) \ Y(freedofsphi, :);
phi = min(1, max(-1, phi));
phin = reshape(phi, nely+1, nelx+1);
phie = 0.25*(phin(1:end-1,1:end-1) + phin(2:end,1:end-1) + phin(1:end-1,2:end) +
phin(2:end,2:end));
str(:, :) = (phie(:, :) > 0);

GifFrame(iterNum)
end
end
%GIF Aufnahme, vollkommen optional
function GifFrame(iterNum)
    filename = fullfile(getenv('HOME'), 'Desktop', 'LevelSet.gif');
    frame = getframe(gcf);
    im = frame2im(frame);
    [imind, cm] = rgb2ind(im, 256);

    if iterNum == 1
        imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'Loopcount', inf, 'DelayTime', 0);
    else
        imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'WriteMode', 'append', 'DelayTime', 0);
    end
end

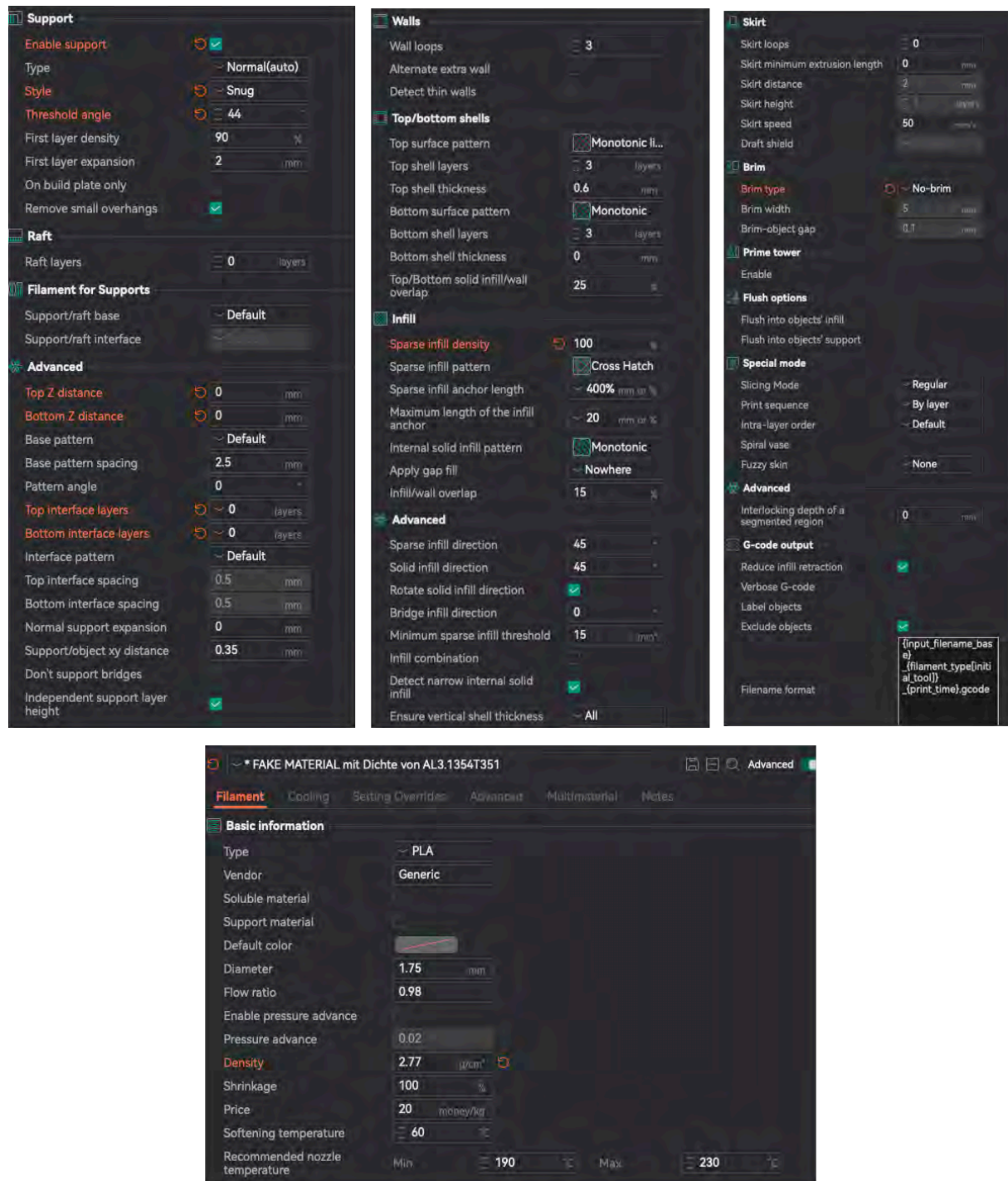
```

Anhang 3: Code Level Set



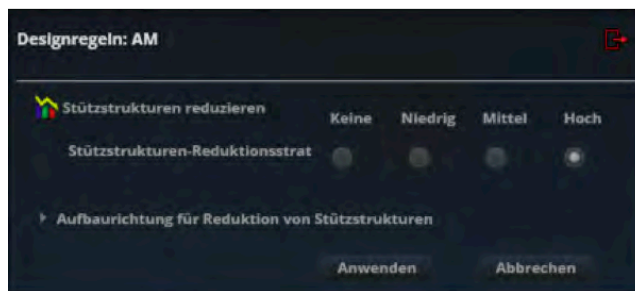
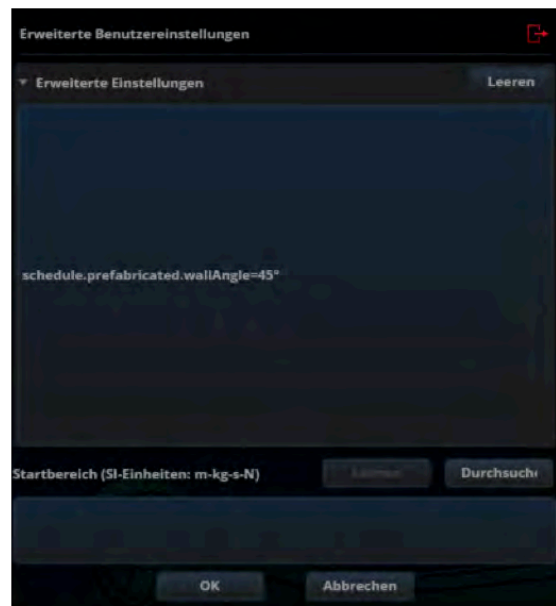
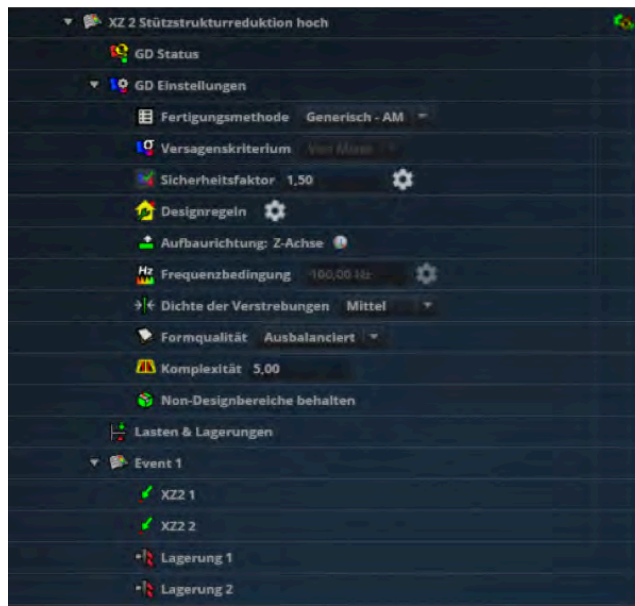
Anhang 4: Beispiel für die Messung des Überhangwinkels in Fusion

6 Überhangswinkelkontrolle in Inspire, Apex und Fusion

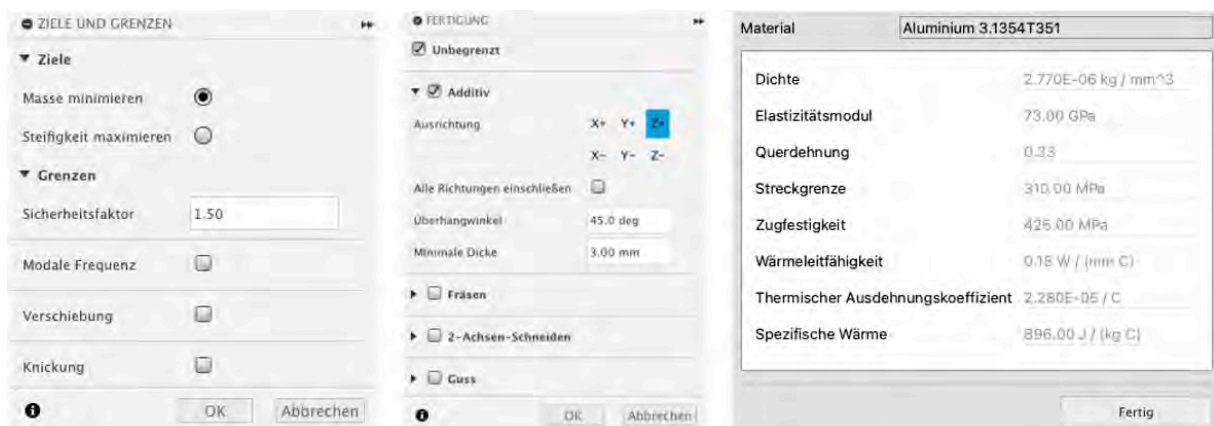


Anhang 5: Einstellungen für OrcaSlicer, in orange angepasste Einstellungen





Anhang 7: Optimierungs- und Materialeinstellungen in Apex



Anhang 8: Optimierungs- und Materialeinstellungen in Fusion

Studienbericht

Analysierte Datei	händische Optimierung v16
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-04, 21:51:58
Autor	jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Studie 1 - Statische Spannung

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-04, 12:31:52

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper1	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm^3
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	4495	2300

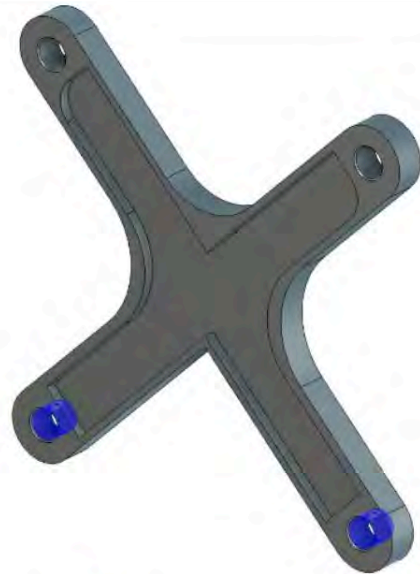
Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte

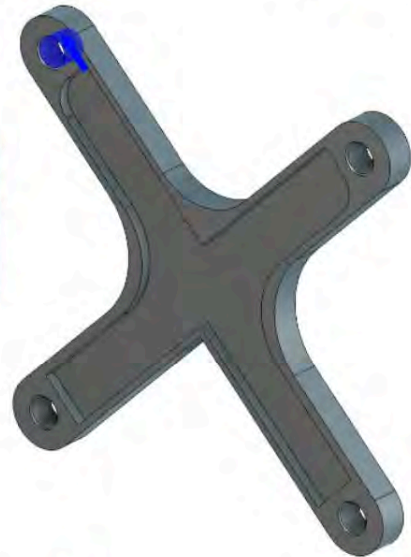


Lasten

Kraft1

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	-49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

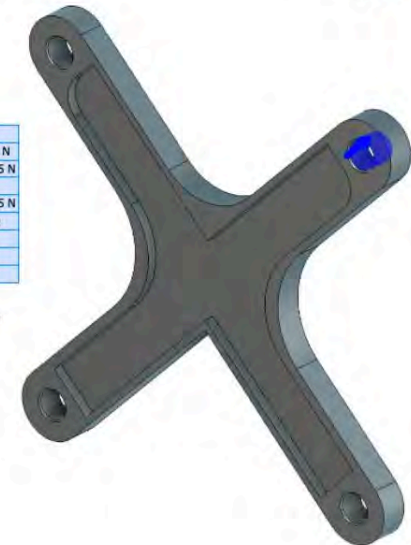
Ausgewählte Objekte



Kraft2

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	-45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

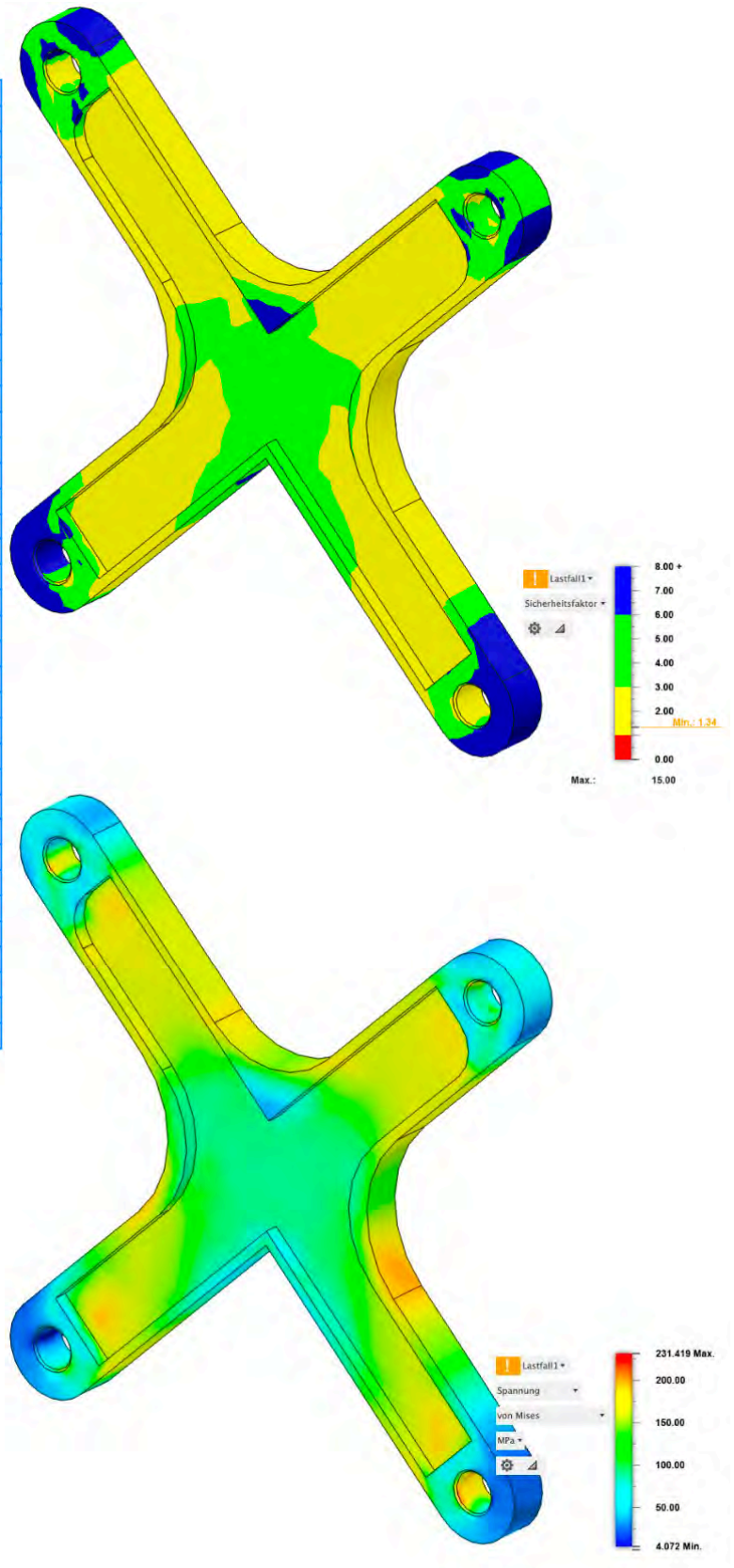
Ausgewählte Objekte



Ergebnisse

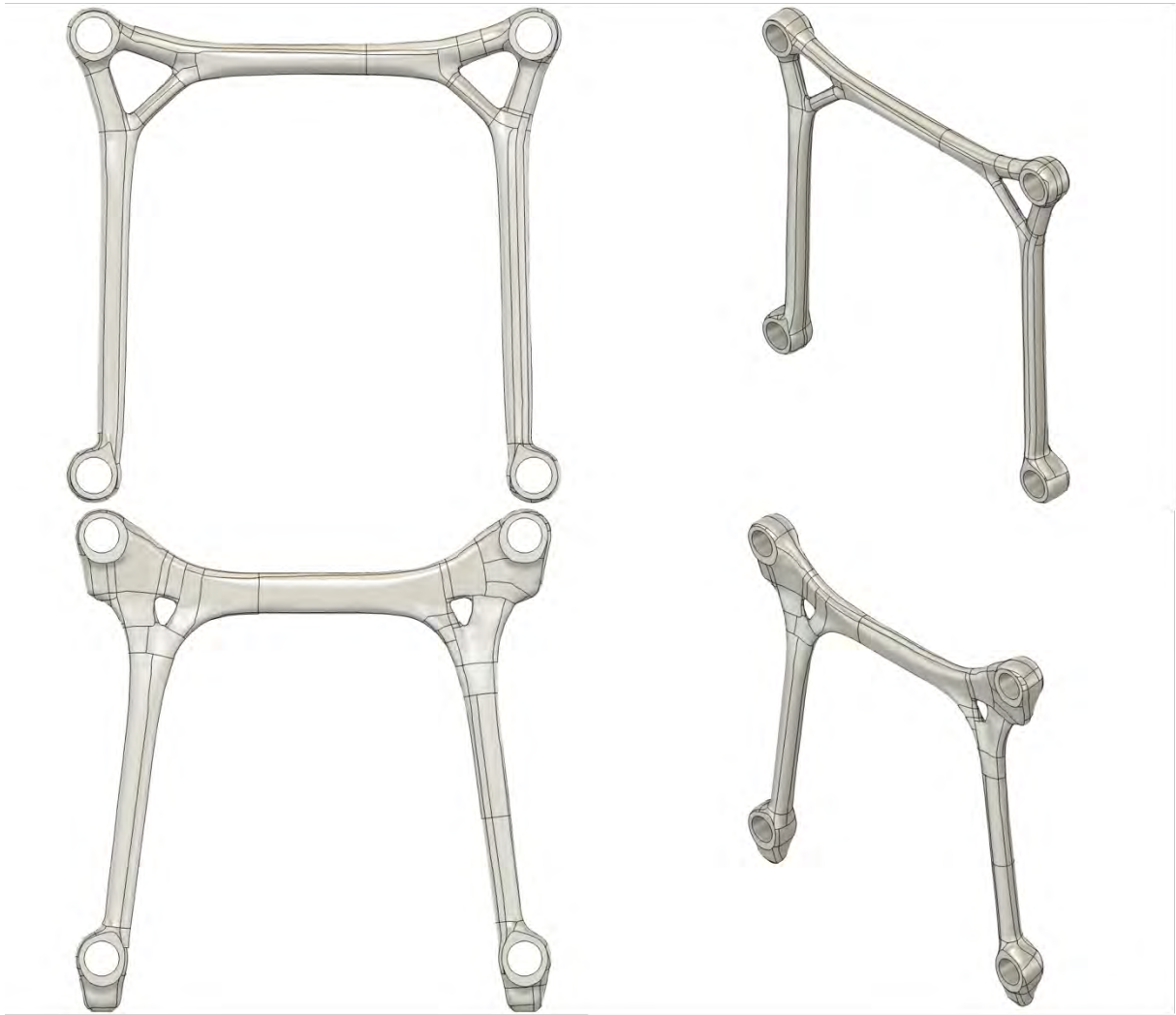
Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.34	15.00
Spannung		
von Mises	4.072 MPa	231.419 MPa
1. Hauptspannung	-30.028 MPa	223.527 MPa
3. Hauptspannung	-109.825 MPa	42.831 MPa
Lotrechte Spannung XX	-91.056 MPa	169.134 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-53.85 MPa	69.872 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-105.587 MPa	178.759 MPa
Scherdehnung XY	-40.57 MPa	46.671 MPa
Scherdehnung YZ	-42.33 MPa	40.137 MPa
Scherdehnung ZX	-109.105 MPa	108.186 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.603 mm
X	-0.273 mm	0.263 mm
Y	-0.01 mm	0.016 mm
Z	-0.004 mm	0.544 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	2561.304 N
X	-2052.035 N	1830.942 N
Y	-711.412 N	745.933 N
Z	-2439.457 N	212.181 N
Dehnung		
Äquivalent	6.543E-05	0.005
1. Hauptspannung	2.132E-05	0.005
3. Hauptspannung	-0.004	-5.779E-05
Lotrechte Spannung XX	-0.001	0.002
Lotrechte Dehnung YY	-0.001	6.570E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-0.002	0.002
Scherdehnung XY	-0.001	0.002
Scherdehnung YZ	-0.002	0.001
Scherdehnung ZX	-0.004	0.004
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N





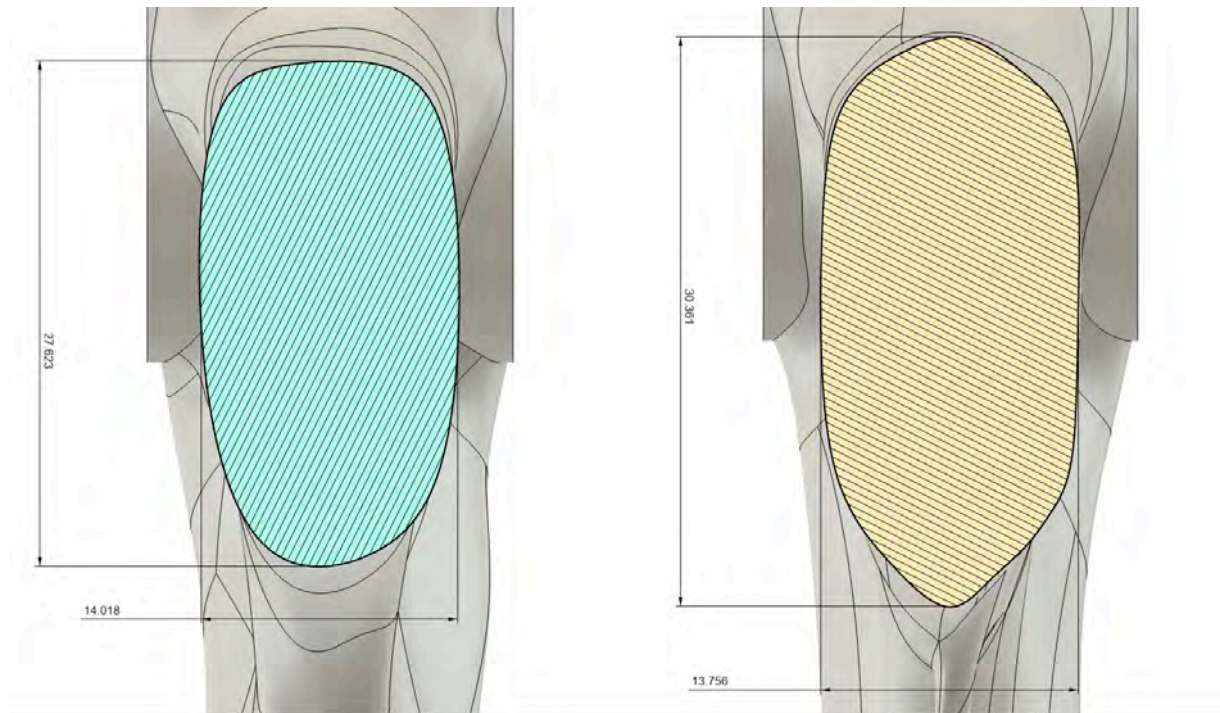
Anhang 11: Inspire: Oben uneingeschränkt, unten 45° Überhangswinkelrestriktion



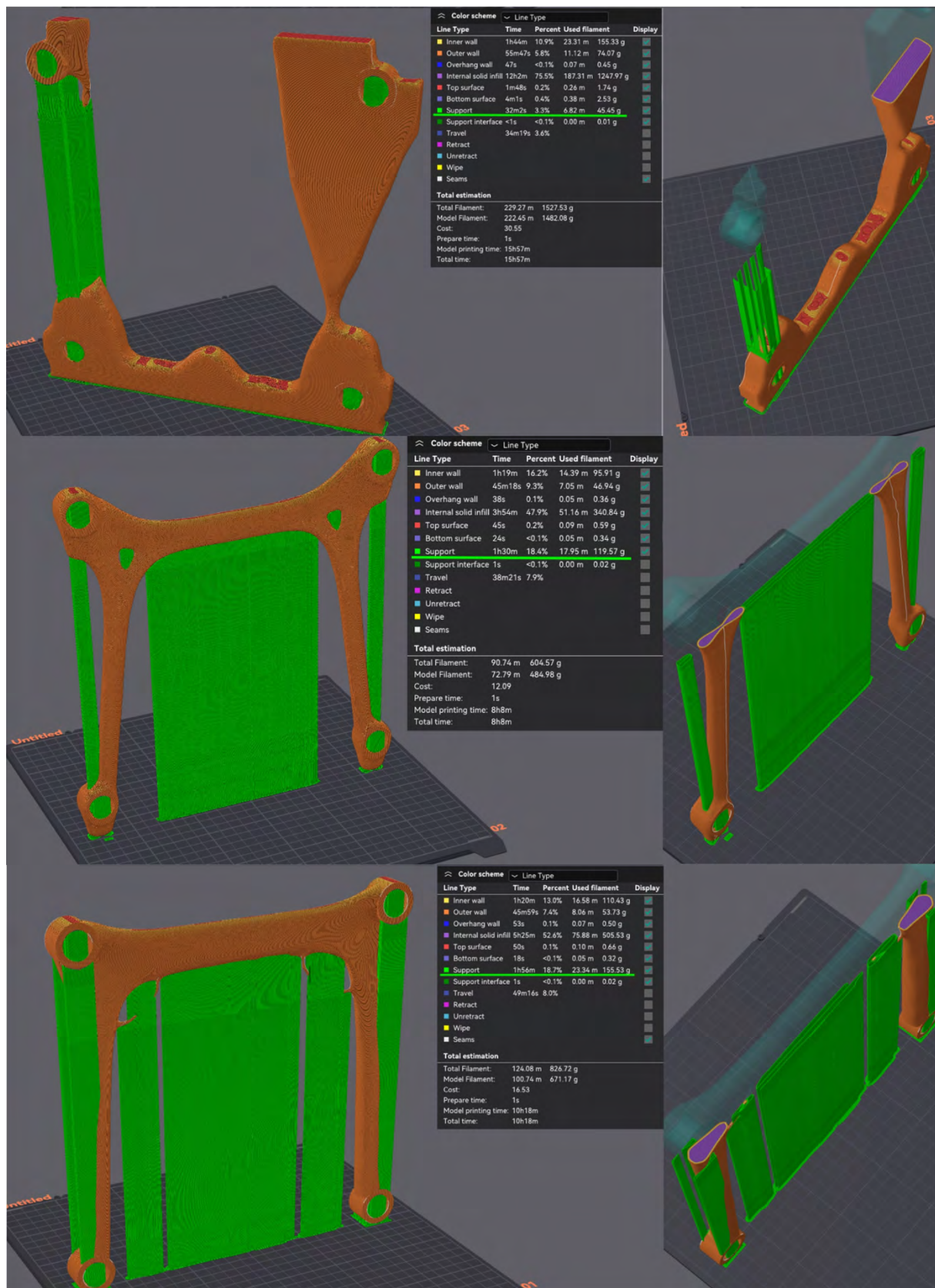
Anhang 12: Apex: Oben uneingeschränkt, unten 45° Überhangwinkelrestriktion und Supportreduktion auf hoch



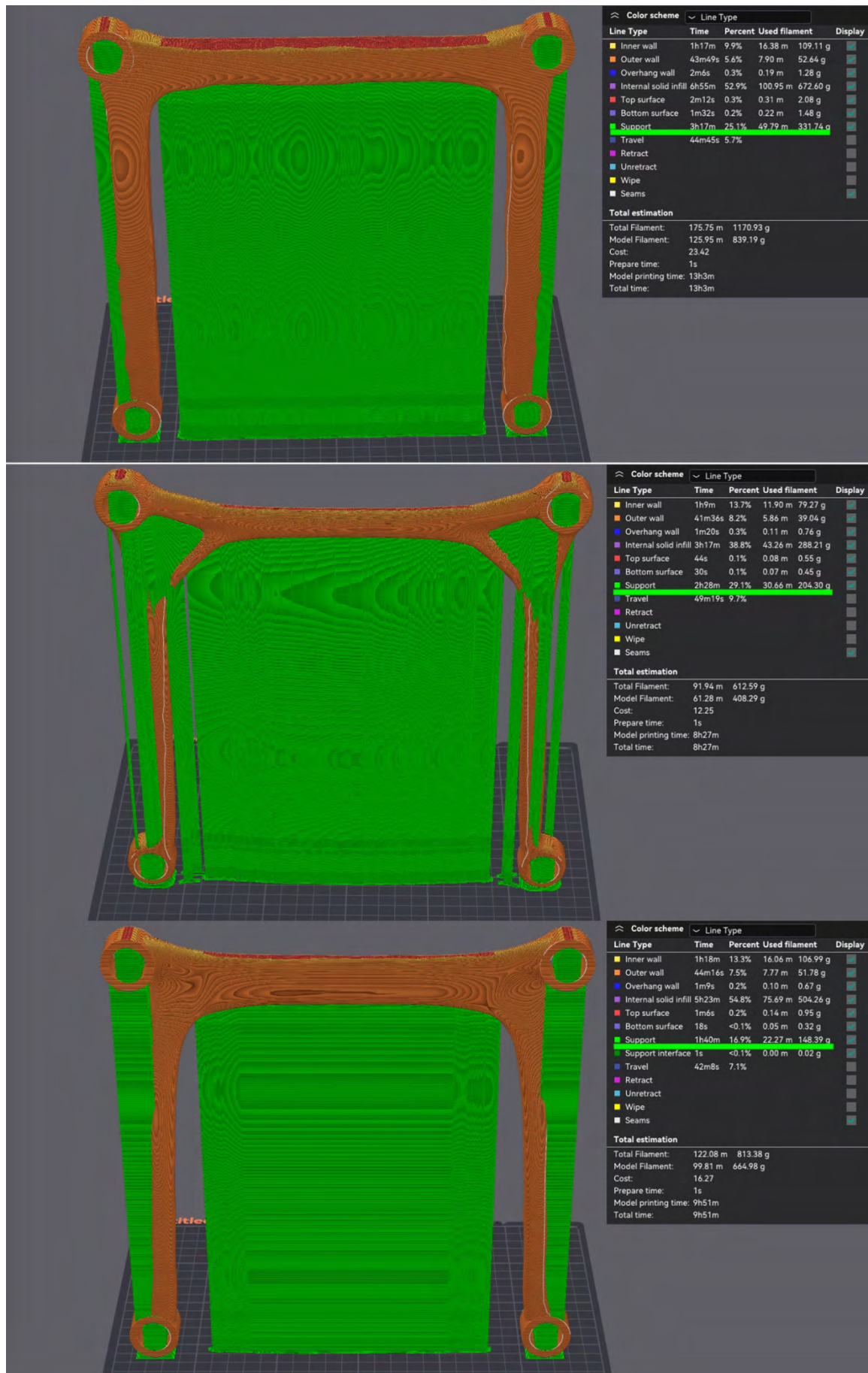
Anhang 13: Fusion: Oben uneingeschränkt, unten 45° Überhangswinkelrestriktion



Anhang 14: Fusion Querschnitte oberer Querbalken: Links uneingeschränkt, rechts 45°
Überhangswinkelvorgabe



Anhang 15: Vergleich Supportstrukturen, von oben nach unten: Inspire, Apex, Fusion



Anhang 16: Supportstrukturen der uneingeschränkten Geometrien, von oben nach unten: Inspire, Apex, Fusion

Studienbericht

Analysierte Datei	XZ 2 stützstrukturreduziert v5
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-04, 21:51:13
Autor	jonasschlag

Berichteigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Studie 1 - Statische Spannung

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-04, 12:36:51

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper1	Aluminium 3.1354T351	Zugfestigkeit

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	16978	9121

Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte



Lasten

Kraft1

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	-49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

Ausgewählte Objekte



Kraft2

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	-45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

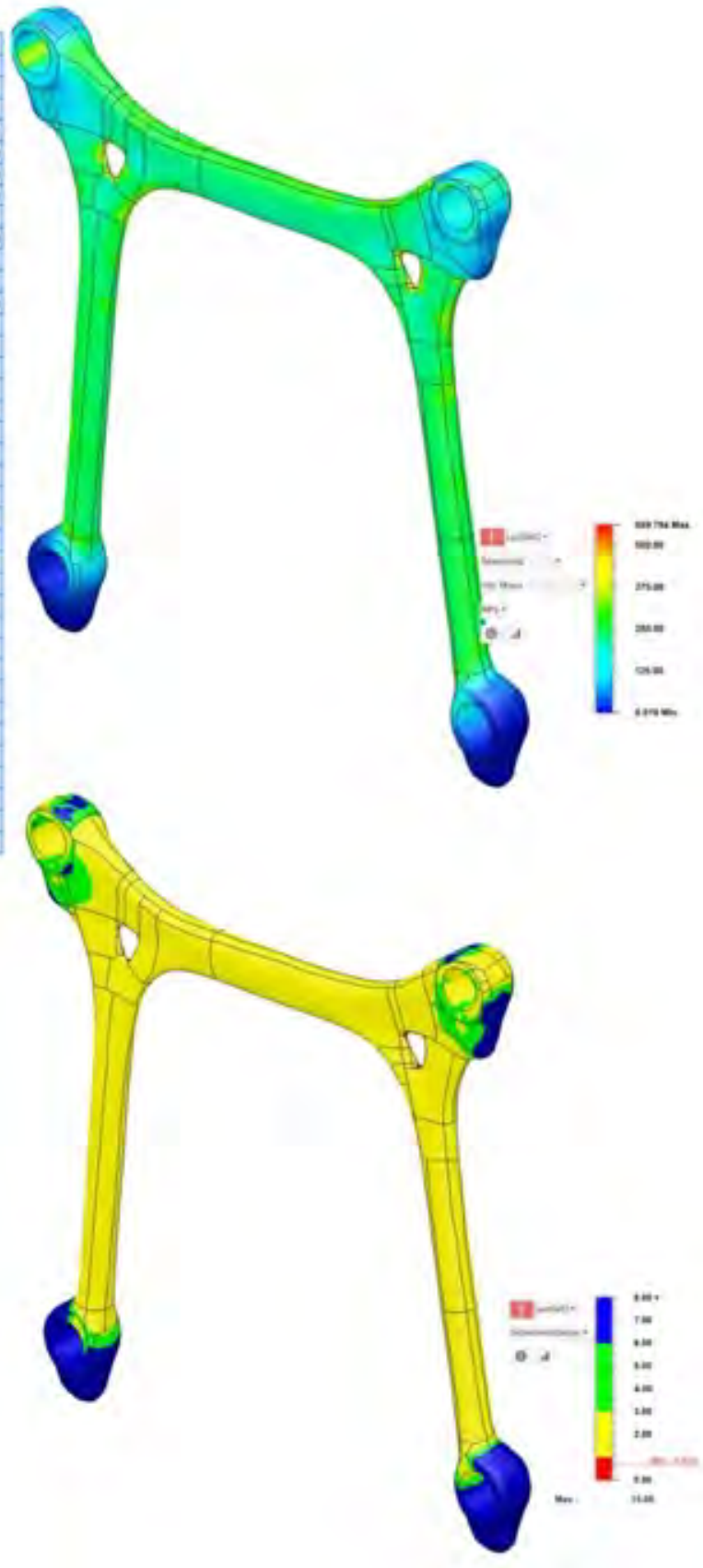
Ausgewählte Objekte



Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	0.634	15.00
Spannung		
von Mises	0.019 MPa	559.794 MPa
1. Hauptspannung	-66.993 MPa	669.875 MPa
3. Hauptspannung	-180.599 MPa	110.648 MPa
Lotrechte Spannung XX	-137.708 MPa	639.073 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-85.695 MPa	121.20 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-126.402 MPa	515.649 MPa
Scherdehnung XY	-56.795 MPa	78.519 MPa
Scherdehnung YZ	-73.066 MPa	65.918 MPa
Scherdehnung ZX	-246.072 MPa	266.989 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.975 mm
X	-0.494 mm	0.574 mm
Y	-0.027 mm	0.078 mm
Z	-6.477E-04 mm	0.844 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	5760.968 N
X	-448.128 N	343.469 N
Y	-931.558 N	929.291 N
Z	-5715.036 N	559.542 N
Dehnung		
Äquivalent	2.408E-07	0.012
1. Hauptspannung	1.673E-07	0.012
3. Hauptspannung	-0.008	-2.322E-07
Lotrechte Spannung XX	-0.002	0.008
Lotrechte Dehnung YY	-0.002	7.542E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-0.002	0.007
Scherdehnung XY	-0.002	0.003
Scherdehnung YZ	-0.003	0.002
Scherdehnung ZX	-0.009	0.01
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N



Studienbericht

Analysierte Datei	X/Z 2 Z+ v5
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-06, 10:58:27
Autor	jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Kräfte X/Y angepasst (2)

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-06, 10:40:27

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper12	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm^3
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	64533	39817

Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte



Kraft1

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	-45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

Ausgewählte Objekte



Kraft2

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	-49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

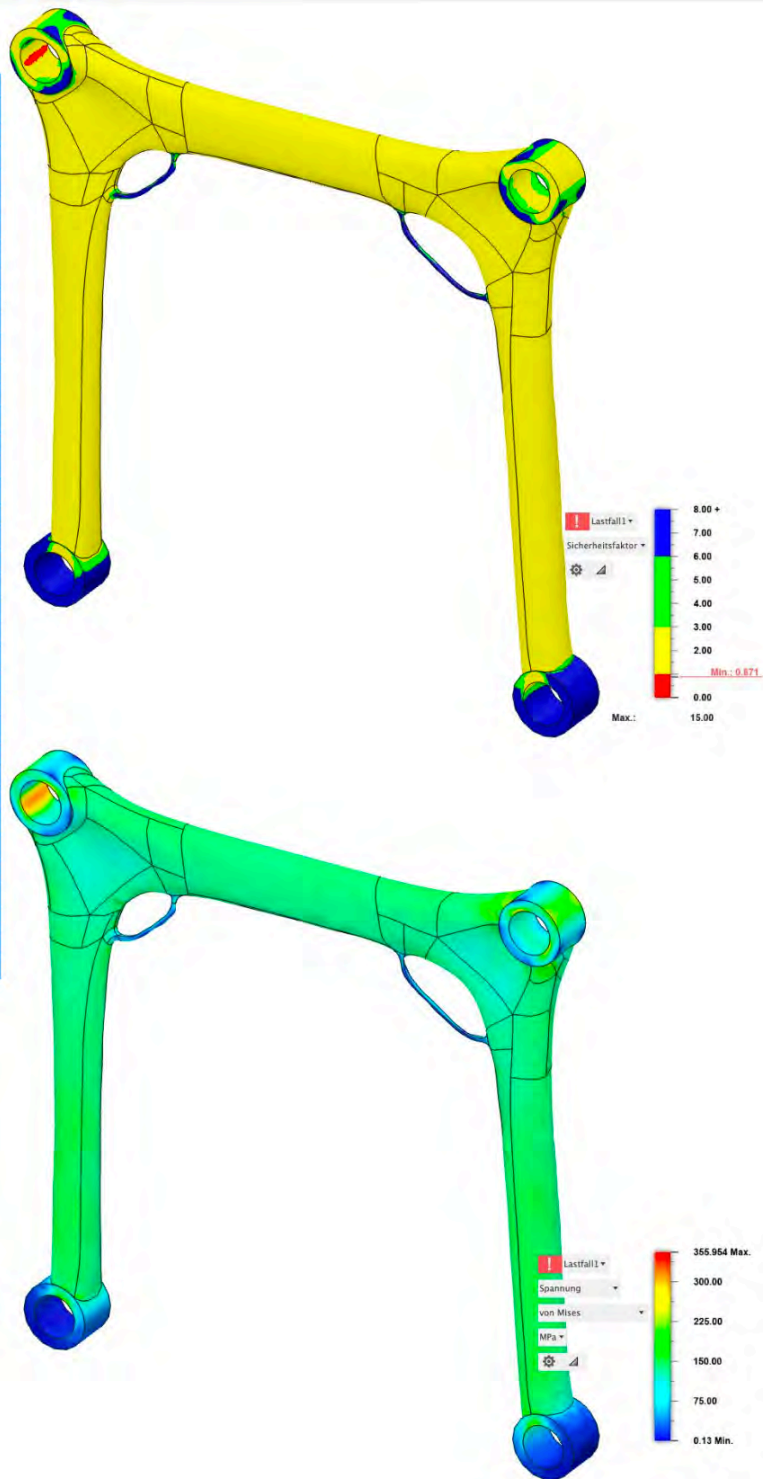
Ausgewählte Objekte



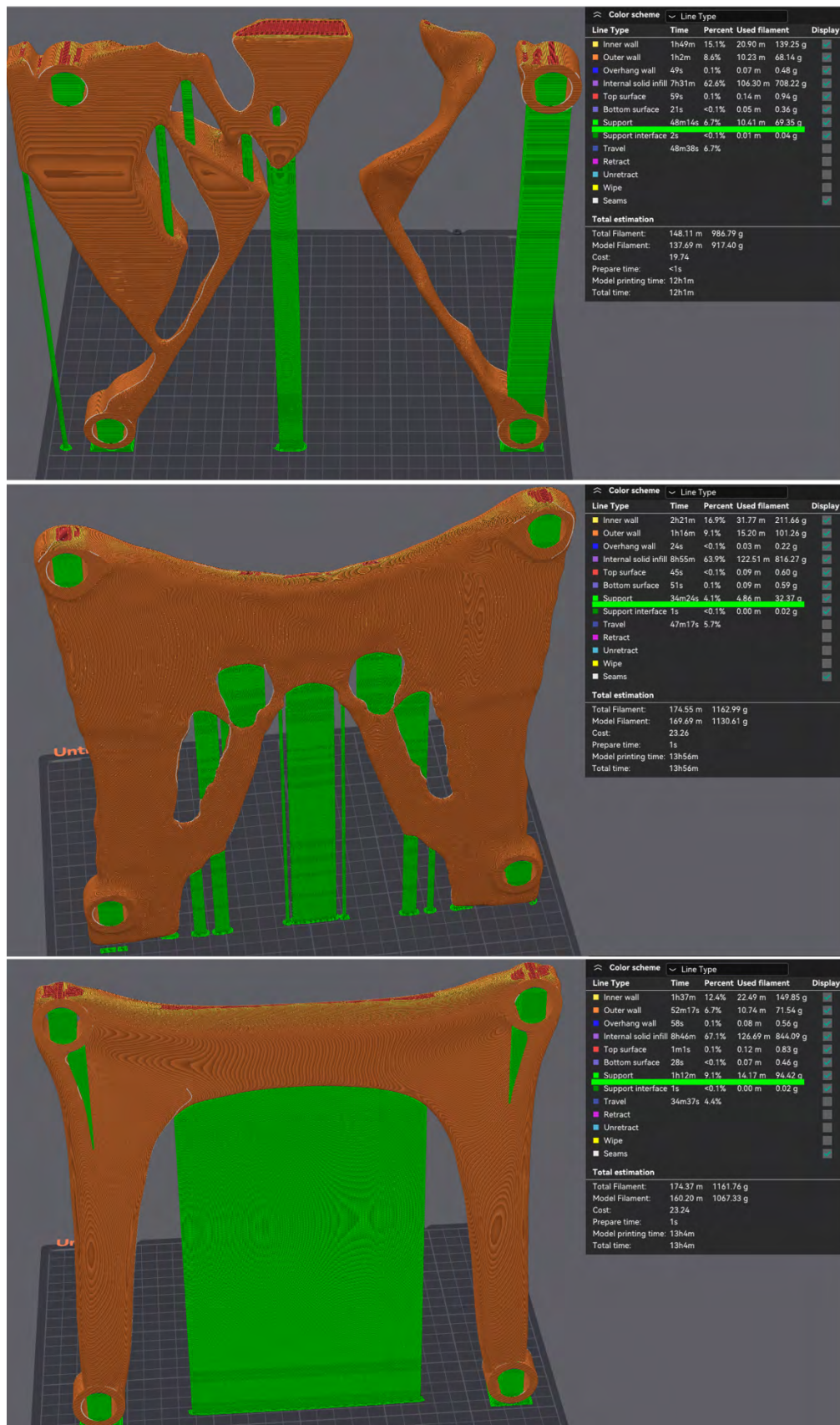
Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

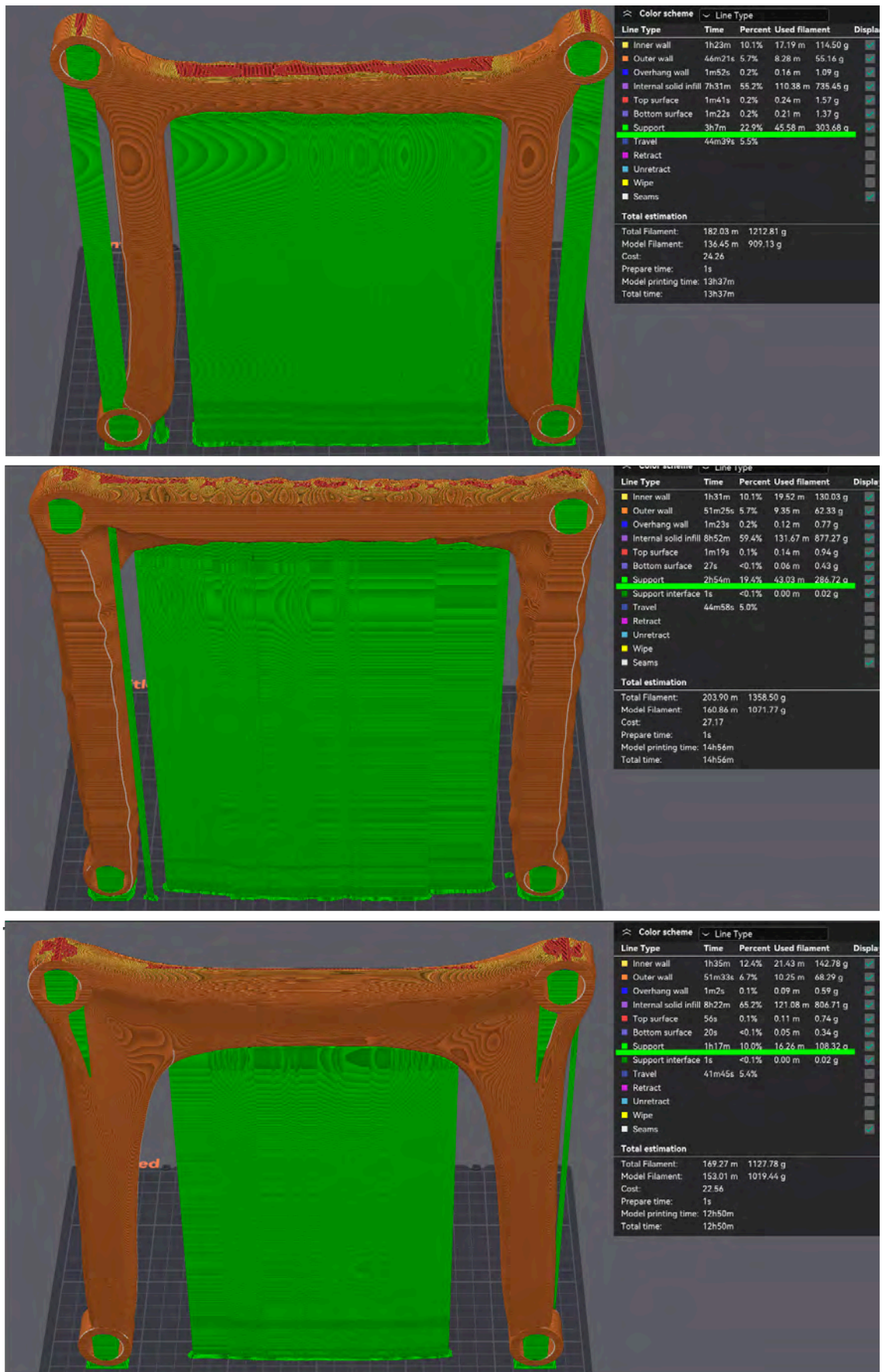
Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	0.871	15.00
Spannung		
von Mises	0.13 MPa	355.954 MPa
1. Hauptspannung	-65.163 MPa	361.146 MPa
3. Hauptspannung	-218.888 MPa	68.882 MPa
Lotrechte Spannung XX	-133.874 MPa	333.659 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-102.137 MPa	120.276 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-218.143 MPa	318.962 MPa
Scherdehnung XY	-71.556 MPa	63.492 MPa
Scherdehnung YZ	-66.34 MPa	86.902 MPa
Scherdehnung ZX	-135.702 MPa	139.255 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.714 mm
X	-0.275 mm	0.292 mm
Y	-0.006 mm	0.404 mm
Z	-1.222E-05 mm	0.548 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	3099.822 N
X	-439.721 N	338.439 N
Y	-395.217 N	521.609 N
Z	-3064.858 N	208.521 N
Dehnung		
Äquivalent	2.710E-06	0.007
1. Hauptspannung	-1.653E-04	0.007
3. Hauptspannung	-0.004	-2.864E-06
Lotrechte Spannung XX	-0.002	0.004
Lotrechte Dehnung YY	-0.002	0.001
Lotrechte Spannung ZZ	-0.003	0.004
Scherdehnung XY	-0.003	0.002
Scherdehnung YZ	-0.002	0.003
Scherdehnung ZX	-0.005	0.005
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N



6.2 TestszENARIO 2



Anhang 21: Supportstrukturen für die mit Überhangswinkelrestriktion optimierten Geometrien. Von oben nach unten: Inspire, Apex, Fusion.



Anhang 22: Supportstrukturen für die ohne Überhangswinkelrestriktion optimierten Geometrien. Von oben nach unten: Inspire, Apex, Fusion.

Studienbericht

Analysierte Datei	Lastfall 3 v5
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-06, 10:51:54
Autor	jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Studie 1 - Statische Spannung

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-05, 20:59:03

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Komponente1:1	Aluminium 3.1354T351	Zugfestigkeit

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm^3
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	42681	22747

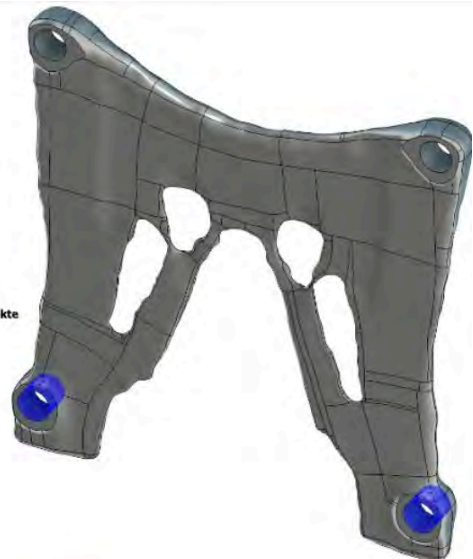
Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte

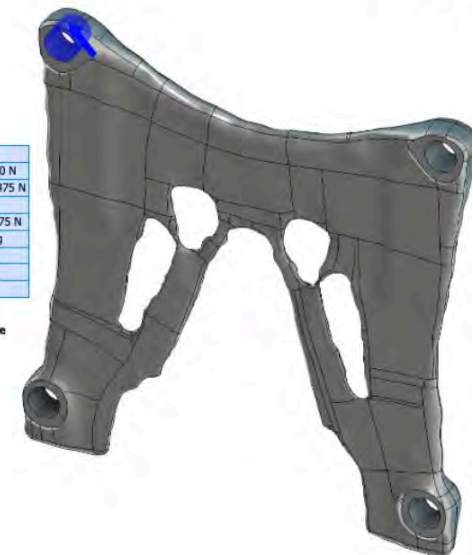


Lasten

Kraft1

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	-49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

Ausgewählte Objekte



Kraft2

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	-45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

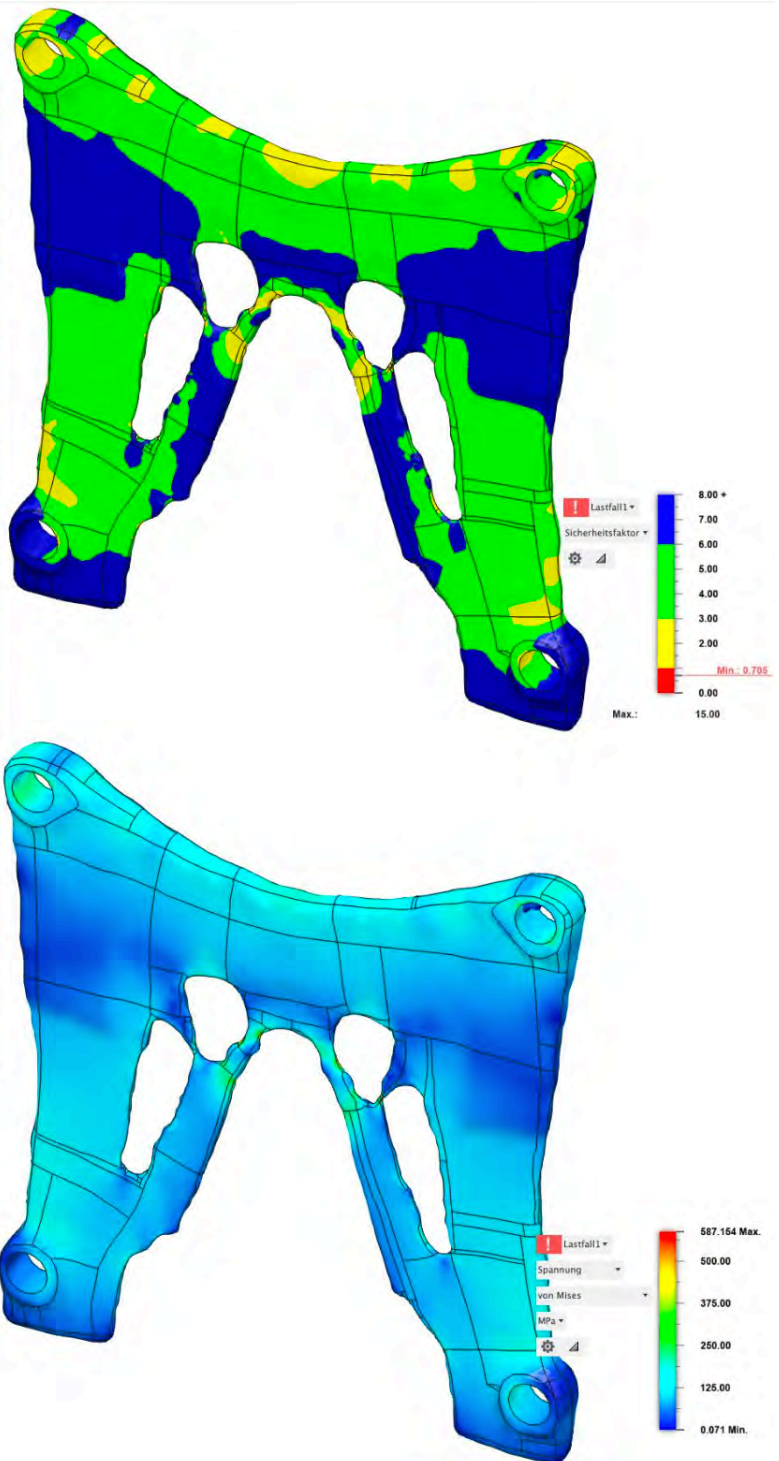
Ausgewählte Objekte



Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	0.705	15.00
Spannung		
von Mises	0.071 MPa	587.154 MPa
1. Hauptspannung	-47.779 MPa	603.098 MPa
3. Hauptspannung	-188.673 MPa	54.642 MPa
Lotrechte Spannung XX	-163.512 MPa	302.925 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-53.433 MPa	60.761 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-170.808 MPa	527.734 MPa
Scherdehnung XY	-36.245 MPa	47.985 MPa
Scherdehnung YZ	-40.387 MPa	95.046 MPa
Scherdehnung ZX	-198.387 MPa	269.676 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.647 mm
X	-0.276 mm	0.293 mm
Y	-0.471 mm	0.343 mm
Z	-0.007 mm	0.391 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	5430.118 N
X	-1247.891 N	690.209 N
Y	-672.878 N	566.206 N
Z	-5417.432 N	450.658 N
Dehnung		
Äquivalent	1.469E-06	0.012
1. Hauptspannung	1.008E-06	0.013
3. Hauptspannung	-0.007	-1.209E-06
Lotrechte Spannung XX	-0.002	0.004
Lotrechte Dehnung YY	-0.002	6.797E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-0.002	0.007
Scherdehnung XY	-0.001	0.002
Scherdehnung YZ	-0.001	0.003
Scherdehnung ZX	-0.007	0.01
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N



Studienbericht

Analysierte Datei	XZ 2 1kg v5
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-06, 10:42:48
Autor	jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Kräfte X/Z 2 1,1kg

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-05, 20:57:00

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Komponente1:1	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm^3
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	22168	12517

Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte



Lasten

Kraft1

Typ	Kraft
X-Wert	49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

Ausgewählte Objekte



Kraft2

Typ	Kraft
Größe	70000.00 N
X-Wert	-49497.475 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	49497.475 N
X-Winkel	45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

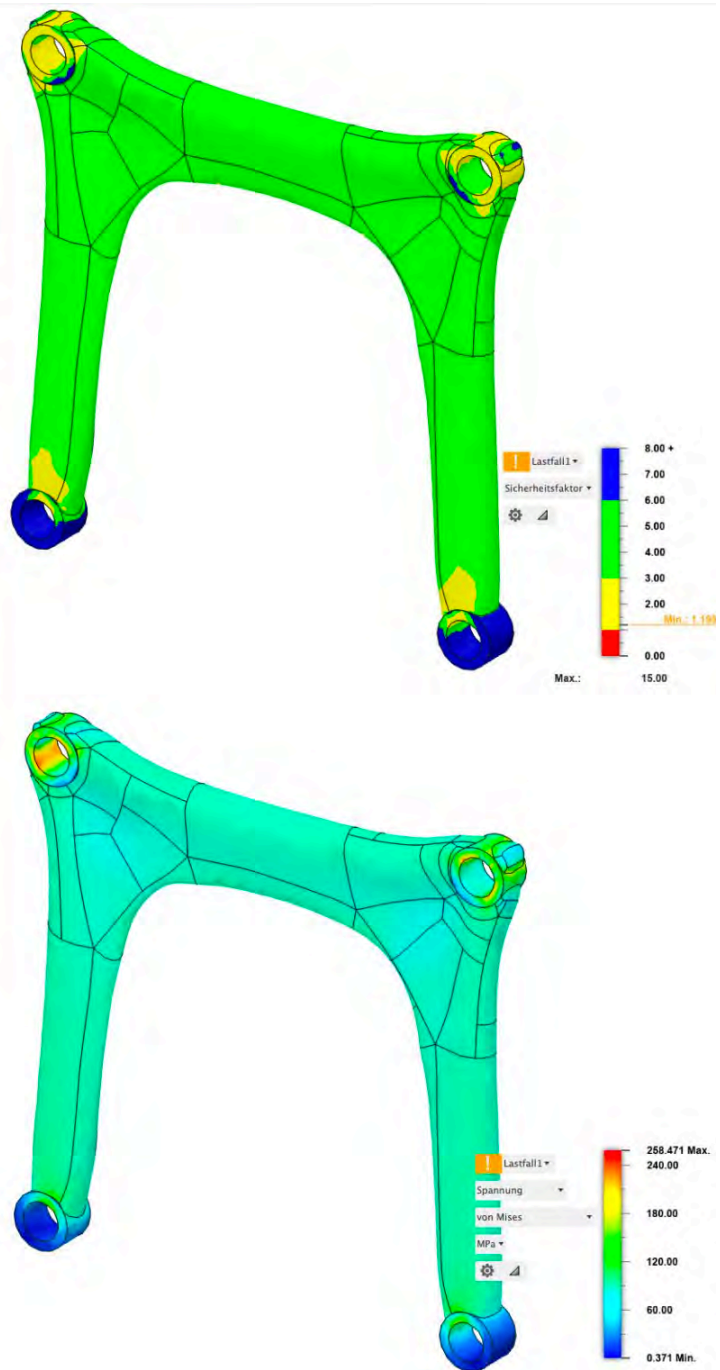
Ausgewählte Objekte



Ergebnisse

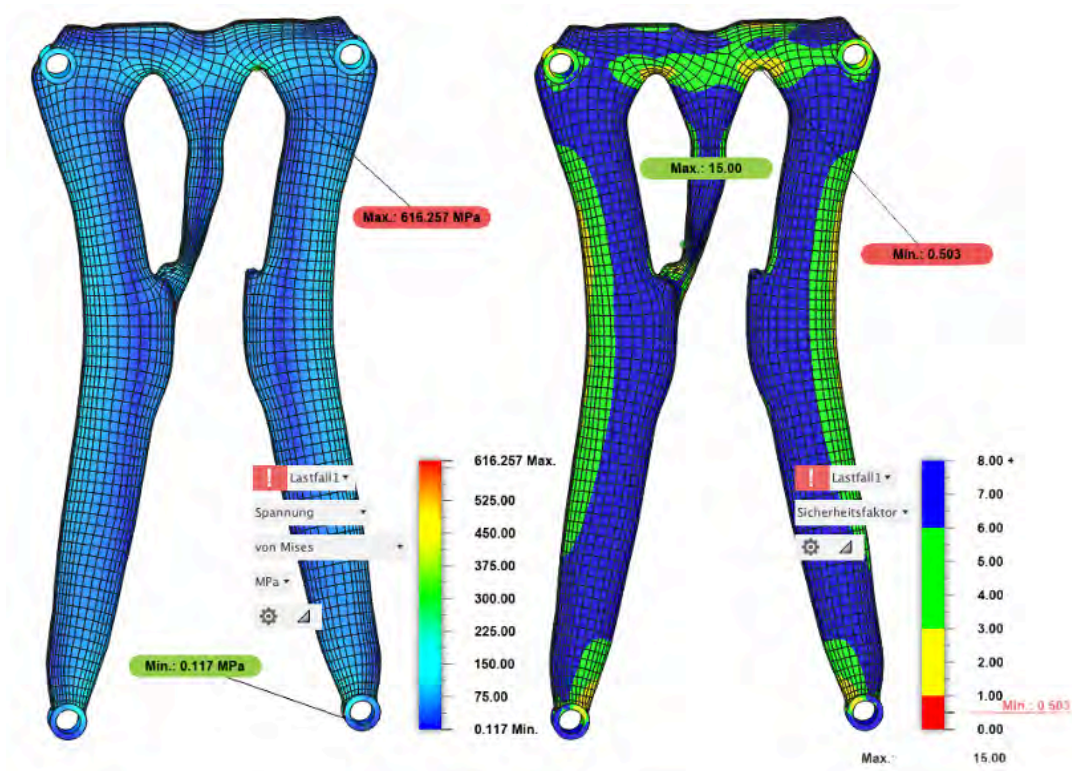
Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.199	15.00
Spannung		
von Mises	0.371 MPa	258.472 MPa
1. Hauptspannung	-2.376 MPa	253.008 MPa
3. Hauptspannung	-115.694 MPa	52.848 MPa
Lotrechte Spannung XX	-69.271 MPa	226.072 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-42.06 MPa	83.098 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-56.073 MPa	217.121 MPa
Scherdehnung XY	-39.295 MPa	34.301 MPa
Scherdehnung YZ	-69.053 MPa	64.64 MPa
Scherdehnung ZX	-104.32 MPa	107.34 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.451 mm
X	-0.179 mm	0.177 mm
Y	-0.004 mm	0.27 mm
Z	-8.749E-06 mm	0.326 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	3096.281 N
X	-422.113 N	306.636 N
Y	-448.238 N	476.202 N
Z	-3079.948 N	172.971 N
Dehnung		
Äquivalent	6.325E-06	0.005
1. Hauptspannung	4.085E-06	0.005
3. Hauptspannung	-0.004	-5.514E-06
Lotrechte Spannung XX	-0.002	0.003
Lotrechte Dehnung YY	-9.843E-04	3.824E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-0.001	0.003
Scherdehnung XY	-0.001	0.001
Scherdehnung YZ	-0.003	0.002
Scherdehnung ZX	-0.004	0.004
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N

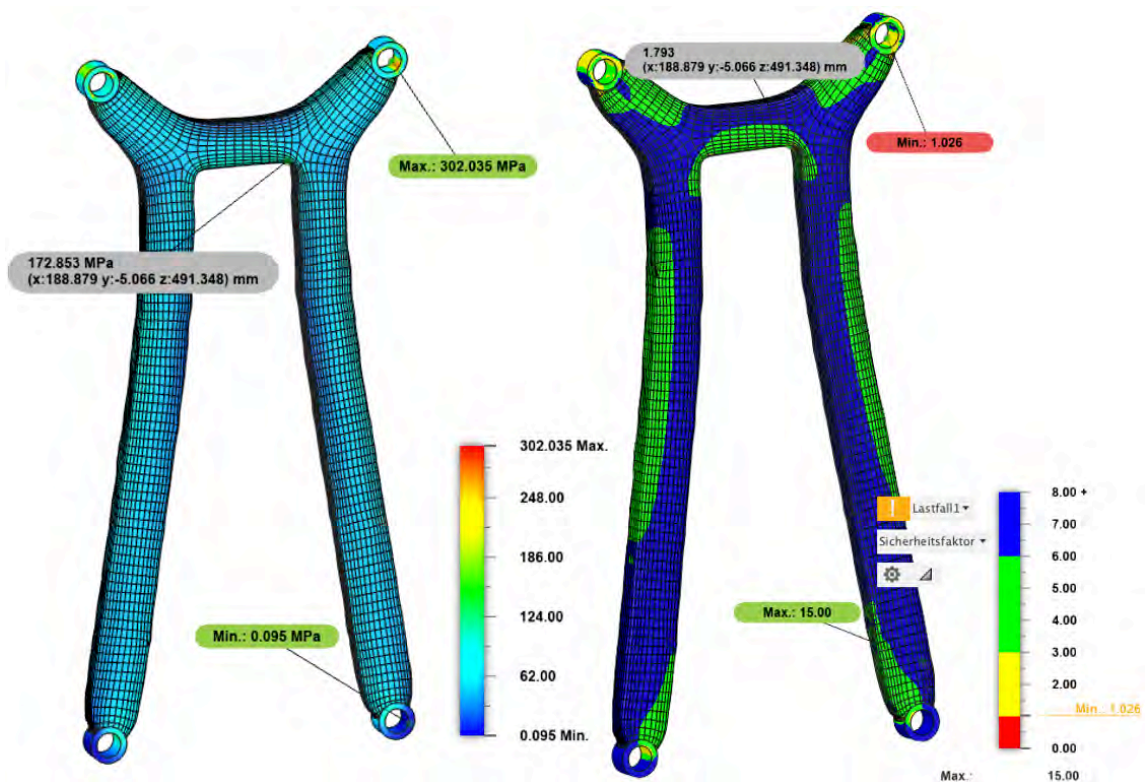


Anhang 26: Bericht zur FE-Analyse der in Fusion optimierten Geometrie, Seite 2

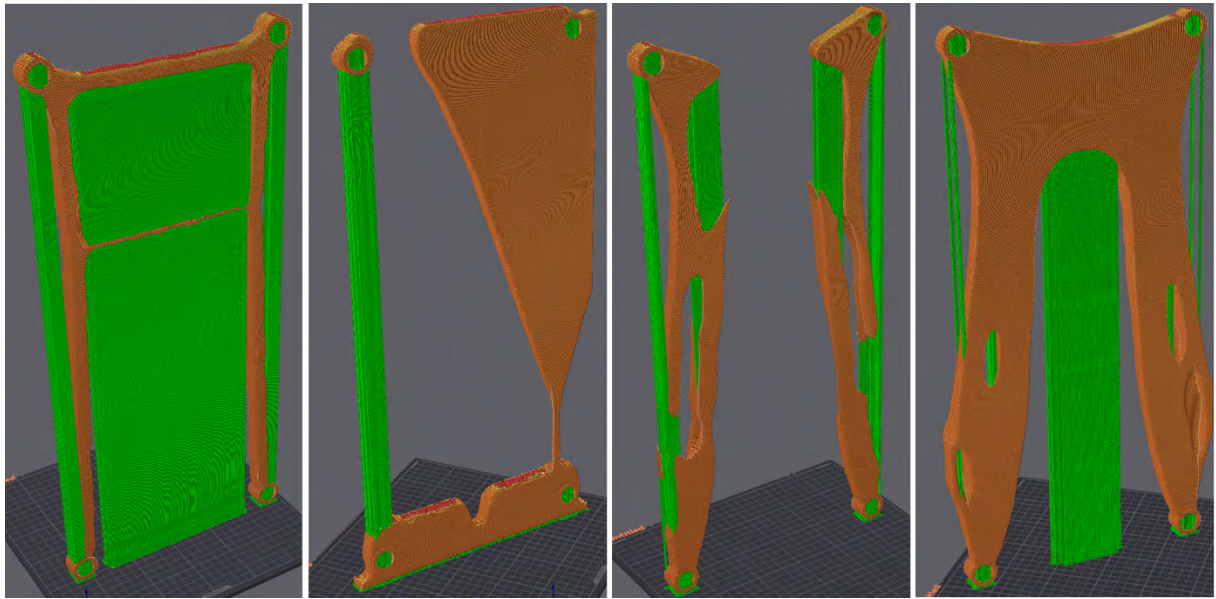
6.3 Testszenario 3



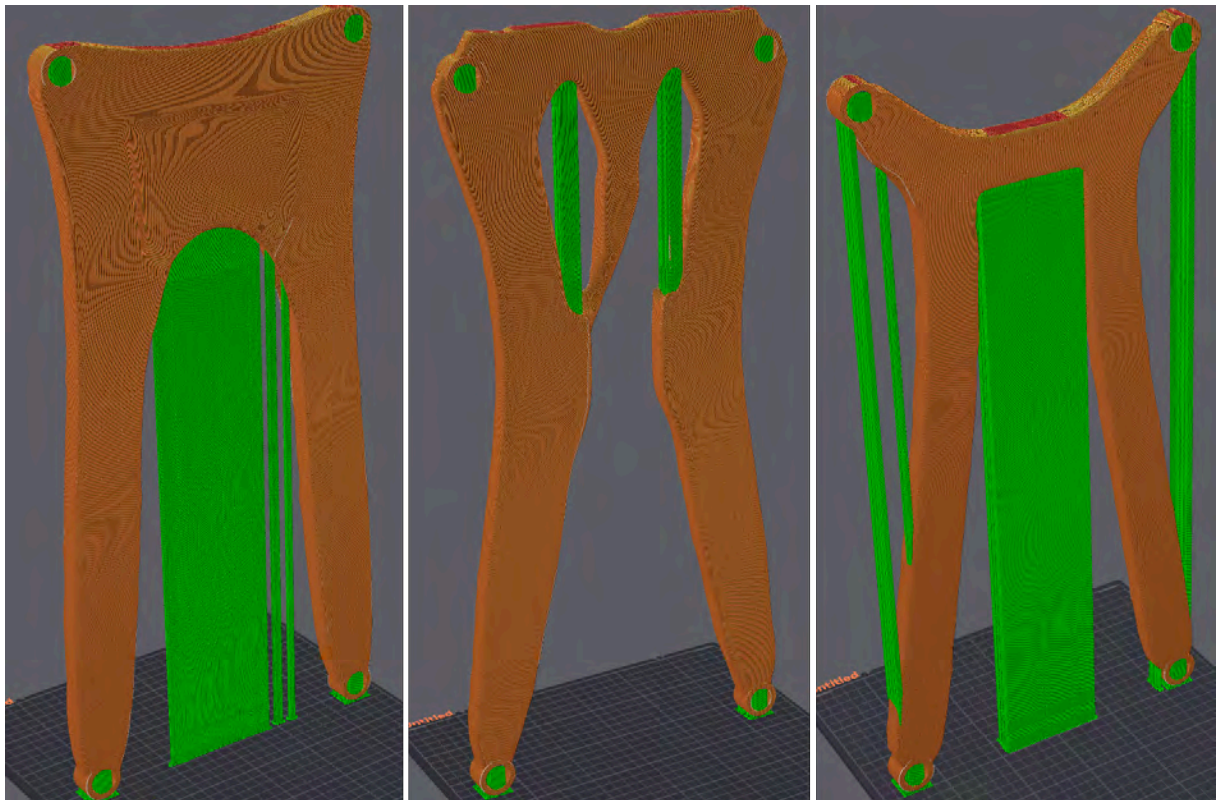
Anhang 27: Durchlauf 6 Inspire, Auszug aus der FE-Analyse. Links Vergleichsspannung, rechts minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt.



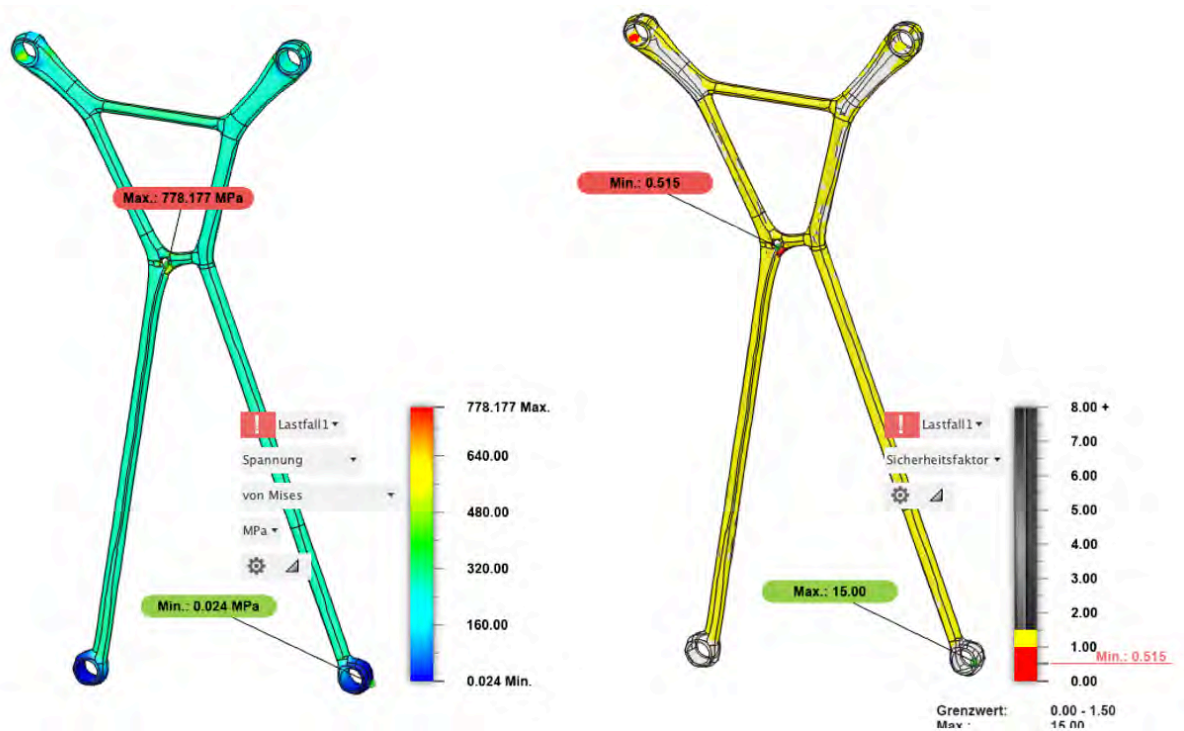
Anhang 28: Durchlauf 7 Inspire, Auszug aus der FE-Analyse. Links Vergleichsspannung, rechts Sicherheitsfaktor, in grau hinterlegt minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie



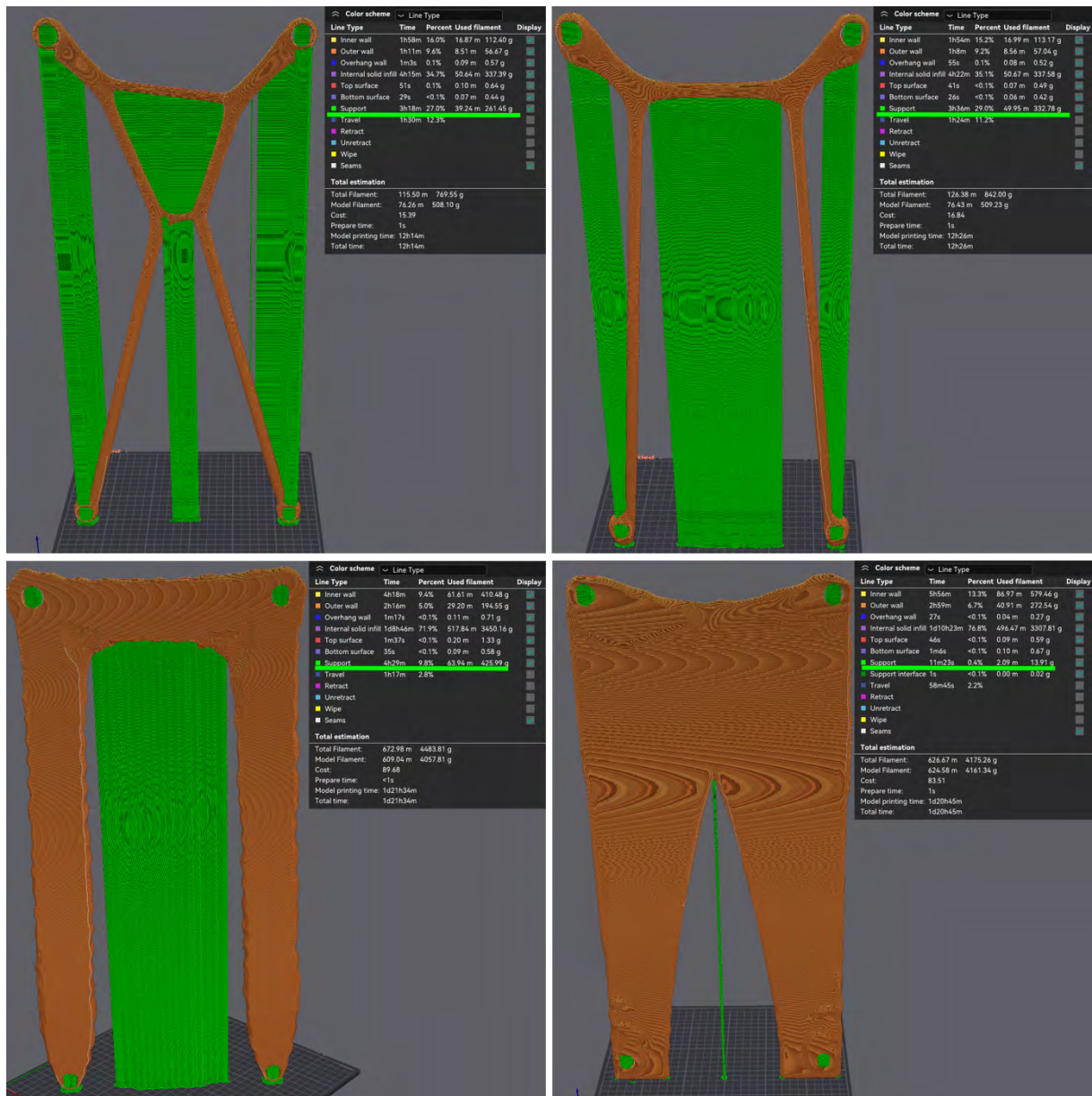
Anhang 29: Supportstrukturen Inspire, Durchlauf 1-4 von links nach rechts



Anhang 30: Supportstrukturen Inspire, Durchlauf 5-7 von links nach rechts



Anhang 31: FE-Analyse Durchlauf 2 Apex, von links nach rechts: Vergleichsspannung, Bereiche mit Sicherheitsfaktor < 1,5 in gelb oder rot dargestellt



Anhang 32: Supportstrukturen Apex, Optimierung 1-4, von oben links nach unten rechts

Studienbericht

Analysierte Datei	Lastfall 4 Steifigkeit 40% Stützstruktur reduziert v4
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-07, 20:27:26
Autor	jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Studie 1 - Statische Spannung

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-06, 16:56:03

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper1	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm^3
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	31861	17282

Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte



Lasten

Kraft1

Typ	Kraft
Größe	50000.00 N
X-Wert	-35355.339 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	35355.339 N
X-Winkel	45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

Kraft2

Typ	Kraft
Größe	50000.00 N
X-Wert	35355.339 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	35355.339 N
X-Winkel	-45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

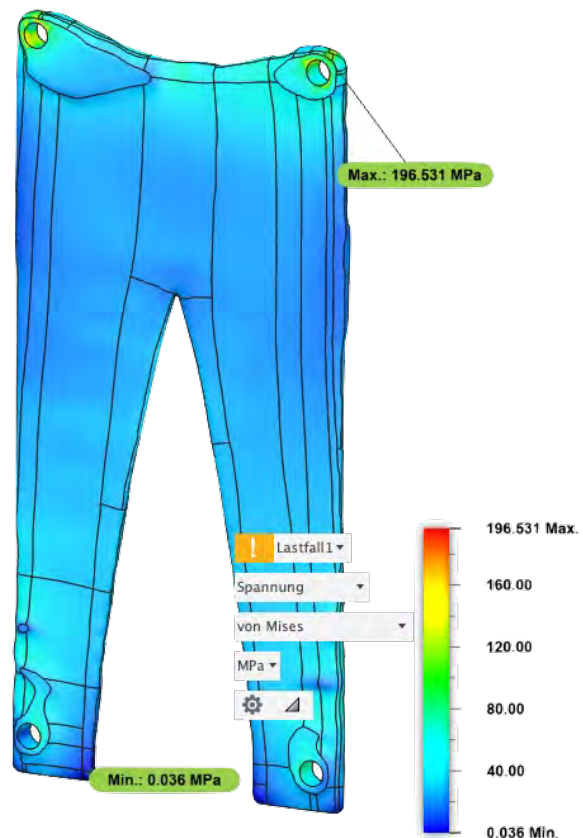
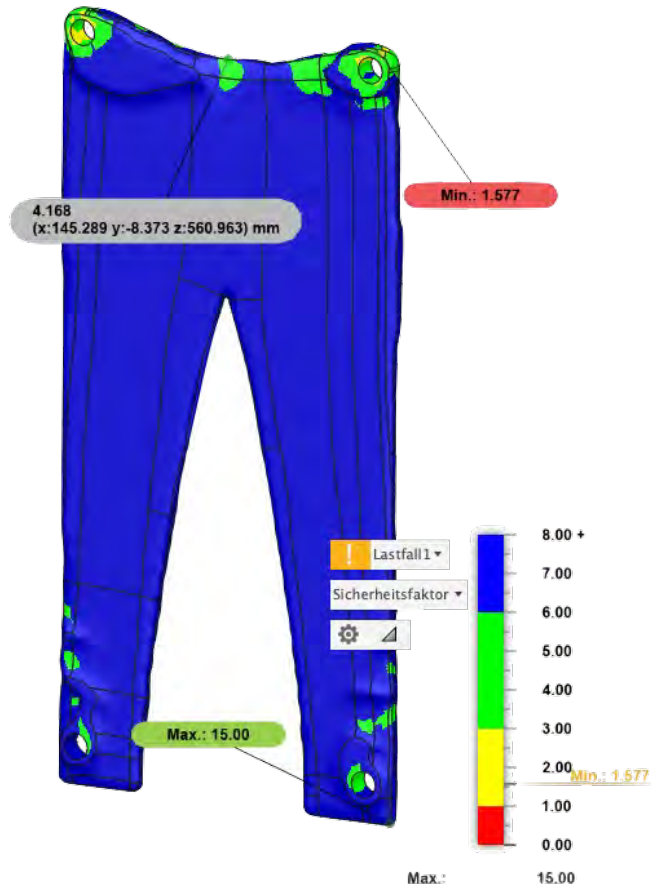
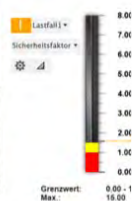
Ausgewählte Objekte

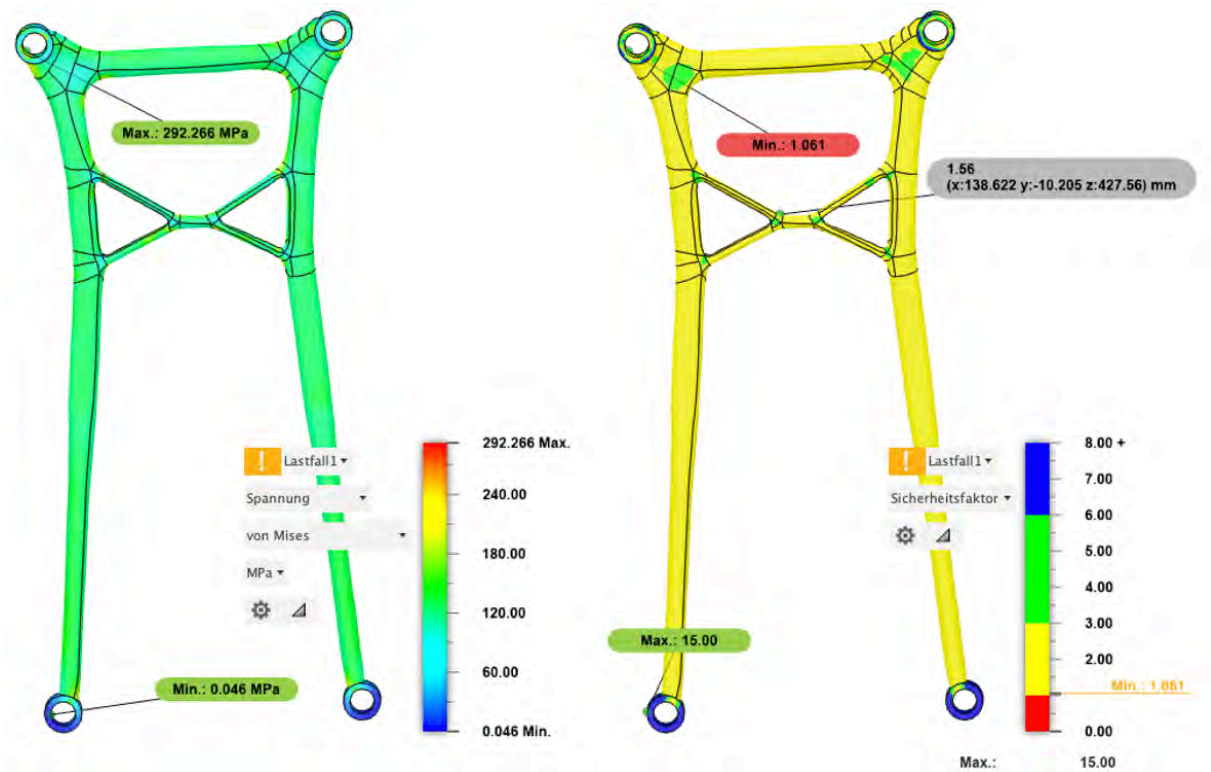


Ergebnisse

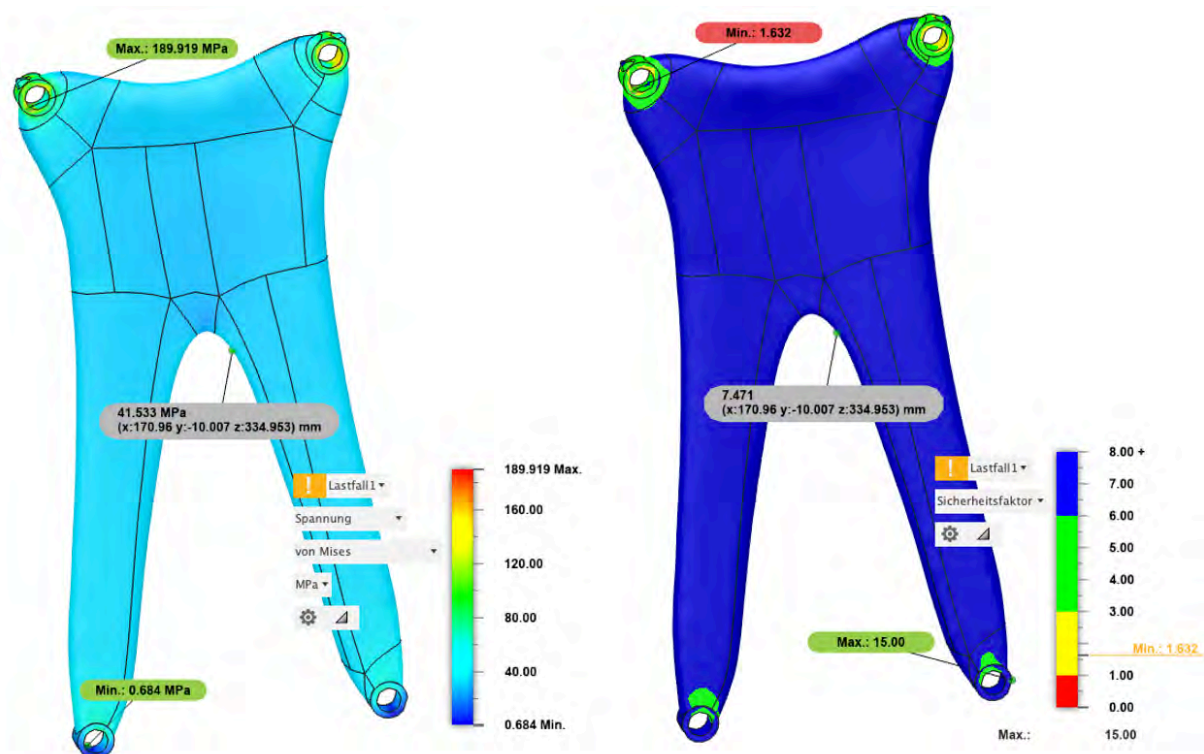
Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.577	15.00
Spannung		
von Mises	0.036 MPa	196.531 MPa
1. Hauptspannung	-0.112 MPa	195.383 MPa
3. Hauptspannung	-93.559 MPa	27.067 MPa
Lotrechte Spannung XX	-61.138 MPa	180.568 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-31.663 MPa	35.509 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-60.146 MPa	174.257 MPa
Scherdehnung XY	-43.489 MPa	37.313 MPa
Scherdehnung YZ	-28.678 MPa	36.232 MPa
Scherdehnung ZX	-61.799 MPa	66.256 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	2.259 mm
X	-0.088 mm	0.112 mm
Y	-2.247 mm	0.01 mm
Z	-0.004 mm	0.335 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	3387.852 N
X	-926.812 N	1003.047 N
Y	-343.126 N	423.617 N
Z	-3331.028 N	190.933 N
Dehnung		
Äquivalent	7.386E-07	0.003
1. Hauptspannung	6.488E-07	0.003
3. Hauptspannung	-0.002	-5.044E-07
Lotrechte Spannung XX	-0.001	0.002
Lotrechte Dehnung YY	-7.251E-04	4.185E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-0.001	0.002
Scherdehnung XY	-0.002	0.001
Scherdehnung YZ	-0.001	0.001
Scherdehnung ZX	-0.002	0.002
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N





Anhang 35: FE-Analyse Durchlauf 2 Fusion, von links nach rechts: Vergleichsspannung, Sicherheitsfaktor. In grau hinterlegt minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie



Anhang 36: FE-Analyse Durchlauf 4 Fusion, von links nach rechts: Vergleichsspannung, Sicherheitsfaktor. In grau hinterlegt minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie

Studienbericht

Analysierte Datei	Händisch 2 zu 1 v2
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-08, 13:29:22
Autor	jonasschlag

▣ Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

▣ Simulationsmodell 1

▣ Studie 1 - Statische Spannung

▣ Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-08, 11:52:12

▣ Einstellungen

▣ Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

▣ Dämpfung

▣ Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

▣ Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

▣ Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper2	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

▣ Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

▣ Kontakte

▣ Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	1752	789

▣ Lastfall1

▣ Abhängigkeiten

▣ Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

▣ Ausgewählte Objekte

▣ Lasten

▣ Kraft2

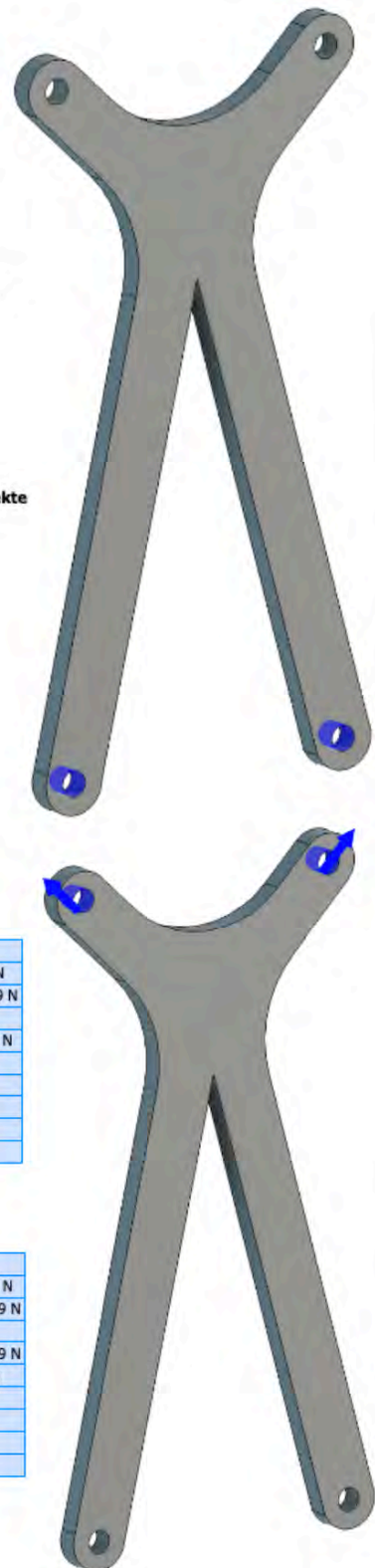
Typ	Kraft
Größe	50000.00 N
X-Wert	-35355.339 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	35355.339 N
X-Winkel	45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

▣ Ausgewählte Objekte

▣ Kraft3

Typ	Kraft
Größe	50000.00 N
X-Wert	35355.339 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	35355.339 N
X-Winkel	-45.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

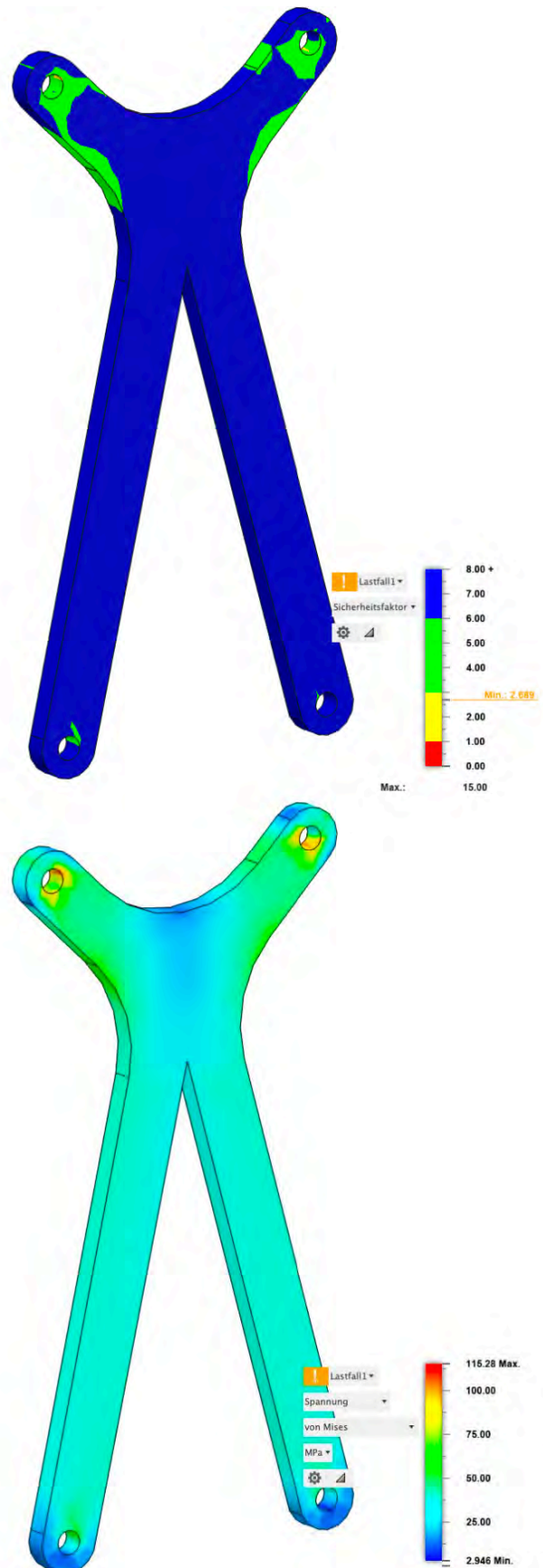
▣ Ausgewählte Objekte



Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	2.689	15.00
Spannung		
von Mises	2.946 MPa	115.28 MPa
1. Hauptspannung	-16.665 MPa	123.687 MPa
3. Hauptspannung	-71.554 MPa	25.846 MPa
Lotrechte Spannung XX	-65.697 MPa	96.416 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-23.614 MPa	29.639 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-68.379 MPa	93.811 MPa
Scherdehnung XY	-18.464 MPa	22.668 MPa
Scherdehnung YZ	-21.462 MPa	17.268 MPa
Scherdehnung ZX	-58.186 MPa	56.356 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.353 mm
X	-0.038 mm	0.034 mm
Y	-0.005 mm	0.003 mm
Z	0.00 mm	0.352 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	3043.746 N
X	-863.259 N	835.791 N
Y	-442.664 N	431.386 N
Z	-3004.045 N	321.478 N
Dehnung		
Äquivalent	5.970E-05	0.003
1. Hauptspannung	2.414E-05	0.003
3. Hauptspannung	-0.002	-3.509E-05
Lotrechte Spannung XX	-7.526E-04	0.001
Lotrechte Dehnung YY	-4.053E-04	3.652E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-7.958E-04	0.001
Scherdehnung XY	-6.728E-04	8.260E-04
Scherdehnung YZ	-7.820E-04	6.292E-04
Scherdehnung ZX	-0.002	0.002
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N



7 Dickenkontrolle in Studienbericht

Analysierte Datei	2mm v5
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-12, 11:25:32
Autor	jonasschlag

□ Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

□ Simulationsmodell 1

□ Studie 1 - Statische Spannung

□ Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-12, 10:45:00

□ Einstellungen

□ Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

□ Dämpfung

□ Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

□ Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

□ Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Teil 3:1	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

□ Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm^3
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

□ Kontakte

□ Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	43278	27707

□ Lastfall1

□ Abhängigkeiten

□ Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

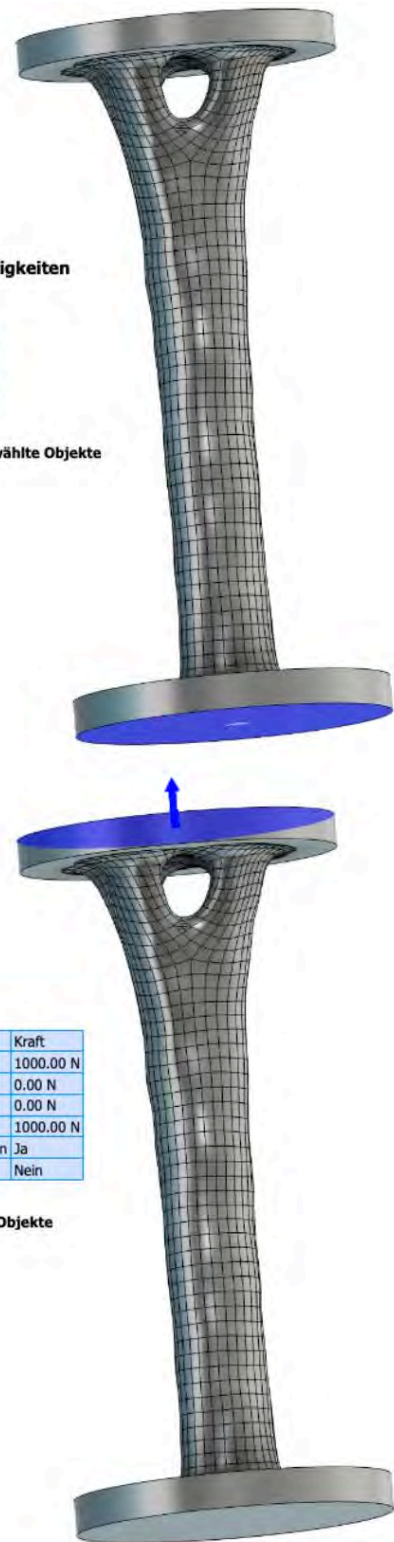
□ Ausgewählte Objekte

□ Lasten

□ Kraft1

Typ	Kraft
Größe	1000.00 N
X-Wert	0.00 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	1000.00 N
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

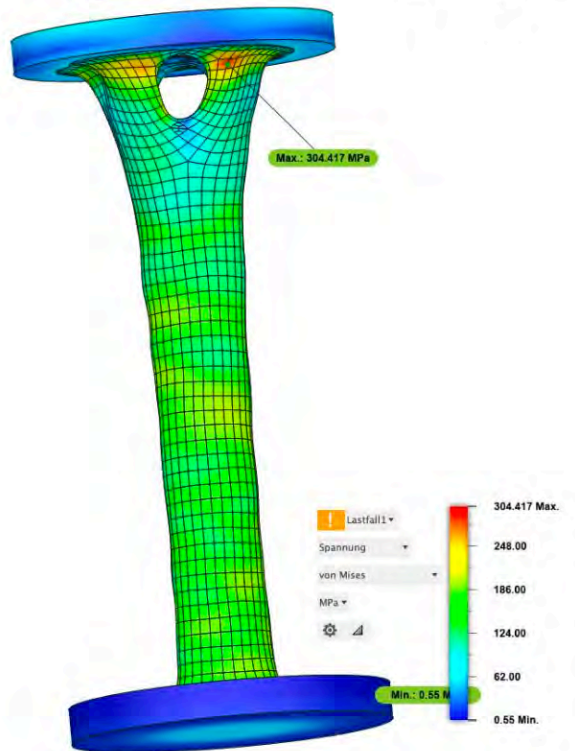
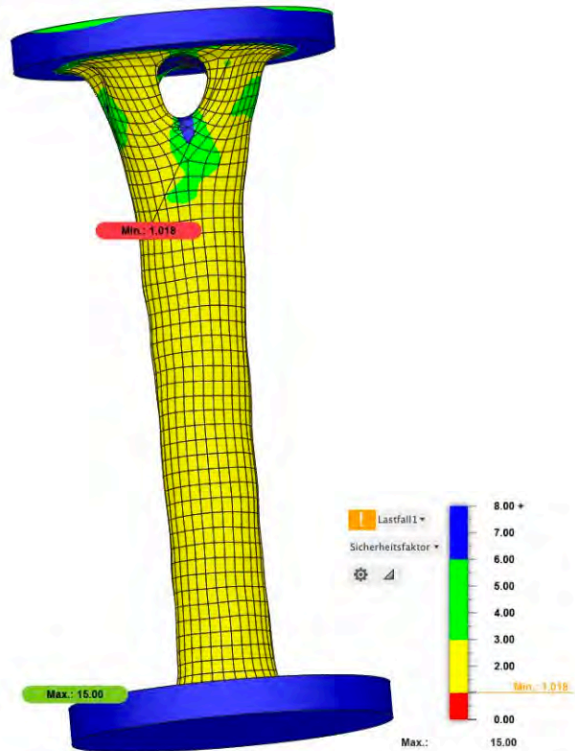
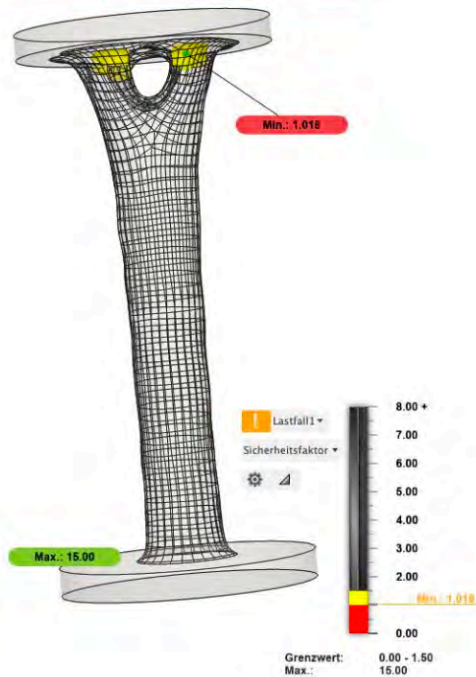
□ Ausgewählte Objekte



Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.018	15.00
Spannung		
von Mises	0.55 MPa	304.417 MPa
1. Hauptspannung	-9.374 MPa	342.553 MPa
3. Hauptspannung	-138.65 MPa	43.427 MPa
Lotrechte Spannung XX	-126.028 MPa	177.778 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-133.561 MPa	195.695 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-9.768 MPa	237.863 MPa
Scherdehnung XY	-40.268 MPa	67.493 MPa
Scherdehnung YZ	-155.559 MPa	122.597 MPa
Scherdehnung ZX	-121.641 MPa	128.826 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.059 mm
X	-0.009 mm	9.253E-04 mm
Y	-7.681E-04 mm	0.013 mm
Z	-2.375E-05 mm	0.058 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	9.189 N
X	-2.479 N	2.35 N
Y	-2.495 N	2.21 N
Z	-9.111 N	0.082 N
Dehnung		
Äquivalent	7.676E-06	0.007
1. Hauptspannung	3.453E-06	0.007
3. Hauptspannung	-0.005	-5.906E-06
Lotrechte Spannung XX	-0.001	0.002
Lotrechte Dehnung YY	-0.001	0.002
Lotrechte Spannung ZZ	-8.972E-04	0.003
Scherdehnung XY	-0.001	0.002
Scherdehnung YZ	-0.006	0.004
Scherdehnung ZX	-0.004	0.005
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N



Studienbericht

Analysierte Datei	unres v4
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-11, 11:57:25
Autor	jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Studie 1 - Statische Spannung

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-11, 11:45:47

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper1	Aluminium 3.1354T351	Zugfestigkeit

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

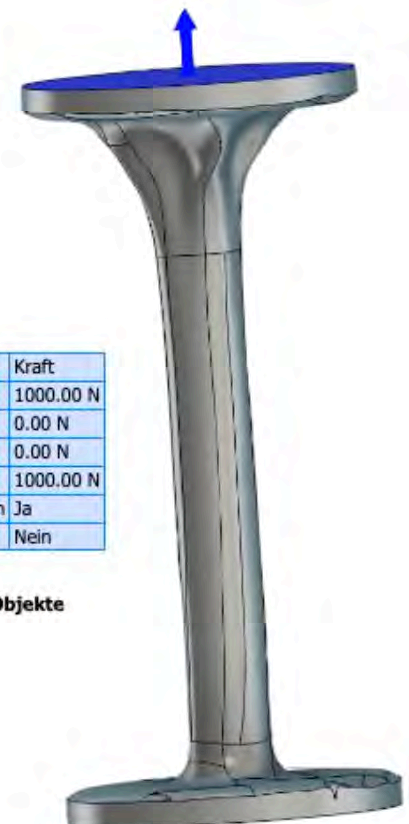
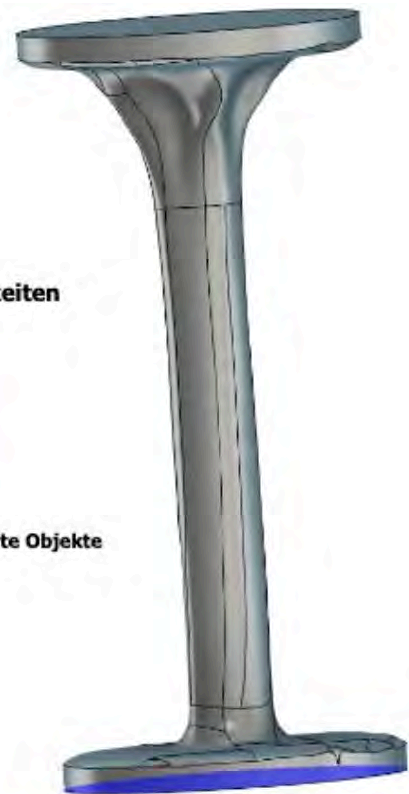
Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte



Lasten

Kraft1

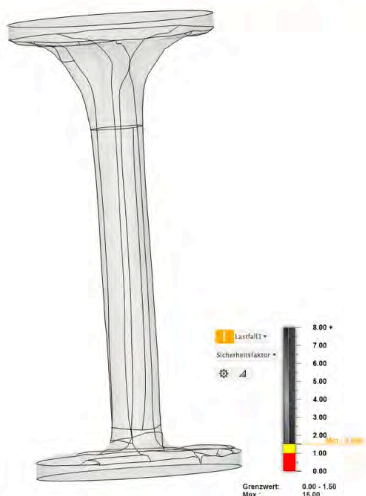
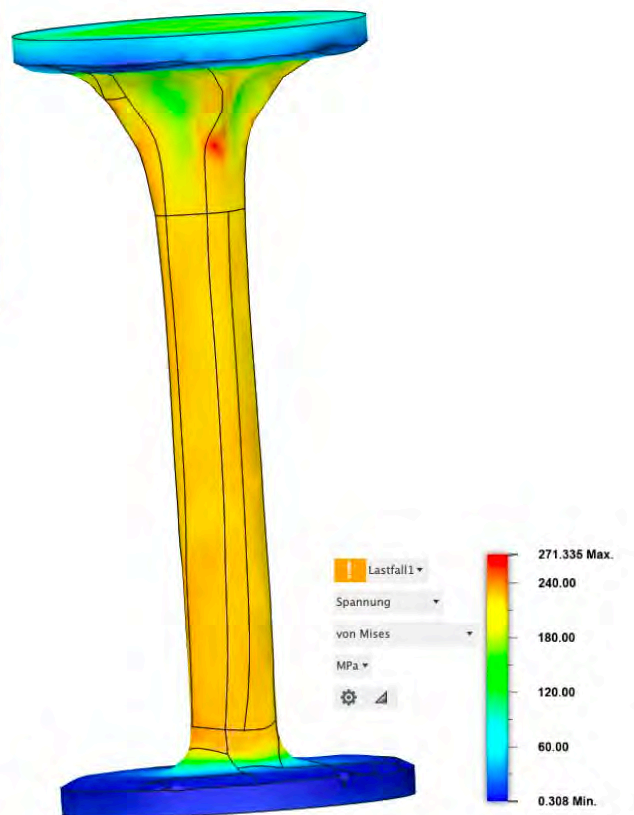
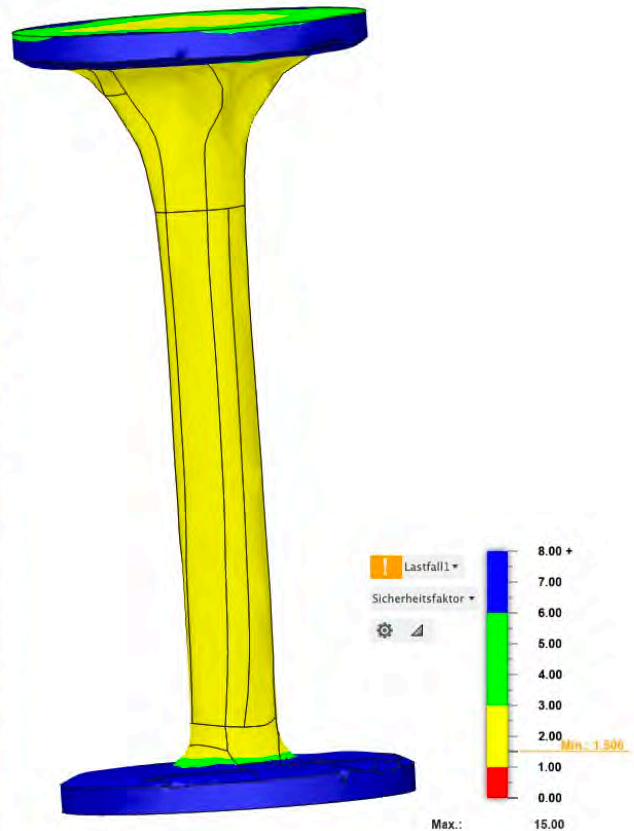
Typ	Kraft
Größe	1000.00 N
X-Wert	0.00 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	1000.00 N
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

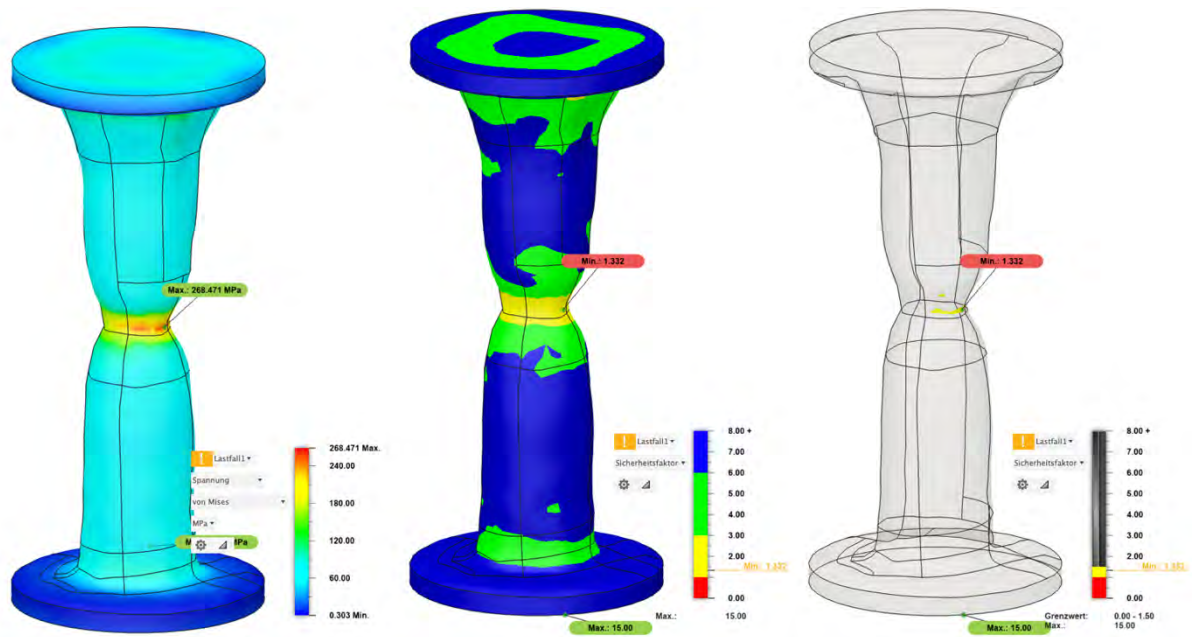
Ausgewählte Objekte

Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.506	15.00
Spannung		
von Mises	0.308 MPa	271.335 MPa
1. Hauptspannung	-1.385 MPa	282.189 MPa
3. Hauptspannung	-152.887 MPa	52.831 MPa
Lotrechte Spannung XX	-147.571 MPa	172.99 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-151.523 MPa	191.161 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-24.67 MPa	262.218 MPa
Scherdehnung XY	-51.482 MPa	46.749 MPa
Scherdehnung YZ	-114.603 MPa	124.36 MPa
Scherdehnung ZX	-112.737 MPa	111.752 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.089 mm
X	-0.002 mm	0.007 mm
Y	-0.001 mm	0.023 mm
Z	-3.062E-05 mm	0.086 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	61.163 N
X	-14.542 N	17.50 N
Y	-19.799 N	16.037 N
Z	-61.13 N	3.612 N
Dehnung		
Äquivalent	5.980E-06	0.006
1. Hauptspannung	3.154E-06	0.006
3. Hauptspannung	-0.004	1.026E-04
Lotrechte Spannung XX	-0.001	0.002
Lotrechte Dehnung YY	-0.002	0.002
Lotrechte Spannung ZZ	-8.772E-04	0.003
Scherdehnung XY	-0.002	0.002
Scherdehnung YZ	-0.004	0.005
Scherdehnung ZX	-0.004	0.004
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N





Anhang 43: Auszug FE-Analysebericht zu Mindestdicke 3mm



Anhang 44: Optimierungsergebnisse Apex, vorgegebener minimaler Durchmesser von links nach rechts: 4 mm, 5 mm, 10 mm

Studienbericht

Analysierte Datei	unres v3
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-11, 14:05:53
Autor	jonasschlag

□ Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

□ Simulationsmodell 1

□ 2mm

□ Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-11, 13:59:00

□ Einstellungen

□ Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

□ Dämpfung

□ Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

□ Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

□ Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper9	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

□ Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm^3
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

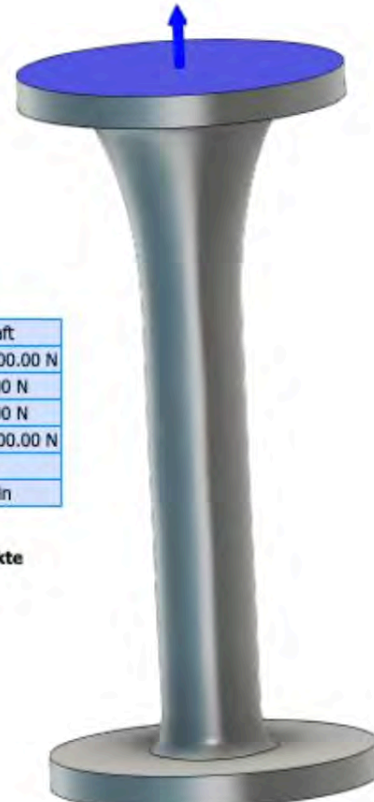
□ Lastfall1

□ Abhängigkeiten

□ Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

□ Ausgewählte Objekte



□ Kraft1

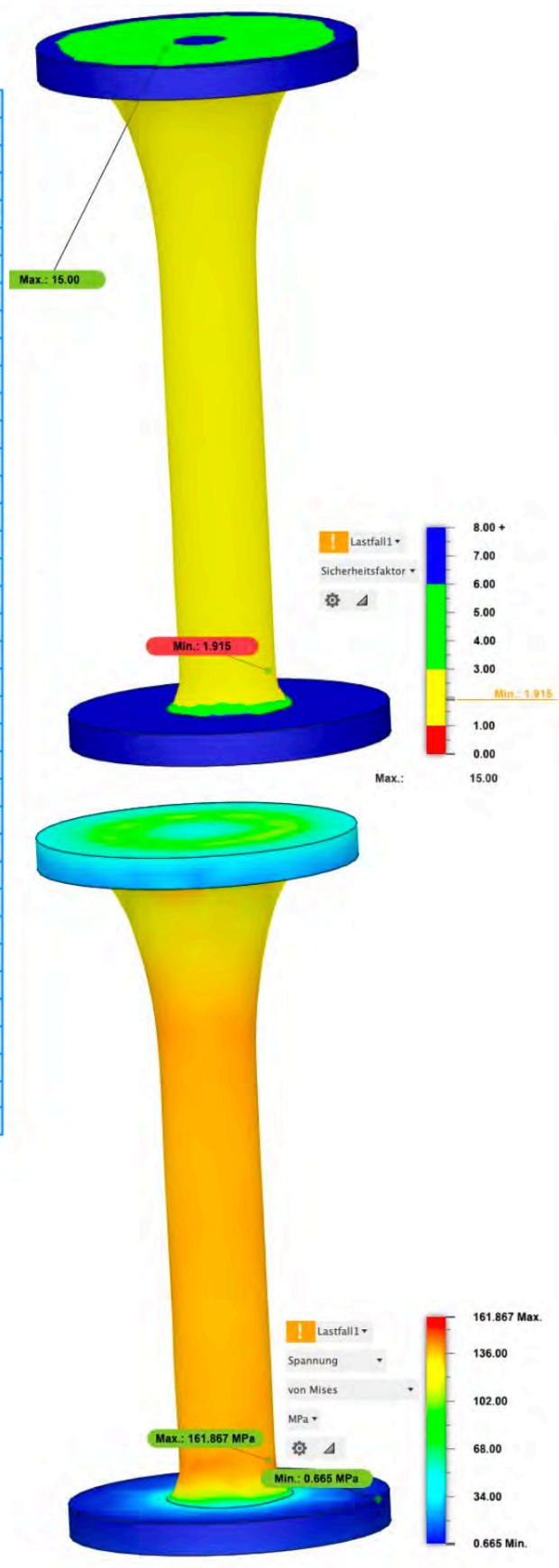
Typ	Kraft
Größe	1000.00 N
X-Wert	0.00 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	1000.00 N
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

□ Ausgewählte Objekte

Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.915	15.00
Spannung		
von Mises	0.665 MPa	161.867 MPa
1. Hauptspannung	-18.427 MPa	174.708 MPa
3. Hauptspannung	-89.343 MPa	37.703 MPa
Lotrechte Spannung XX	-85.172 MPa	98.014 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-88.796 MPa	119.305 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-20.548 MPa	170.353 MPa
Scherdehnung XY	-23.885 MPa	21.704 MPa
Scherdehnung YZ	-75.00 MPa	63.181 MPa
Scherdehnung ZX	-75.083 MPa	74.65 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.046 mm
X	-0.003 mm	0.003 mm
Y	-0.002 mm	0.003 mm
Z	-3.068E-05 mm	0.046 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	100.59 N
X	-21.811 N	30.799 N
Y	-27.542 N	24.448 N
Z	-99.538 N	11.128 N
Dehnung		
Äquivalent	1.232E-05	0.003
1. Hauptspannung	8.100E-06	0.003
3. Hauptspannung	-0.002	-1.011E-05
Lotrechte Spannung XX	-9.273E-04	8.750E-04
Lotrechte Dehnung YY	-9.513E-04	9.814E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-3.583E-04	0.002
Scherdehnung XY	-8.703E-04	7.909E-04
Scherdehnung YZ	-0.003	0.002
Scherdehnung ZX	-0.003	0.003
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N



Studienbericht

Analysierte Datei	1mm v3
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-11, 14:03:38
Autor	jonasschlag

▣ Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

▣ Simulationsmodell 1

▣ 2mm

▣ Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-11, 13:59:15

▣ Einstellungen

▣ Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

▣ Dämpfung

▣ Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

▣ Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

▣ Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper6	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

▣ Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

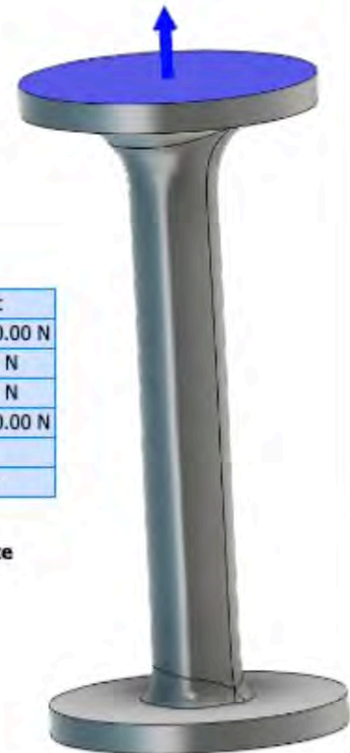
▣ Lastfall1

▣ Abhängigkeiten

▣ Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

▣ Ausgewählte Objekte



▣ Kraft1

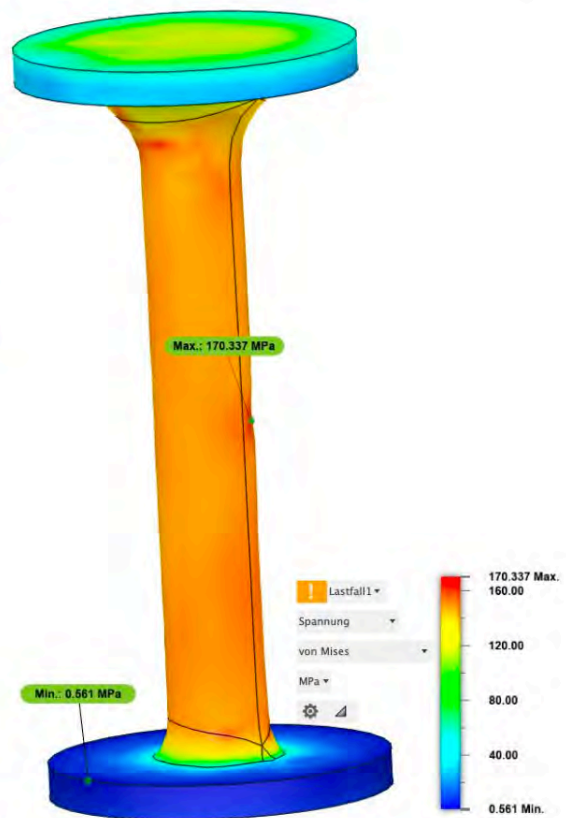
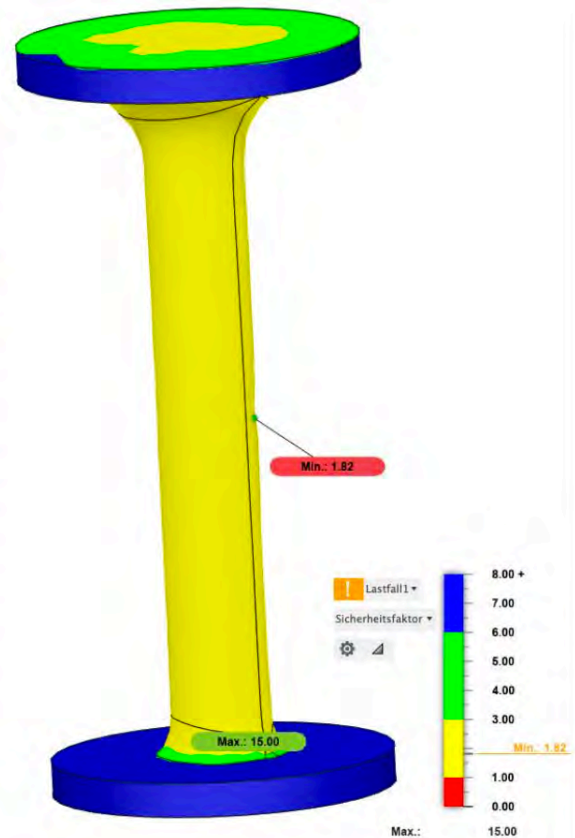
Typ	Kraft
Größe	1000.00 N
X-Wert	0.00 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	1000.00 N
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

▣ Ausgewählte Objekte

Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.82	15.00
Spannung		
von Mises	0.561 MPa	170.337 MPa
1. Hauptspannung	-7.912 MPa	198.175 MPa
3. Hauptspannung	-114.099 MPa	40.127 MPa
Lotrechte Spannung XX	-113.198 MPa	113.354 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-110.825 MPa	111.47 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-14.691 MPa	176.905 MPa
Scherdehnung XY	-20.671 MPa	20.681 MPa
Scherdehnung YZ	-82.676 MPa	80.077 MPa
Scherdehnung ZX	-81.927 MPa	91.556 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.056 mm
X	-0.003 mm	0.004 mm
Y	-9.718E-04 mm	0.008 mm
Z	-3.760E-05 mm	0.055 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	103.306 N
X	-21.965 N	30.653 N
Y	-28.598 N	25.685 N
Z	-102.079 N	11.023 N
Dehnung		
Äquivalent	1.095E-05	0.004
1. Hauptspannung	7.168E-06	0.004
3. Hauptspannung	-0.003	-7.702E-06
Lotrechte Spannung XX	-0.001	9.000E-04
Lotrechte Dehnung YY	-0.001	9.772E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-5.504E-04	0.002
Scherdehnung XY	-7.532E-04	7.536E-04
Scherdehnung YZ	-0.003	0.003
Scherdehnung ZX	-0.003	0.003
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N





Anhang 49: Fusion-Optimierungsergebnisse mit Dickenrestriktion: Von links nach rechts, in Klammern der Zylinderdurchmesser oben und unten: uneingeschränkt (2,9 mm; 3 mm), 1 mm (2,7 mm; 2,8 mm), 3 mm (3 mm; 3,1 mm), 4 mm (3,9 mm; 4 mm), 5 mm (4,9 mm; 5 mm), 10 mm (9 mm; 9,1 mm)

7.2 Maximale Dicke

Studienbericht

Analysierte Datei	Max Dicke V2 v21
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-16, 18:51:59
Autor	jonasschlag

▣ Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

▣ Simulationsmodell 1

▣ Studie 1 - Statische Spannung

▣ Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-15, 21:14:30

▣ Einstellungen

▣ Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

▣ Dämpfung

▣ Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

▣ Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

▣ Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Komponente1:1	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

▣ Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

▣ Kontakte

▣ Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	971	492

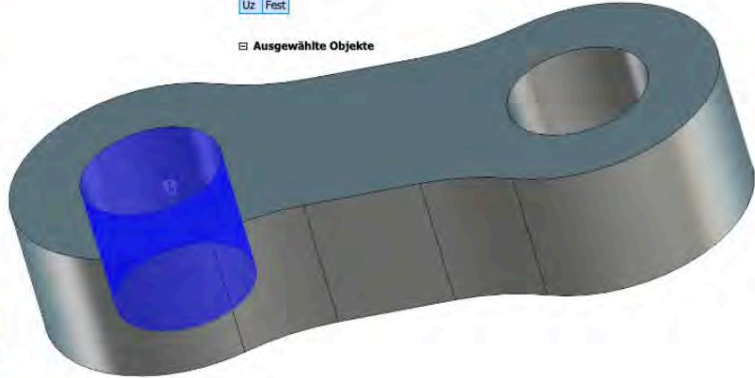
▣ Lastfall1

▣ Abhängigkeiten

▣ Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

▣ Ausgewählte Objekte

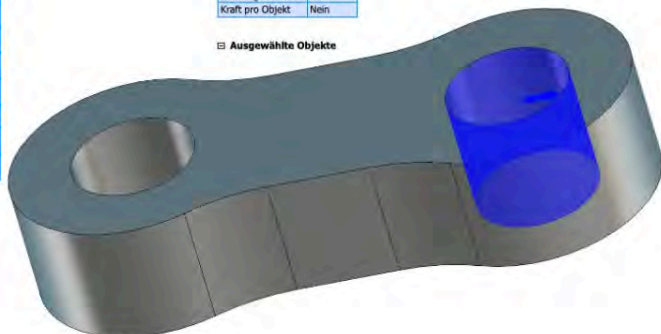


▣ Lasten

▣ Kraft3

Typ	Kraft
Größe	2000.00 N
X-Wert	2000.00 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	0.00 N
X-Winkel	90.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Richtung umkehren	Ja
Kraft pro Objekt	Nein

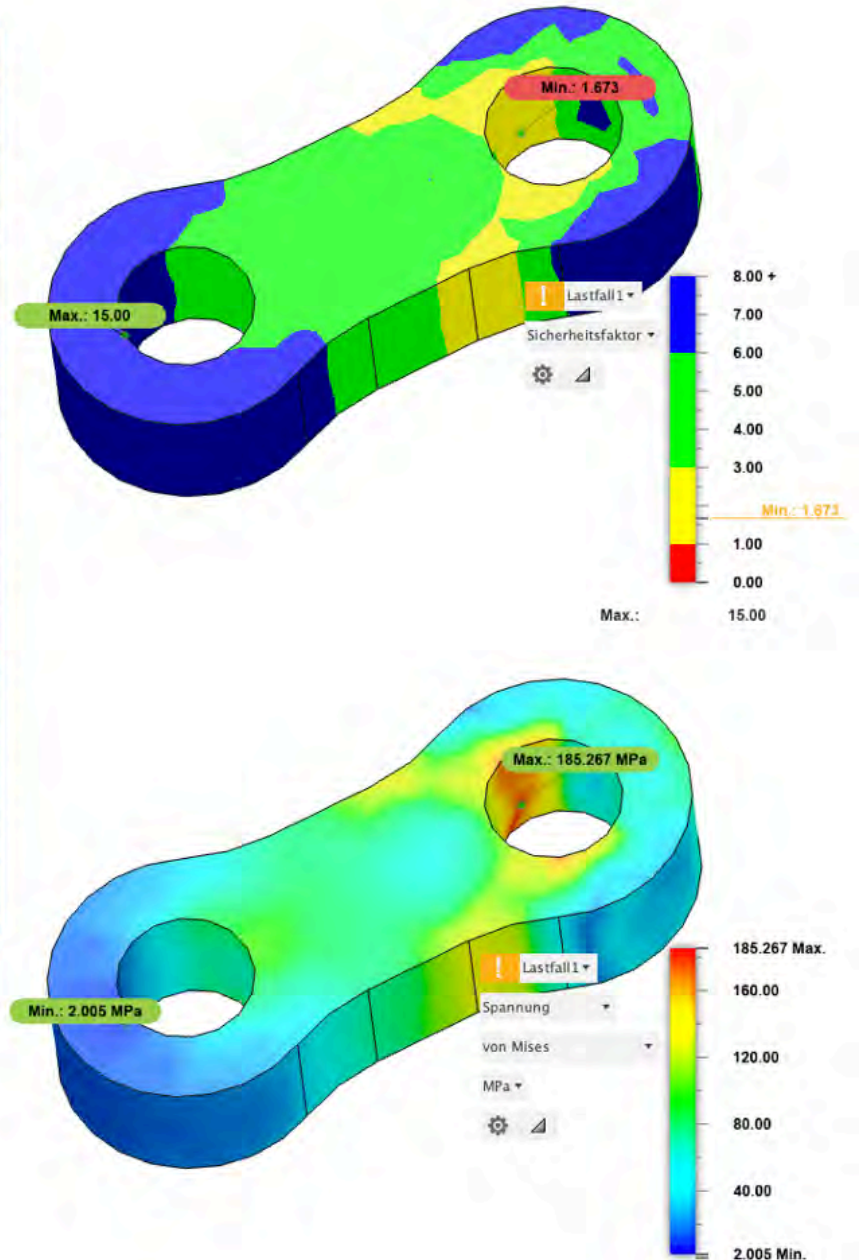
▣ Ausgewählte Objekte



Ergebnisse

Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.673	15.00
Spannung		
von Mises	2.005 MPa	185.267 MPa
1. Hauptspannung	-48.096 MPa	208.881 MPa
3. Hauptspannung	-136.06 MPa	44.83 MPa
Lotrechte Spannung XX	-85.51 MPa	207.996 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-136.057 MPa	101.316 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-48.097 MPa	53.586 MPa
Scherdehnung XY	-52.466 MPa	53.111 MPa
Scherdehnung YZ	-14.343 MPa	11.714 MPa
Scherdehnung ZX	-30.083 MPa	30.303 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.021 mm
X	0.00 mm	0.021 mm
Y	-0.005 mm	0.005 mm
Z	-0.001 mm	0.001 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	109.473 N
X	-108.446 N	7.11 N
Y	-21.885 N	16.029 N
Z	-17.99 N	18.57 N
Dehnung		
Äquivalent	3.314E-05	0.003
1. Hauptspannung	1.527E-05	0.003
3. Hauptspannung	-0.002	-3.760E-05
Lotrechte Spannung XX	-6.182E-04	0.003
Lotrechte Dehnung YY	-0.002	0.001
Lotrechte Spannung ZZ	-6.498E-04	4.963E-04
Scherdehnung XY	-0.002	0.002
Scherdehnung YZ	-5.226E-04	4.268E-04
Scherdehnung ZX	-0.001	0.001
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N



Studienbericht

Analysierte Datei	Max Dicke V2 2 v10
Version	Autodesk Fusion (2.0.19994)
Erstellungsdatum	2024-09-16, 18:56:18
Autor	jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	jonasschlag

Simulationsmodell 1

Studie 1 - Statische Spannung

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-15, 21:11:51

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Dämpfung

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper1	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	993	485

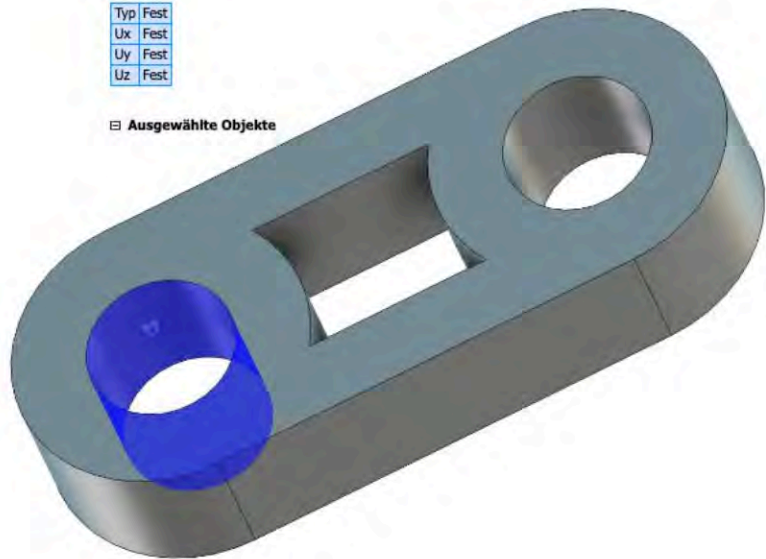
Lastfall1

Abhängigkeiten

Fest1

Typ	Fest
Ux	Fest
Uy	Fest
Uz	Fest

Ausgewählte Objekte

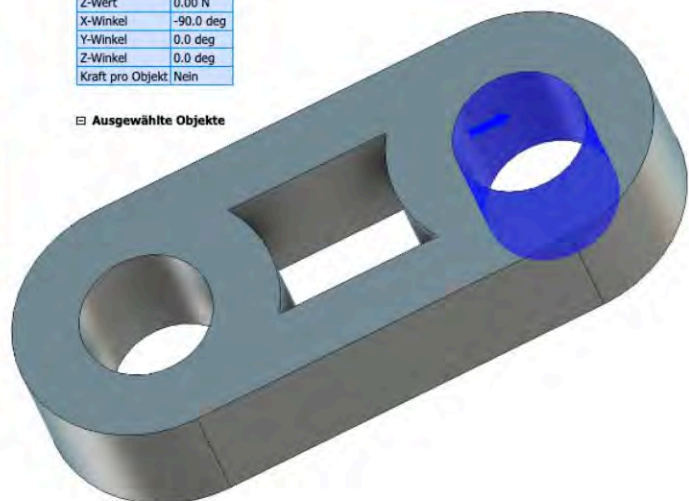


Lasten

Kraft1

Typ	Kraft
Größe	2000.00 N
X-Wert	2000.00 N
Y-Wert	0.00 N
Z-Wert	0.00 N
X-Winkel	-90.0 deg
Y-Winkel	0.0 deg
Z-Winkel	0.0 deg
Kraft pro Objekt	Nein

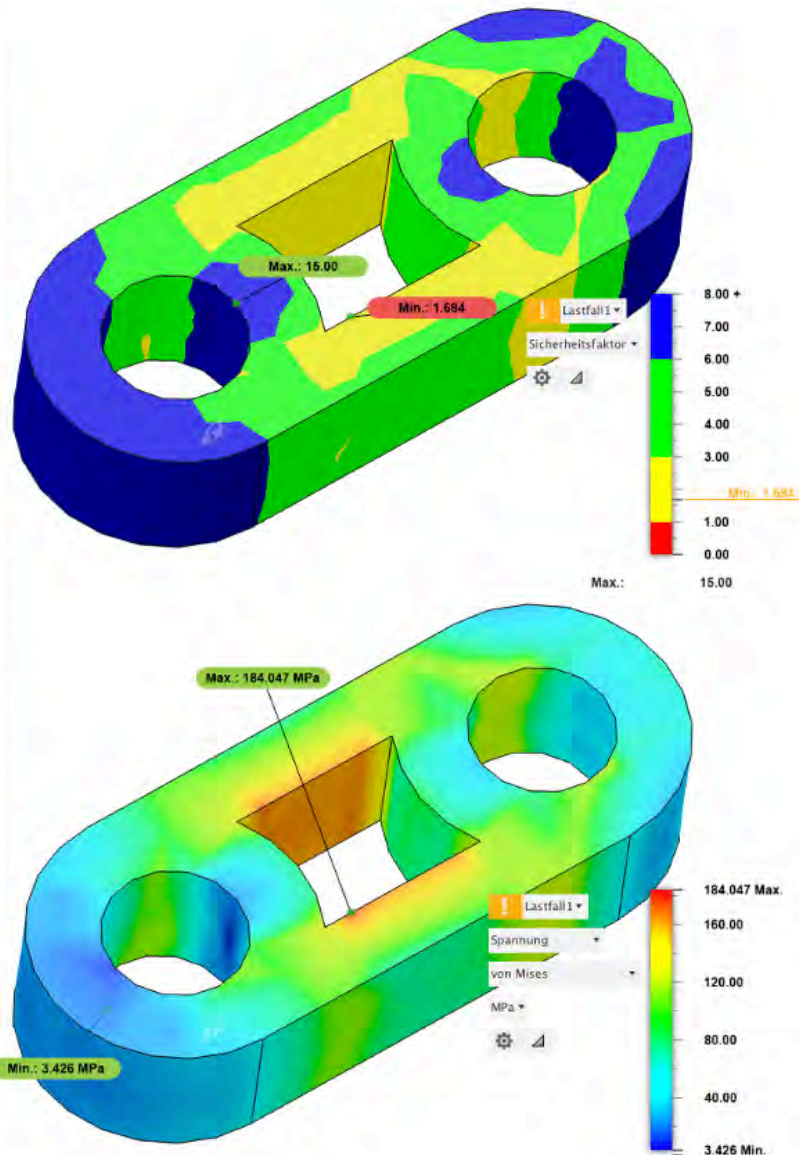
Ausgewählte Objekte

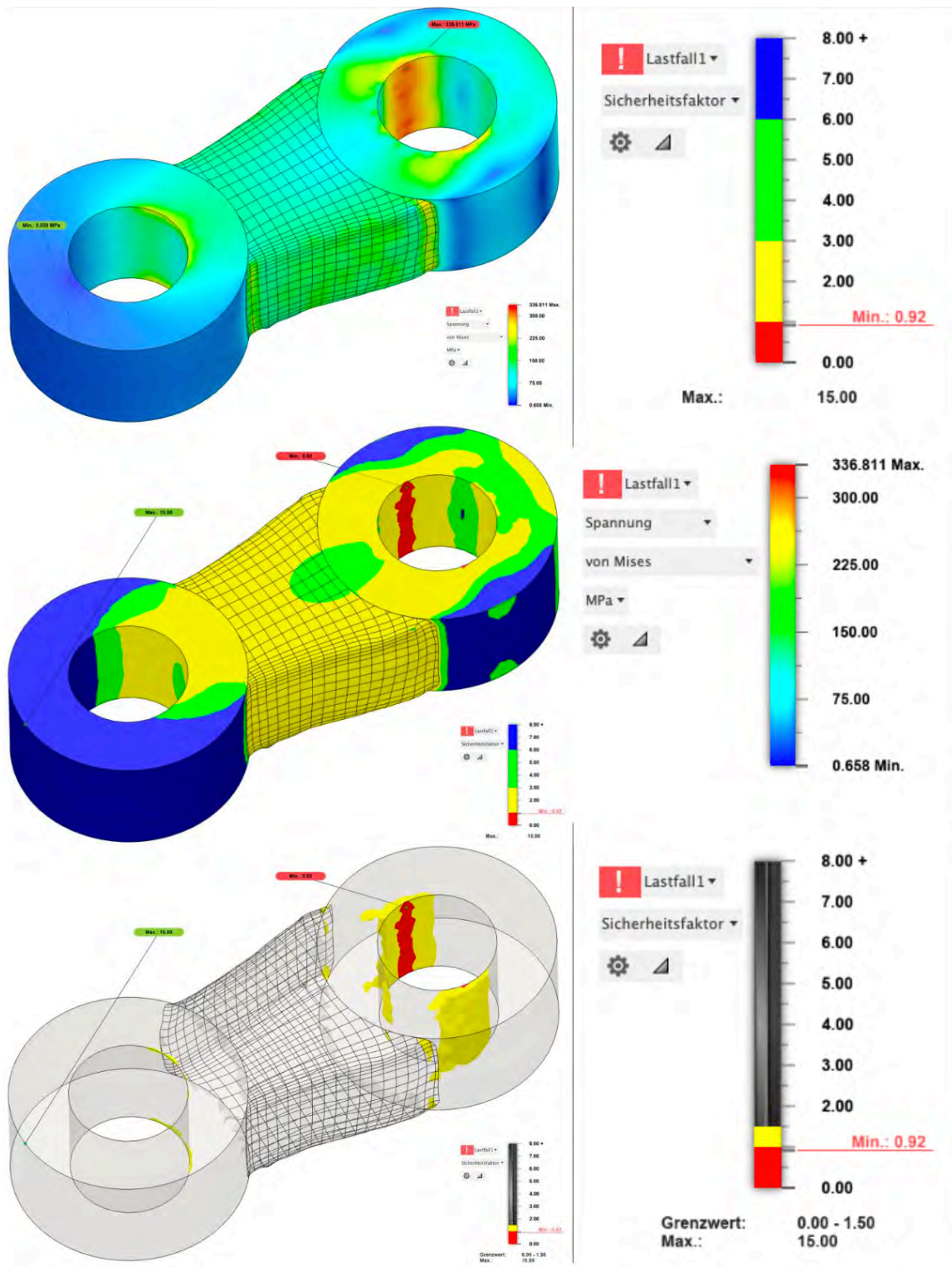


Ergebnisse

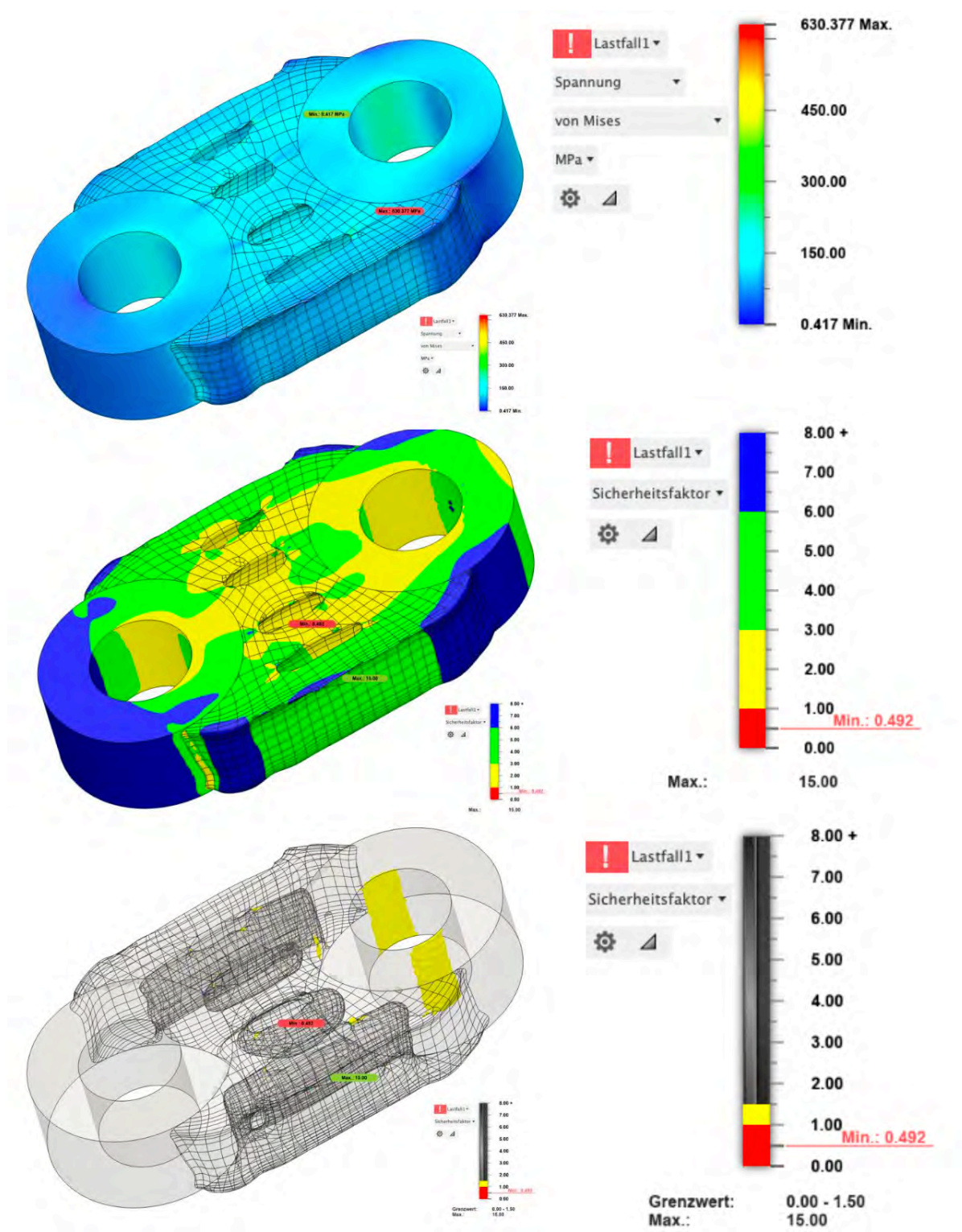
Ergebniszusammenfassung

Name	Min.	Max.
Sicherheitsfaktor		
Sicherheitsfaktor (pro Körper)	1.684	15.00
Spannung		
von Mises	3.426 MPa	184.047 MPa
1. Hauptspannung	-25.519 MPa	192.465 MPa
3. Hauptspannung	-104.327 MPa	15.797 MPa
Lotrechte Spannung XX	-71.04 MPa	191.495 MPa
Lotrechte Dehnung YY	-99.949 MPa	66.824 MPa
Lotrechte Spannung ZZ	-32.121 MPa	36.38 MPa
Scherdehnung XY	-61.216 MPa	61.038 MPa
Scherdehnung YZ	-11.717 MPa	13.208 MPa
Scherdehnung ZX	-21.627 MPa	21.295 MPa
Verschiebung		
Gesamt	0.00 mm	0.023 mm
X	0.00 mm	0.023 mm
Y	-0.005 mm	0.005 mm
Z	-0.002 mm	0.001 mm
Reaktionskraft		
Gesamt	0.00 N	100.035 N
X	-99.652 N	25.919 N
Y	-14.81 N	13.826 N
Z	-15.164 N	14.569 N
Dehnung		
Äquivalent	5.243E-05	0.003
1. Hauptspannung	1.101E-05	0.003
3. Hauptspannung	-0.002	-3.000E-05
Lotrechte Spannung XX	-6.928E-04	0.003
Lotrechte Dehnung YY	-0.001	9.125E-04
Lotrechte Spannung ZZ	-8.088E-04	4.597E-04
Scherdehnung XY	-0.002	0.002
Scherdehnung YZ	-4.270E-04	4.813E-04
Scherdehnung ZX	-7.881E-04	7.760E-04
Kontaktkraft		
Gesamt	0.00 N	0.00 N
X	0.00 N	0.00 N
Y	0.00 N	0.00 N
Z	0.00 N	0.00 N

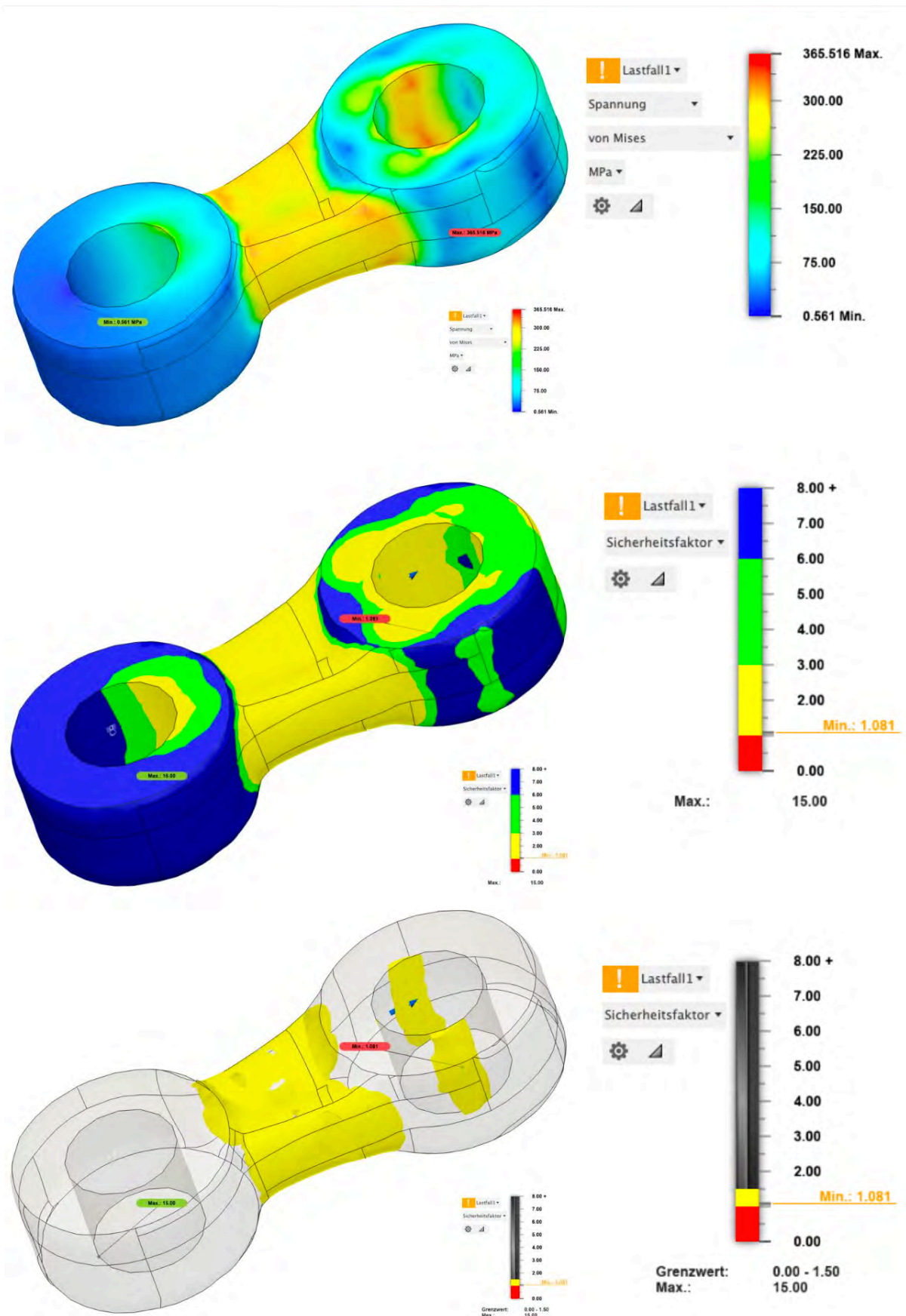




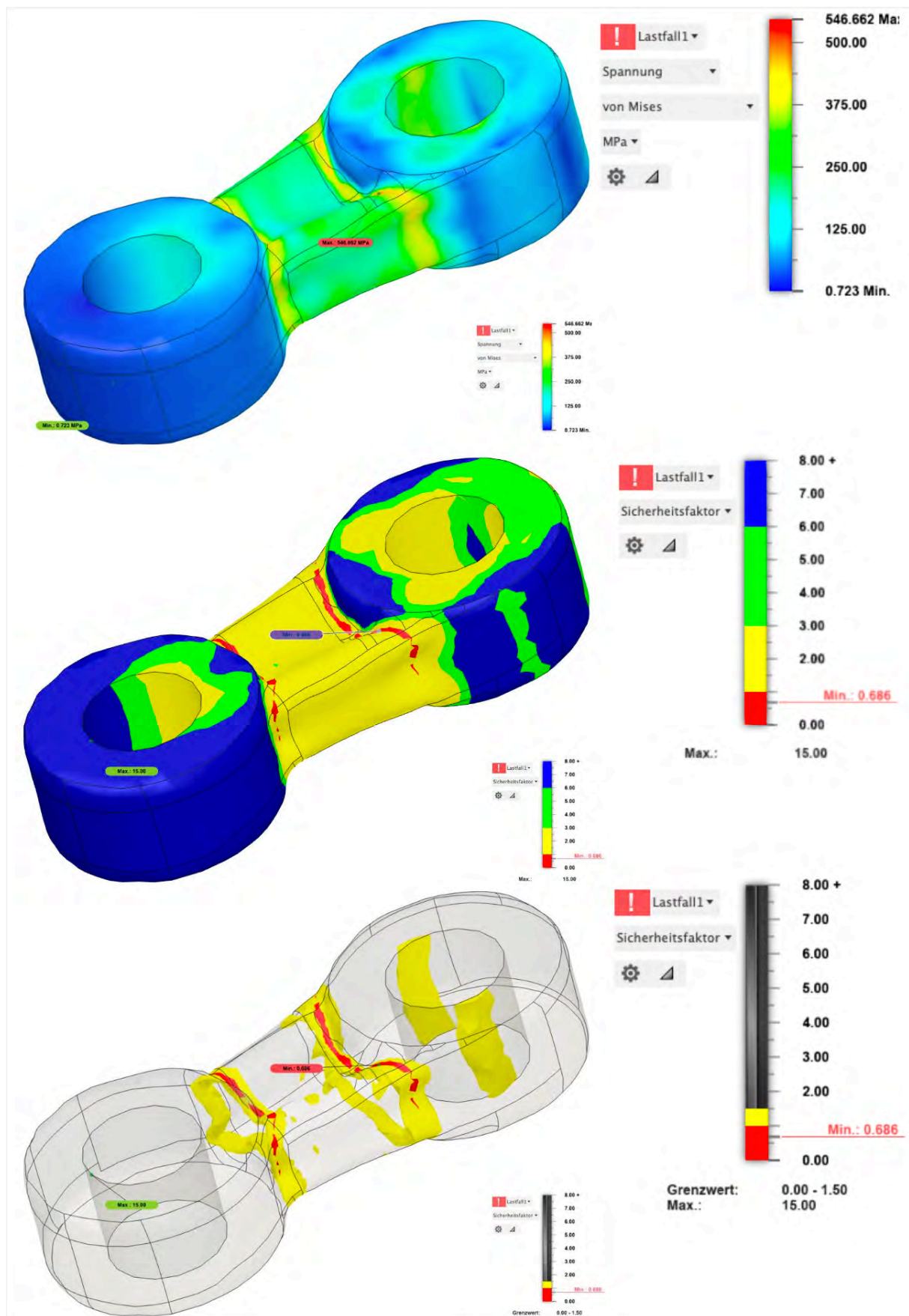
Anhang 54: Ausschnitt FE-Analysebericht Optimierung Inspire, keine Restriktion der maximalen Dicke



Anhang 55: Ausschnitt FE-Analysebericht Optimierung Inspire mit Restriktion der maximalen Dicke

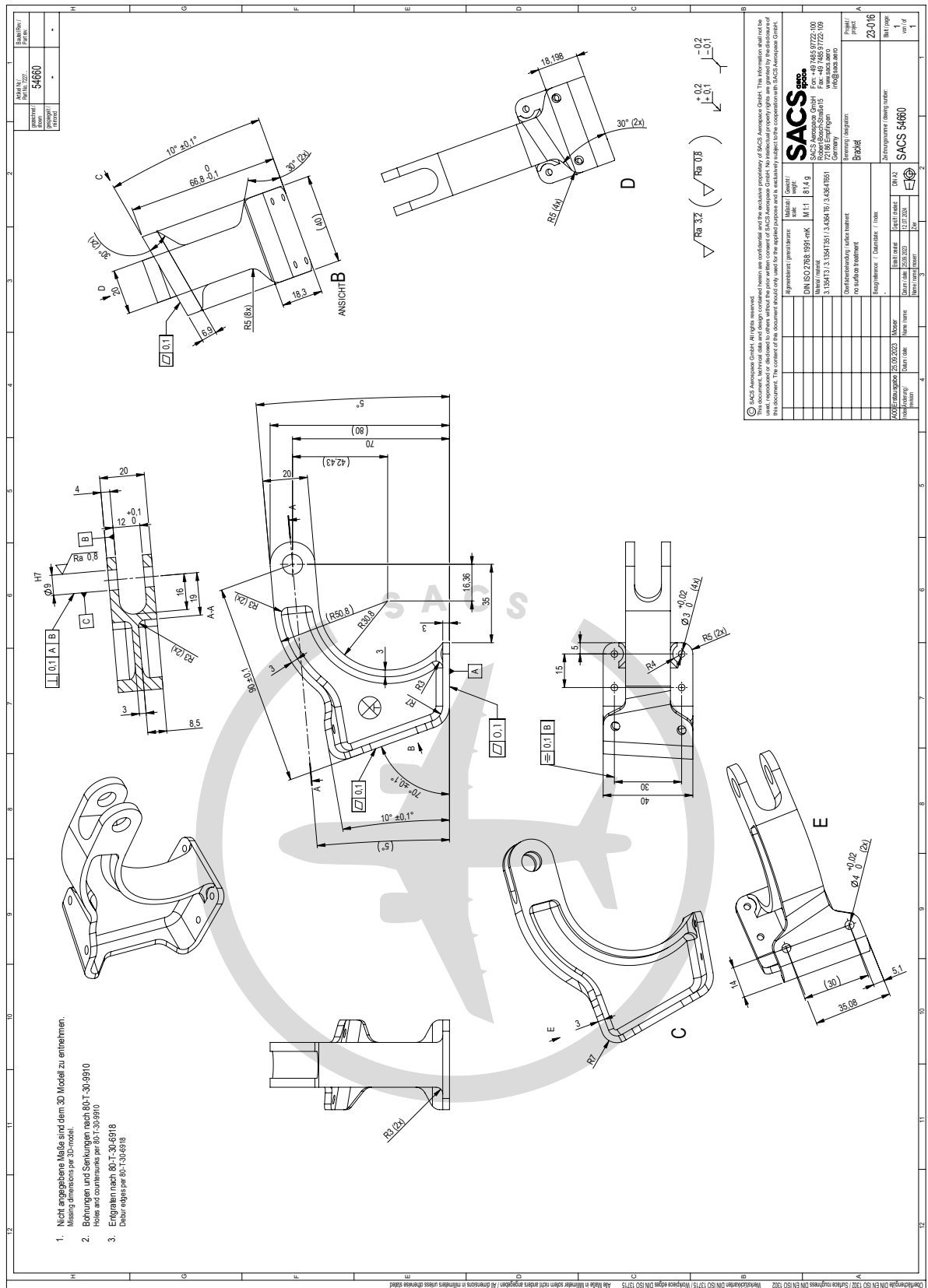


Anhang 56: Ausschnitt FE-Analysebericht Optimierung Apex, keine Restriktion der maximalen Dicke

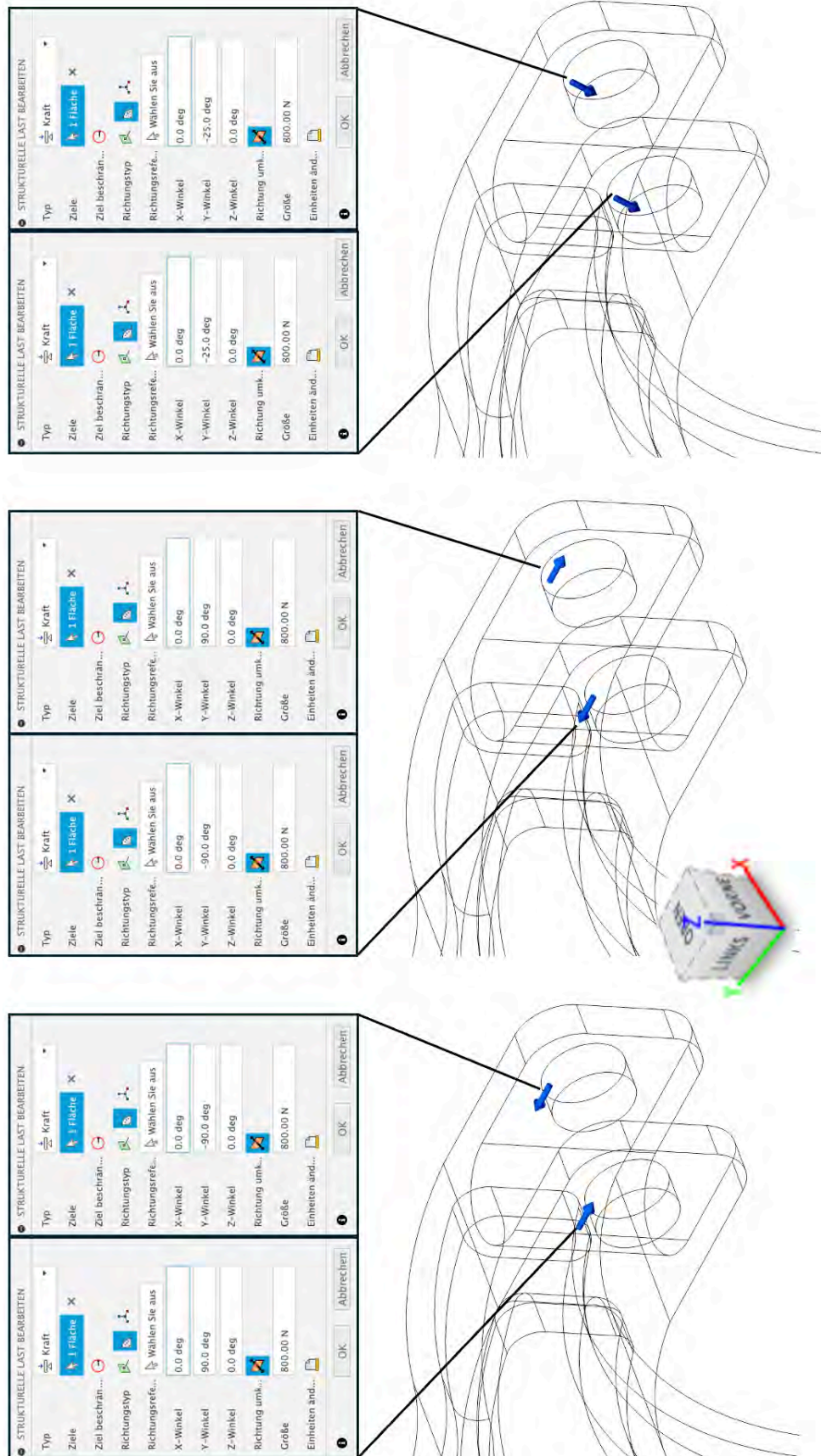


Anhang 57: Ausschnitt FE-Analysebericht Optimierung Apex mit Restriktion der maximalen Dicke

8 Bracket

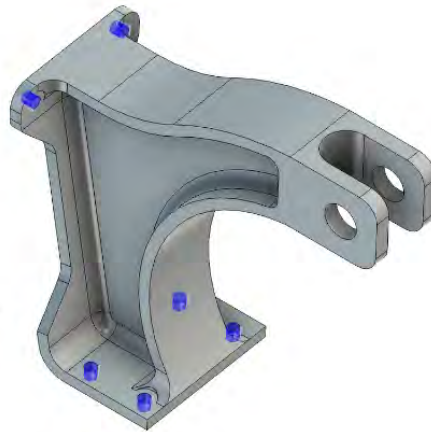


Anhang 58: Zeichnung des original Brackets der SACS Aerospace GmbH



Anhang 59: Die Kräfte der drei Lastfälle auf das Bracket

- ▢ Lastfall1
- ▢ Abhängigkeiten
- ▢ Fest5
- | | |
|-----|------|
| Typ | Fest |
| Ux | Fest |
| Uy | Fest |
| Uz | Fest |
- ▢ Ausgewählte Objekte



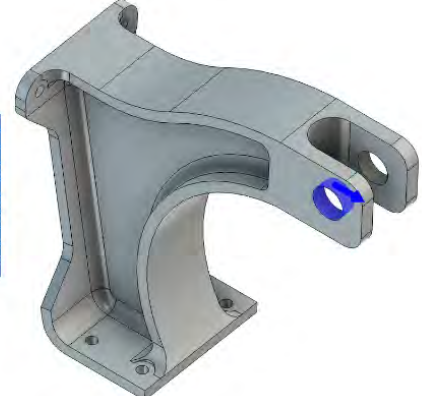
- ▢ Lastfall2
- ▢ Abhängigkeiten
- ▢ Fest8
- | | |
|-----|------|
| Typ | Fest |
| Ux | Fest |
| Uy | Fest |
| Uz | Fest |
- ▢ Ausgewählte Objekte



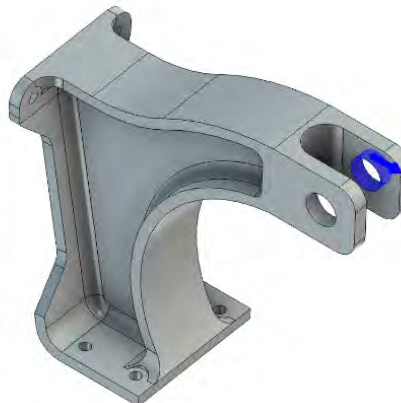
- ▢ Lasten
- ▢ Kraft4
- | Typ | Kraft |
|-------------------|-----------|
| Größe | 800.00 N |
| X-Wert | 0.00 N |
| Y-Wert | 800.00 N |
| Z-Wert | 0.00 N |
| X-Winkel | 0.0 deg |
| Y-Winkel | -90.0 deg |
| Z-Winkel | 0.0 deg |
| Richtung umkehren | Ja |
| Kraft pro Objekt | Nein |
- ▢ Ausgewählte Objekte



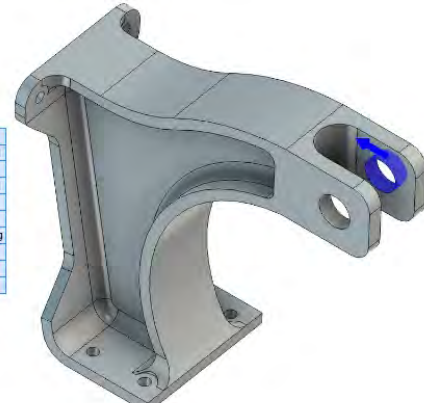
- ▢ Lasten
- ▢ Kraft10
- | Typ | Kraft |
|-------------------|-----------|
| Größe | 800.00 N |
| X-Wert | 0.00 N |
| Y-Wert | -800.00 N |
| Z-Wert | 0.00 N |
| X-Winkel | 180.0 deg |
| Y-Winkel | -90.0 deg |
| Z-Winkel | 0.0 deg |
| Richtung umkehren | Ja |
| Kraft pro Objekt | Nein |
- ▢ Ausgewählte Objekte



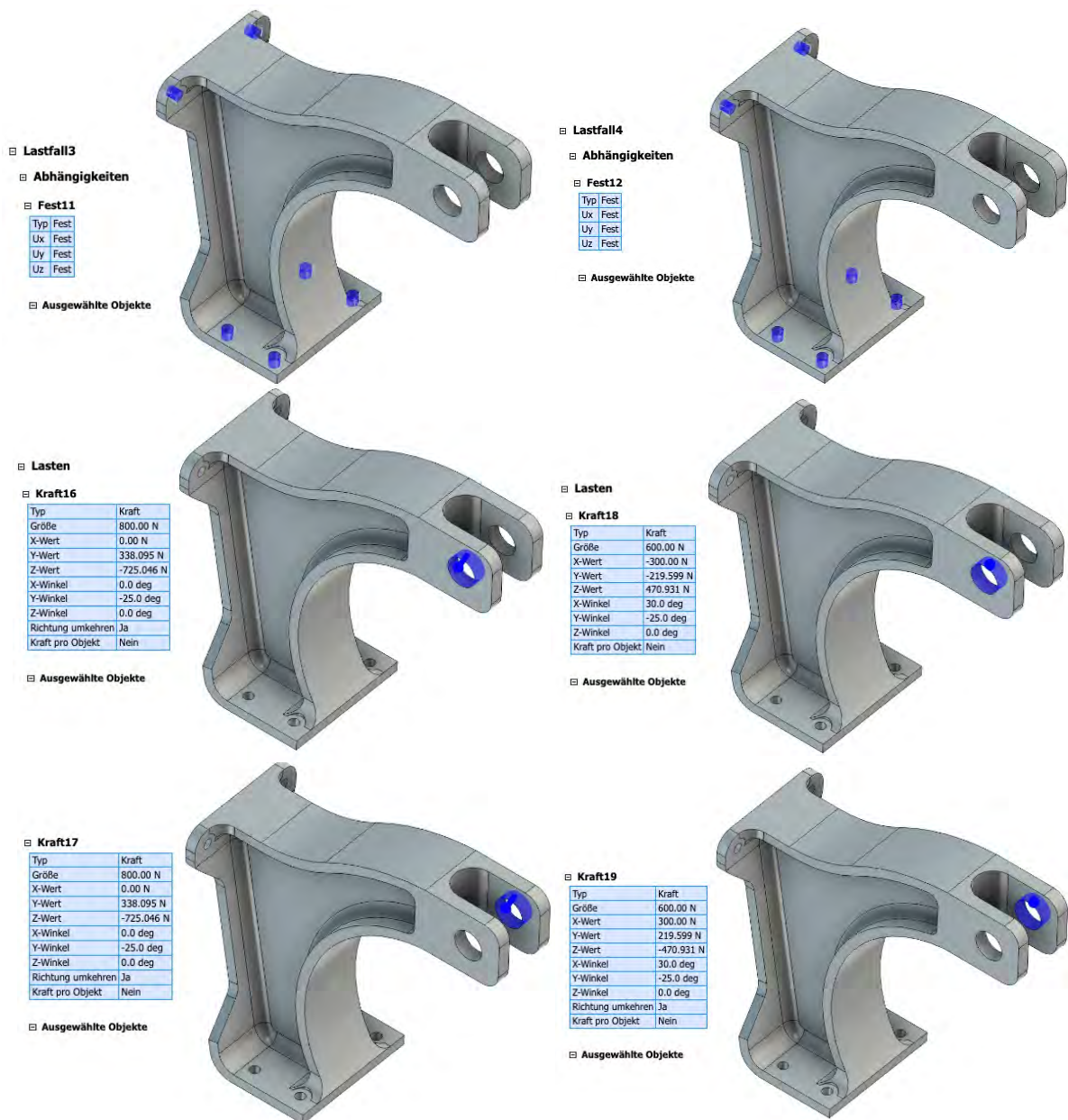
- ▢ Kraft5
- | Typ | Kraft |
|-------------------|-----------|
| Größe | 800.00 N |
| X-Wert | 0.00 N |
| Y-Wert | -800.00 N |
| Z-Wert | 0.00 N |
| X-Winkel | 0.0 deg |
| Y-Winkel | 90.0 deg |
| Z-Winkel | 0.0 deg |
| Richtung umkehren | Ja |
| Kraft pro Objekt | Nein |
- ▢ Ausgewählte Objekte



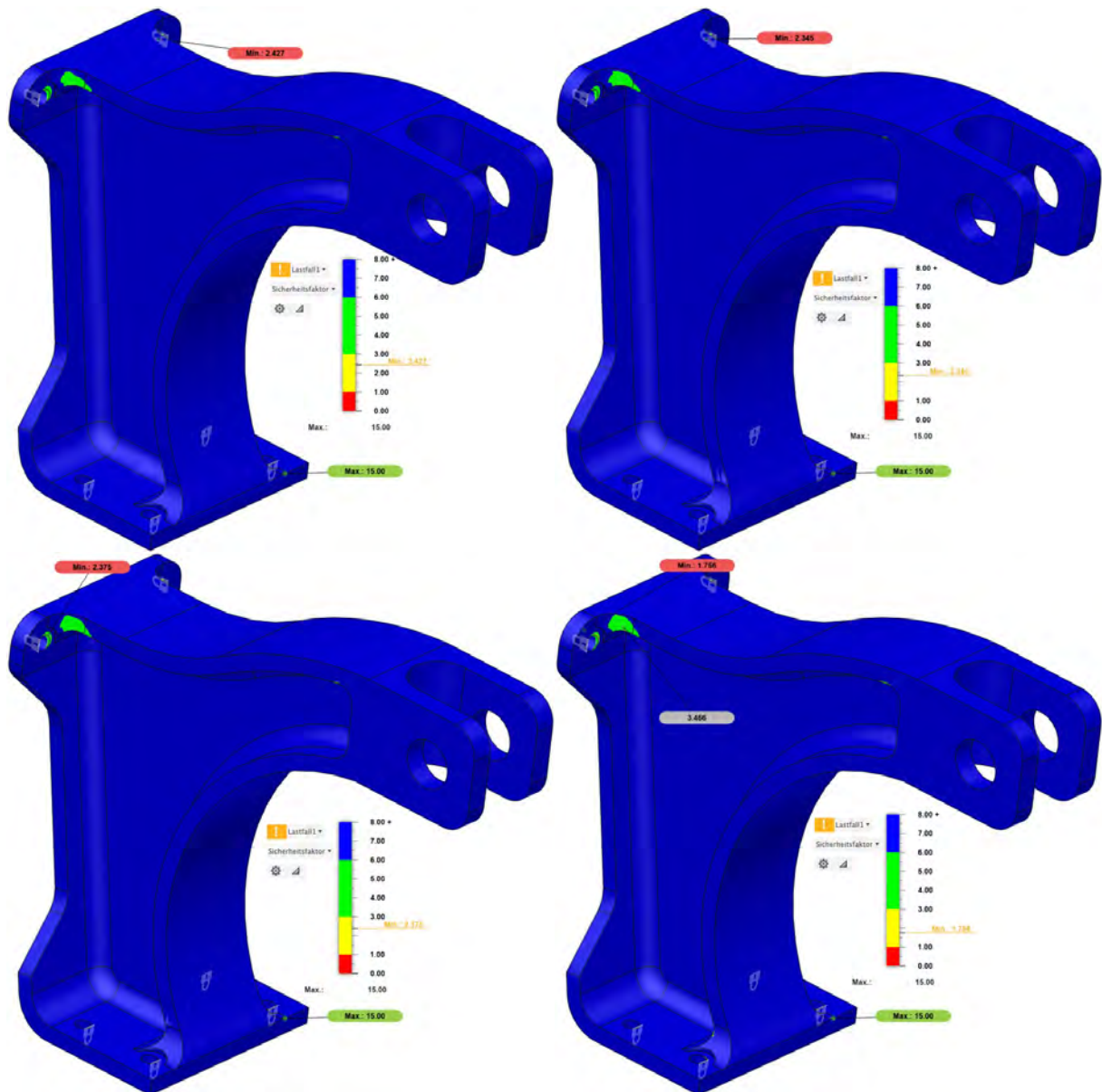
- ▢ Kraft11
- | Typ | Kraft |
|-------------------|-----------|
| Größe | 800.00 N |
| X-Wert | 0.00 N |
| Y-Wert | 800.00 N |
| Z-Wert | 0.00 N |
| X-Winkel | 0.0 deg |
| Y-Winkel | -90.0 deg |
| Z-Winkel | 0.0 deg |
| Richtung umkehren | Ja |
| Kraft pro Objekt | Nein |
- ▢ Ausgewählte Objekte



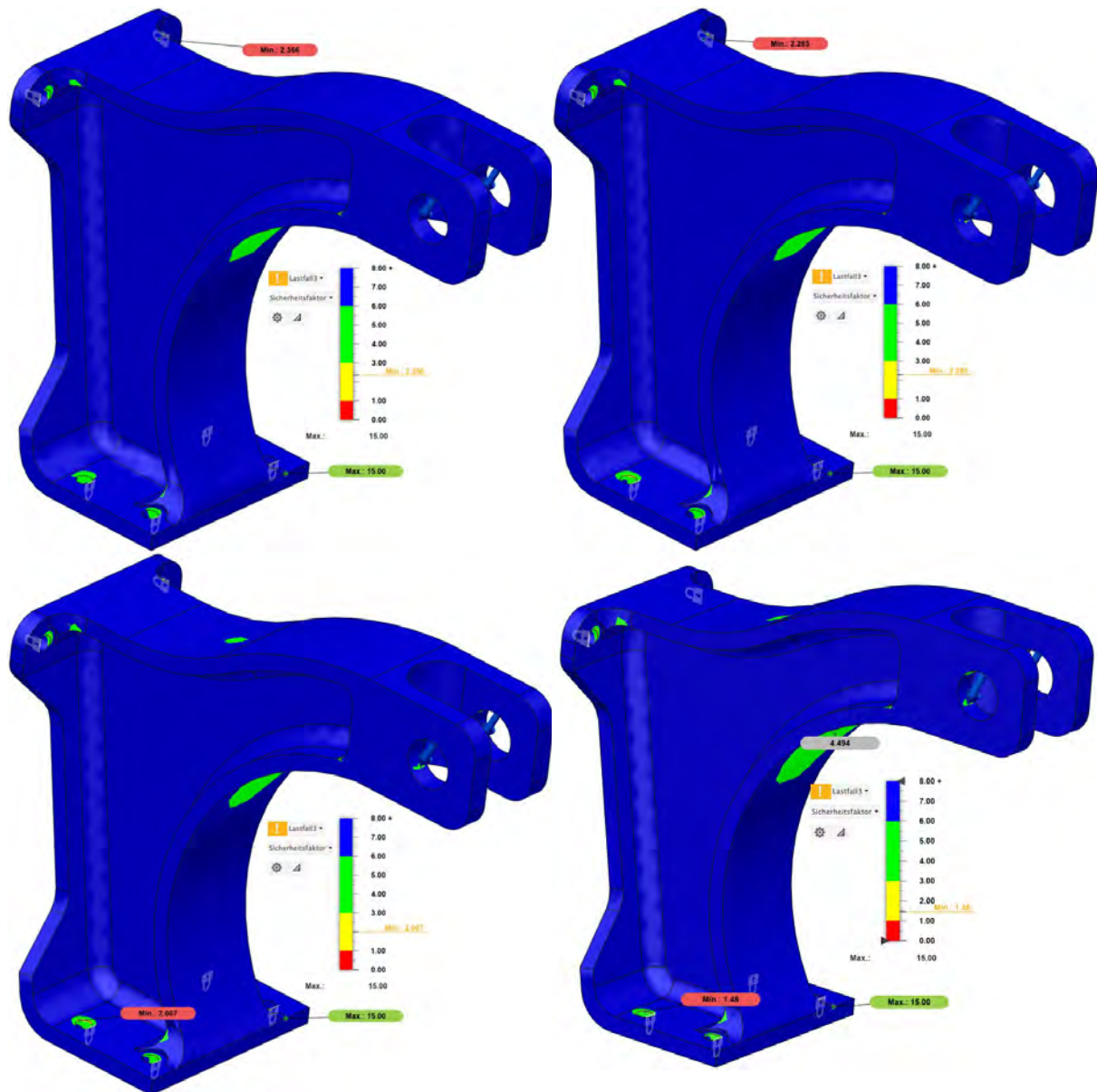
Anhang 60: FE-Analysebericht nicht optimiertes Bracket. Definition Lastfall 1 und 2



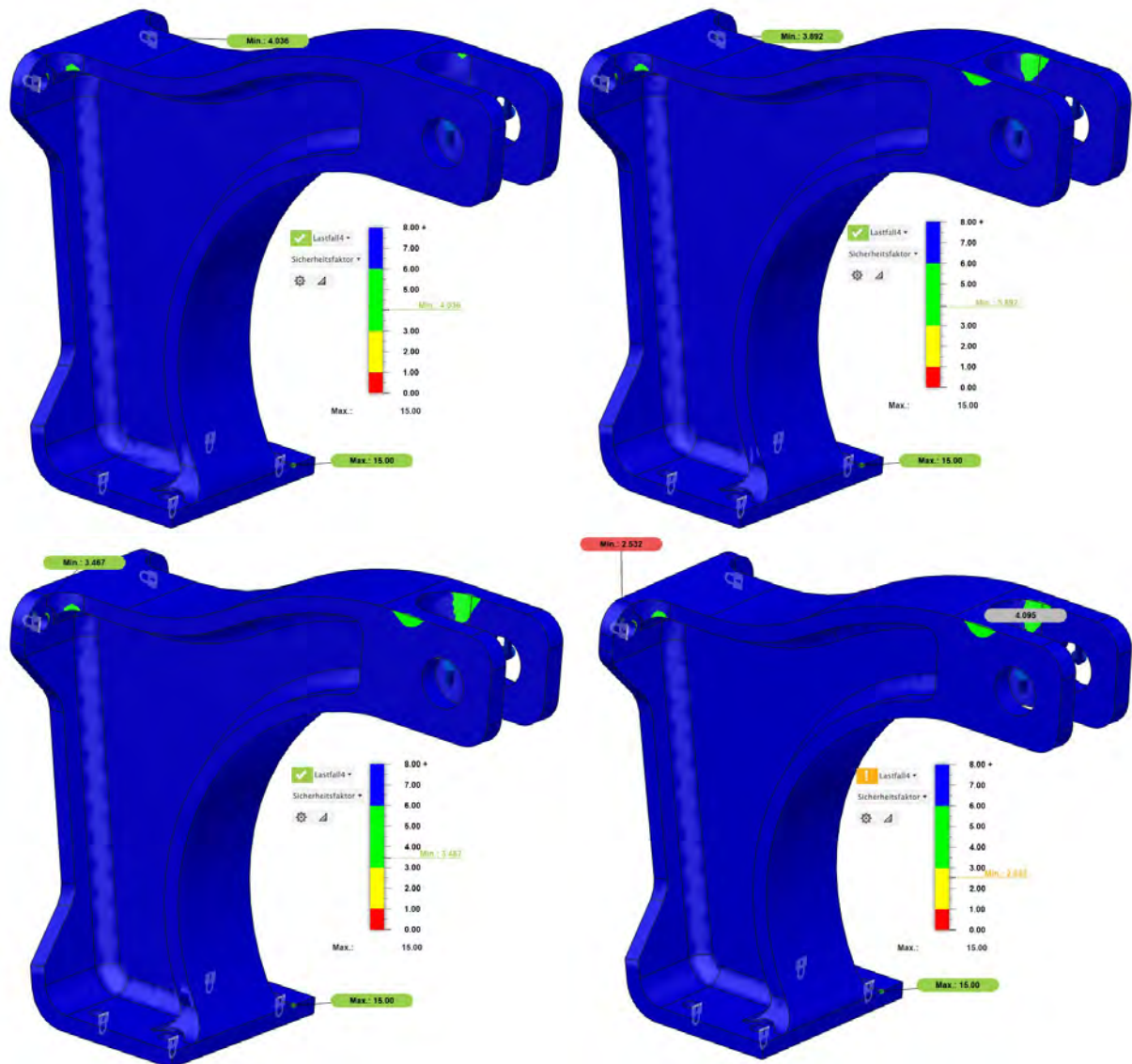
Anhang 61: FE-Analysebericht nicht optimiertes Bracket. Definition Lastfall 3 und 4



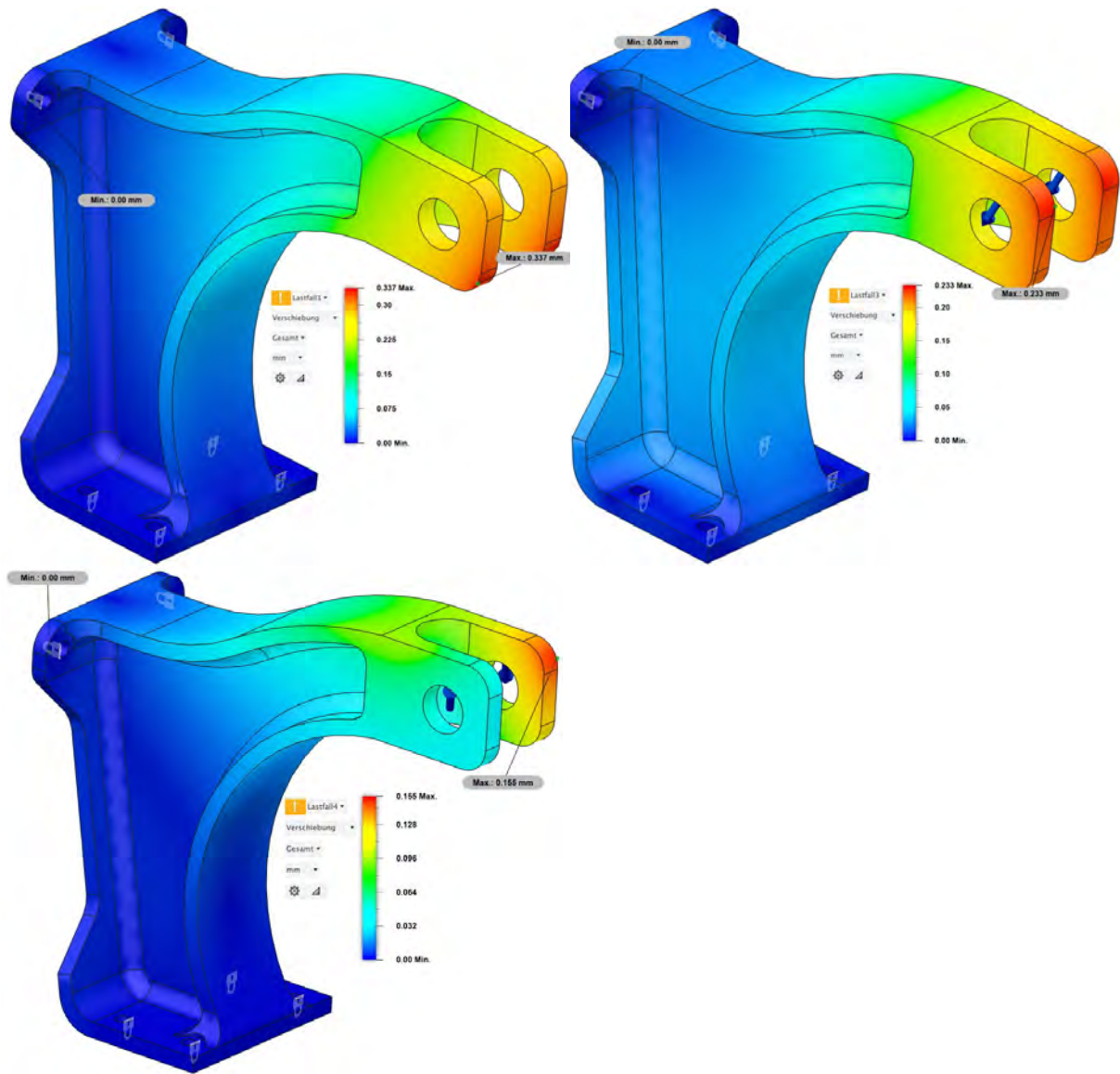
Anhang 62: FE-Analysebericht nicht optimiertes Bracket. Ergebnisse minimaler Sicherheitsfaktor Lastfall 1. Netz an den Einspannungen und Krafteinleitungen feiner werdend von oben links nach unten rechts. Minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt, minimaler Sicherheitsfaktor außerhalb der Einspannungen, falls abweichend, für die feinste Netzeinstellung in grau hinterlegt.



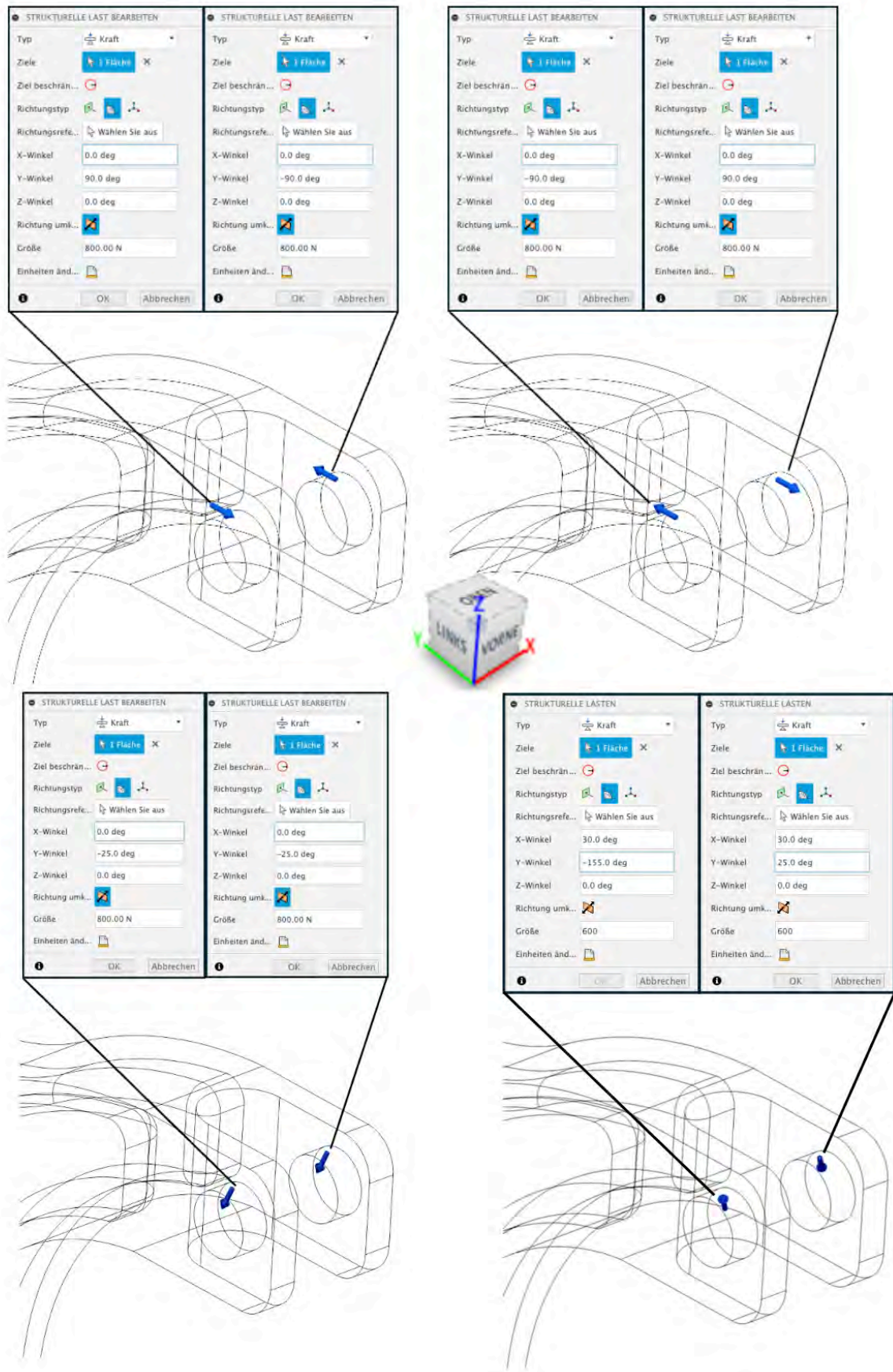
Anhang 63: FE-Analysebericht nicht optimiertes Bracket. Ergebnisse minimaler Sicherheitsfaktor Lastfall 3. Netz an den Einspannungen und Krafteinleitungen feiner werdend von oben links nach unten rechts. Minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt, minimaler Sicherheitsfaktor außerhalb der Einspannungen, falls abweichend, für die feinste Netzeinstellung in grau hinterlegt.



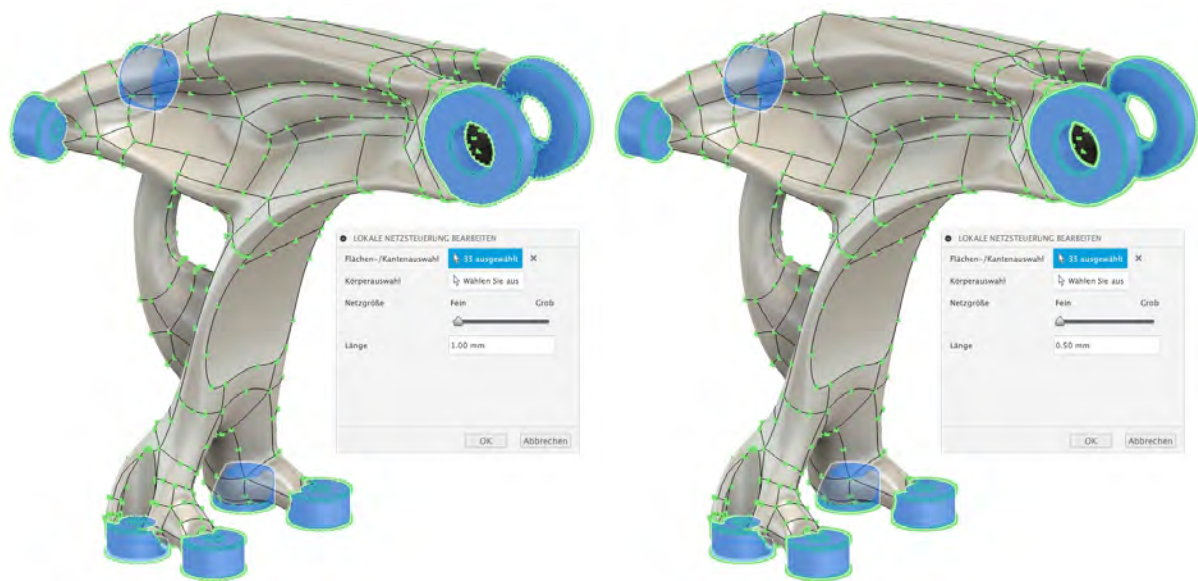
Anhang 64: FE-Analysebericht nicht optimiertes Bracket. Ergebnisse minimaler Sicherheitsfaktor Lastfall 4. Netz an den Einspannungen und Krafteinleitungen feiner werdend von oben links nach unten rechts. Minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt, minimaler Sicherheitsfaktor außerhalb der Einspannungen, falls abweichend, für die feinste Netzeinstellung in grau hinterlegt.



Anhang 65: FE-Analysebericht nicht optimiertes Bracket. Ergebnisse maximale Verschiebung. Lastfall 1, 3 und 4 von oben links nach unten rechts

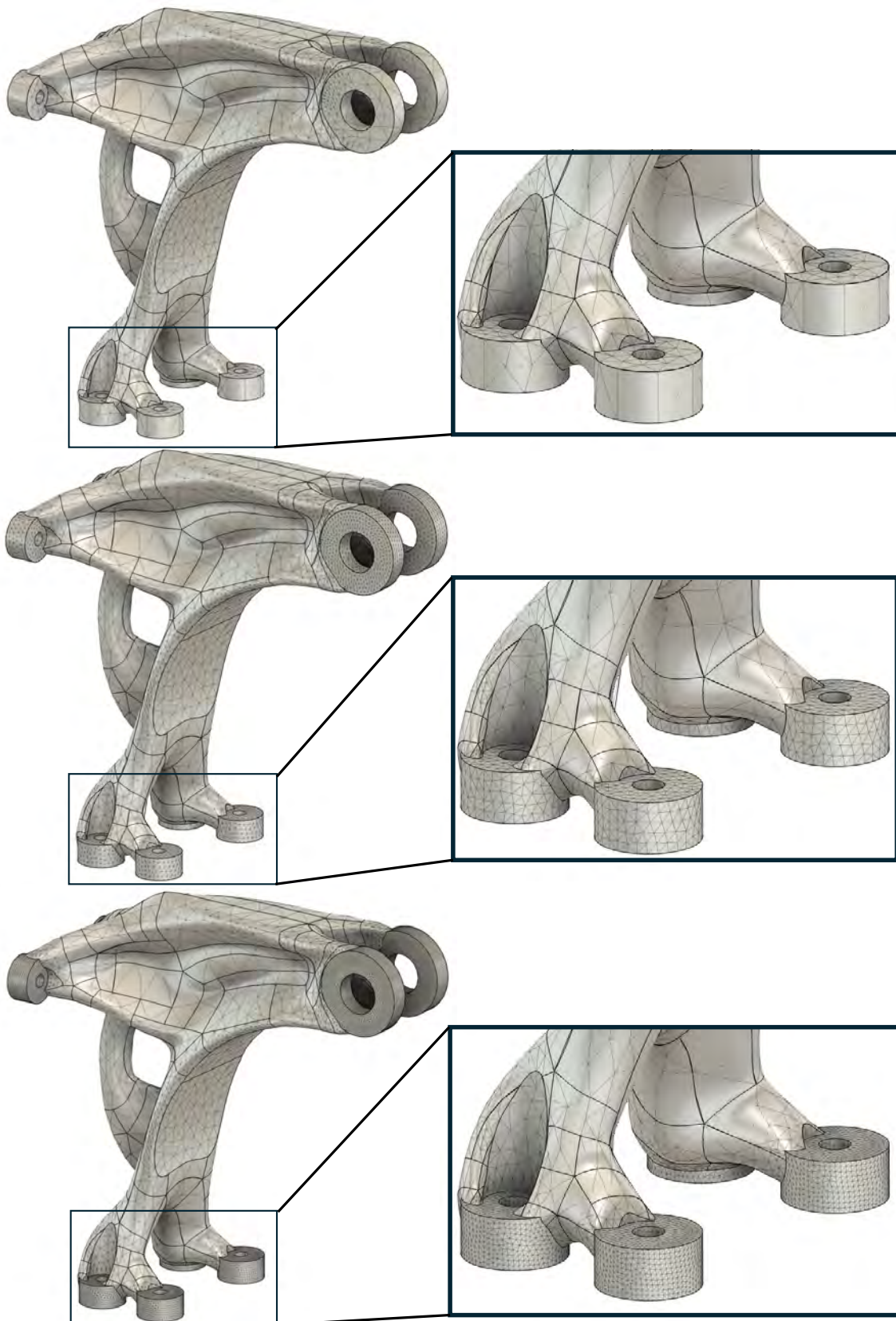


Anhang 66: Die vier Lastfälle in der FE-Analyse der Optimierungsergebnisse. 1-4 von oben links nach unten rechts

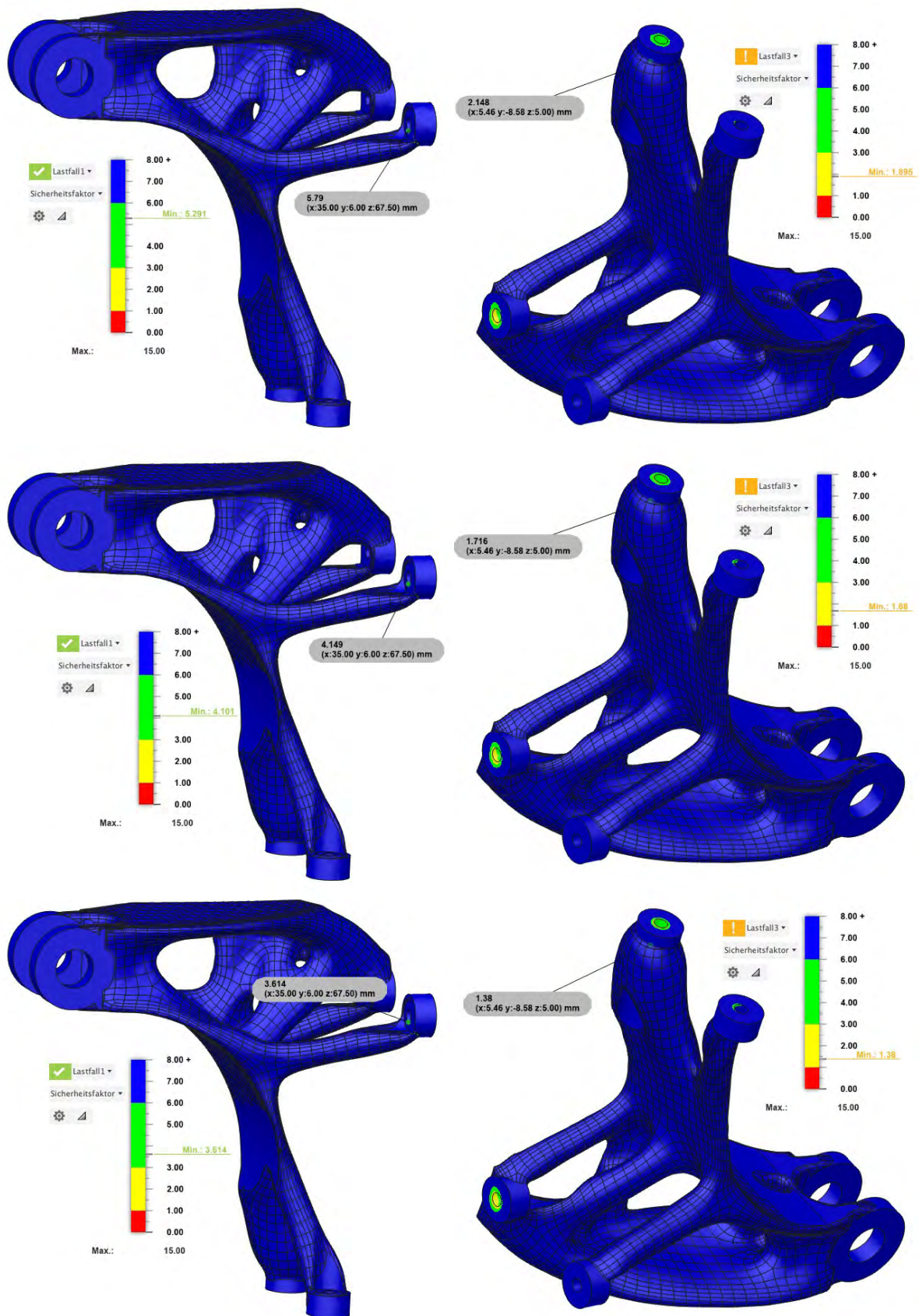


Anhang 67: Einstellungen für die Netzverfeinerung und dafür ausgewählte Flächen. Links Schritt 1, recht Schritt

2

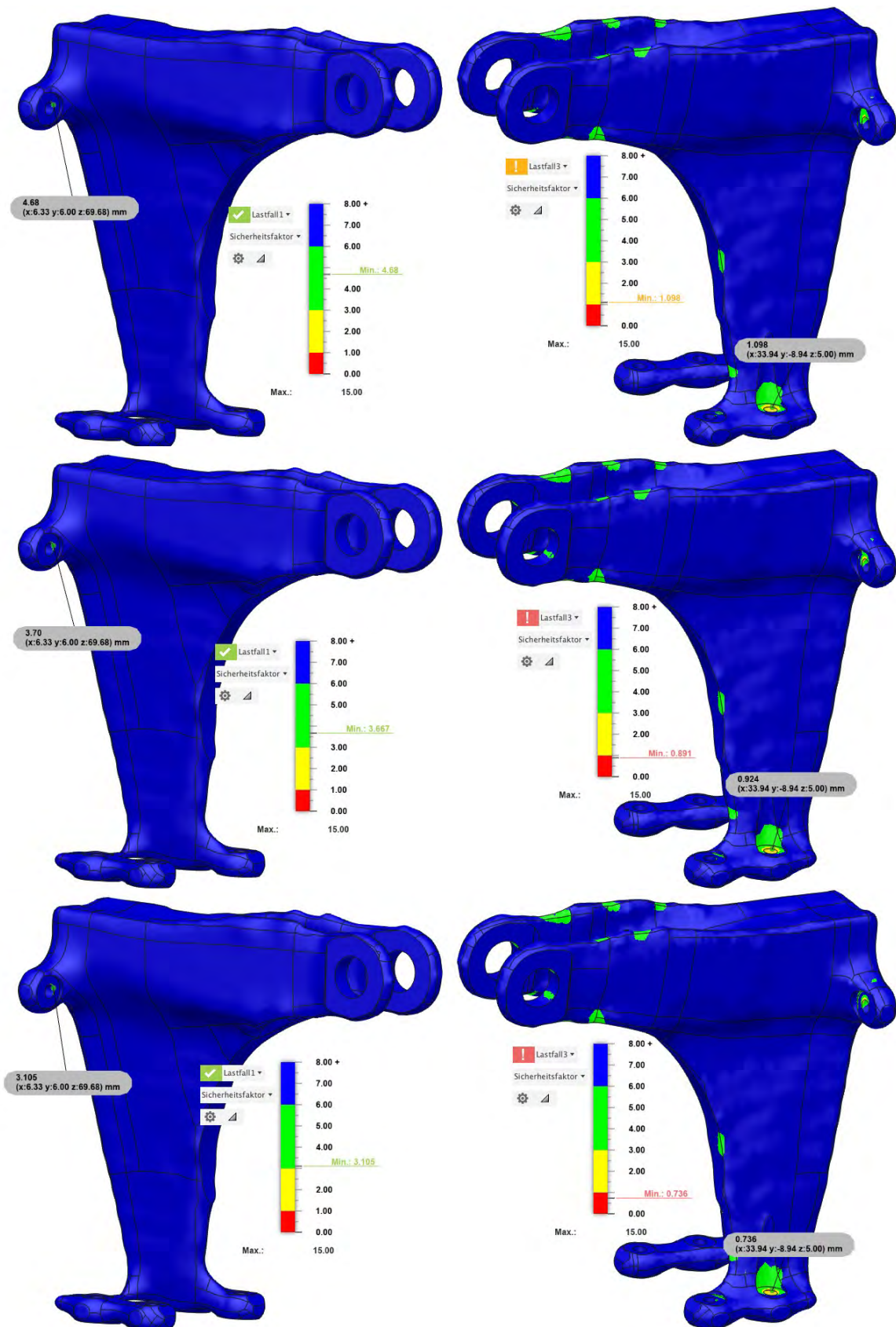


Anhang 68: Durchgeführte Netzverfeinerung. Von oben nach unten: Automatisch generiertes Netz, Netzverfeinerung auf 1 mm, Netzverfeinerung auf 0,5 mm

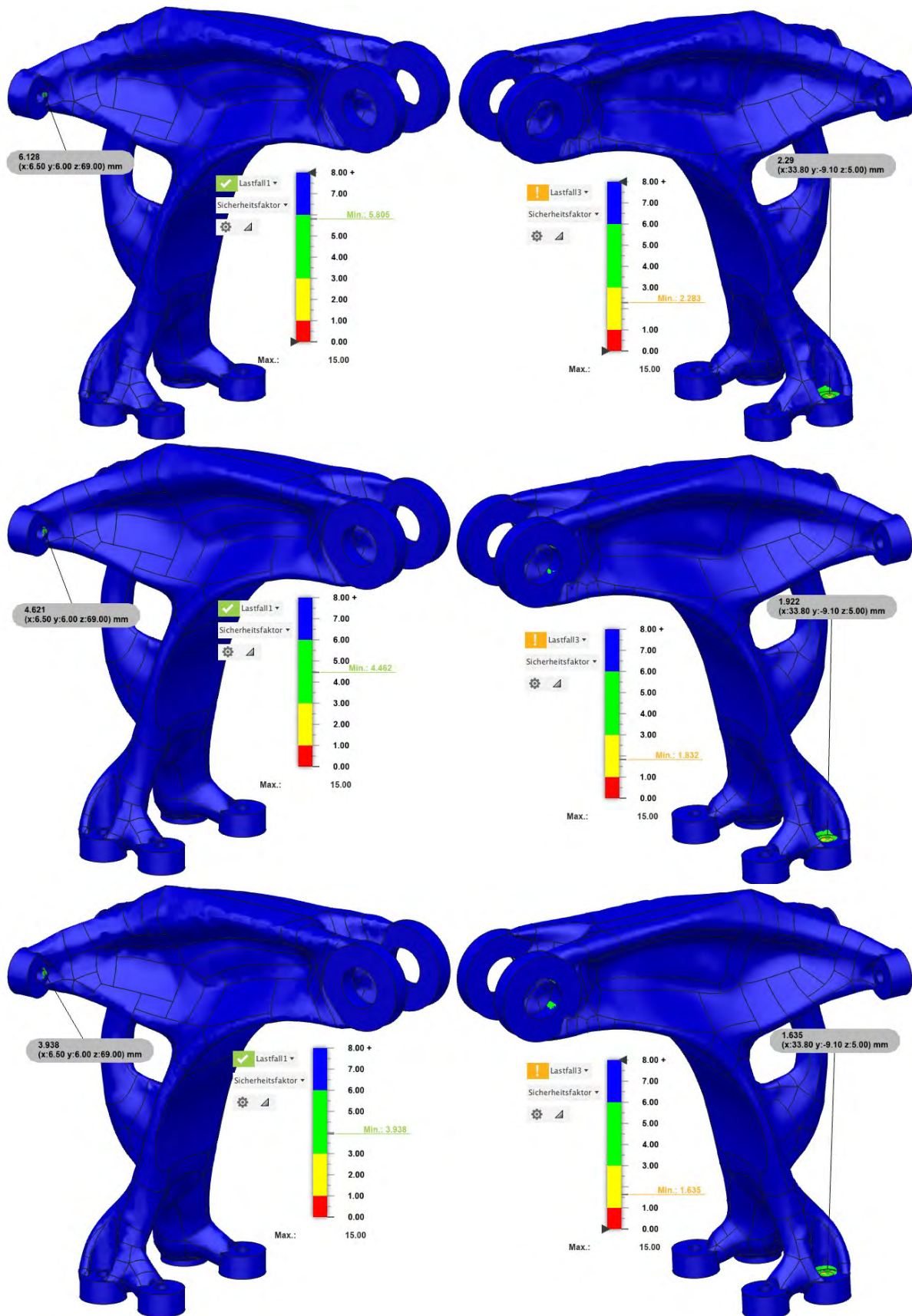


Anhang 69: Wahrscheinliche Singularitäten für die Optimierung Inspire X+, links Lastfall 1, rechts Lastfall 3.

Von oben nach unten verfeinertes Netz nach Anhang 67 und Anhang 68. In grau hinterlegt der stetig abnehmende minimale Sicherheitsfaktor.



Anhang 70: Wahrscheinliche Singularitäten für die Optimierung Apex Y-, links Lastfall 1, rechts Lastfall 3. Von oben nach unten verfeinertes Netz nach Anhang 67 und Anhang 68. In grau hinterlegt der stetig abnehmende minimale Sicherheitsfaktor.

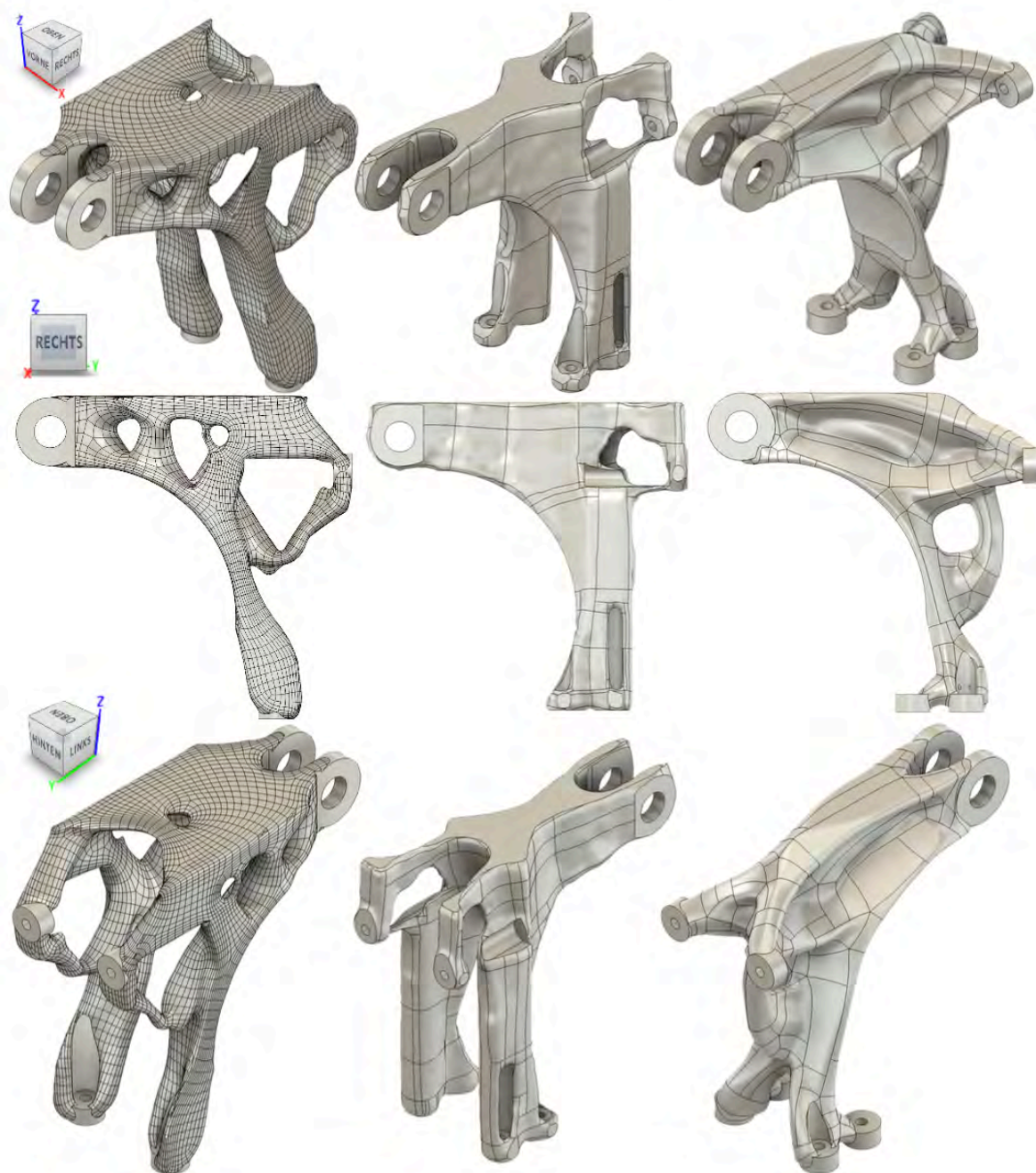


Anhang 71: Wahrscheinliche Singularitäten für die Optimierung Fusion Z-, links Lastfall 1, rechts Lastfall 3.

Von oben nach unten verfeinertes Netz nach Anhang 67 und Anhang 68. In grau hinterlegt der stetig abnehmende minimale Sicherheitsfaktor.



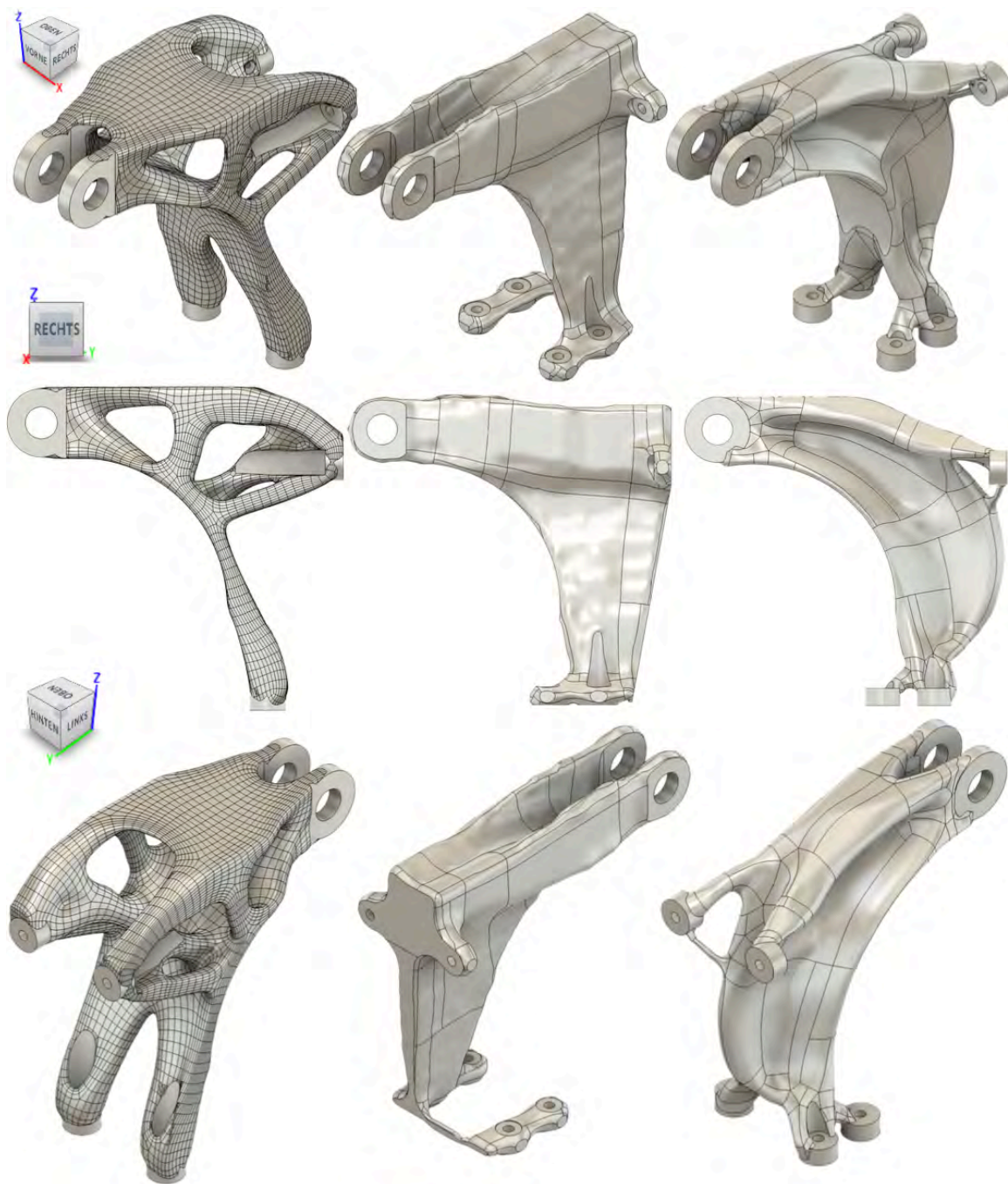
Anhang 72: Nicht zusammenhängende Optimierungsergebnisse. Von oben links nach unten rechts: Inspire Z-, Inspire Z+, Inspire Y-, Inspire X+, Fusion X+



Anhang 73: Optimierungsergebnisse Druckrichtung Z-



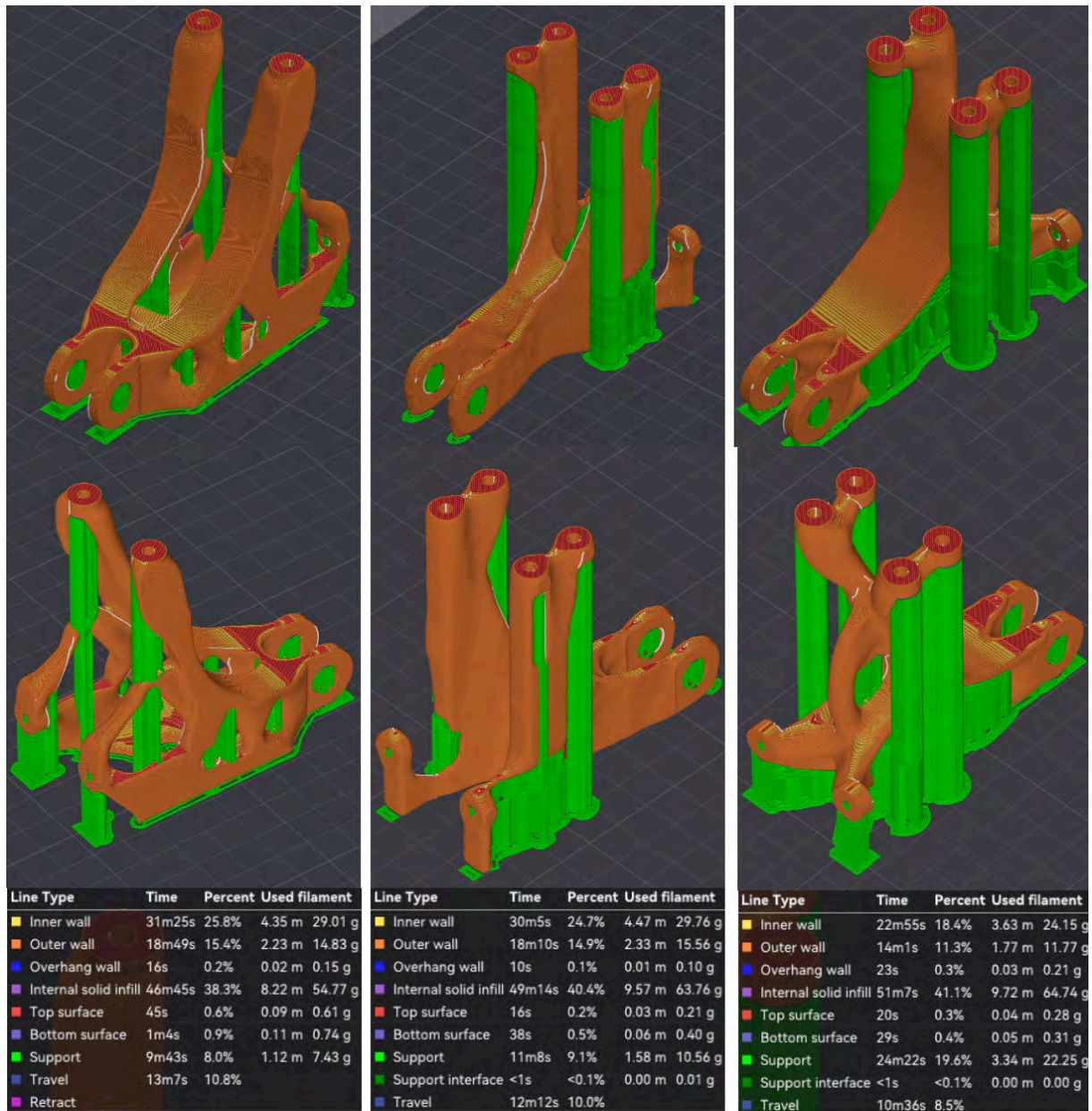
Anhang 74: Optimierungsergebnisse Druckrichtung Z+



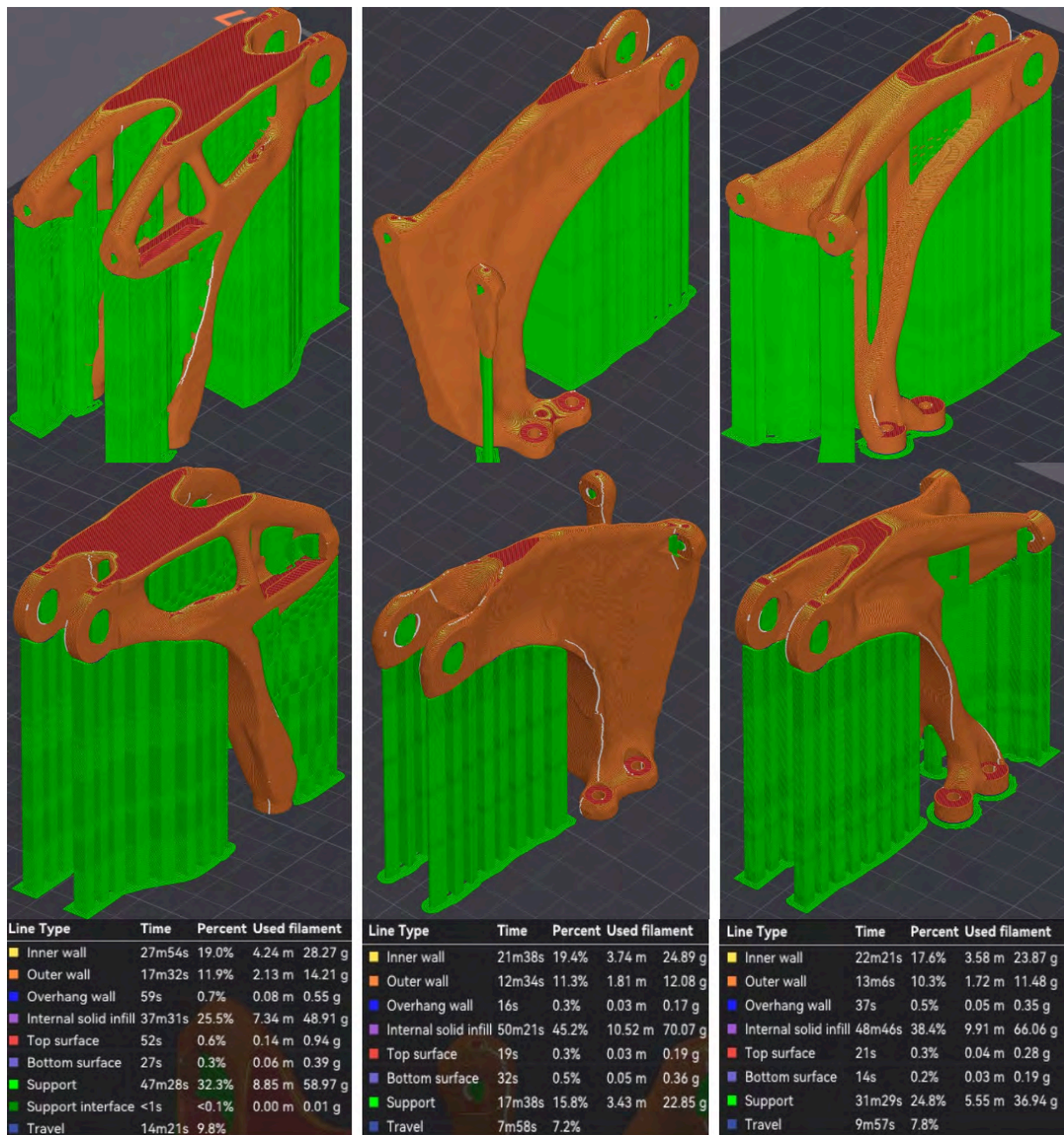
Anhang 75: Optimierungsergebnisse Druckrichtung Y-



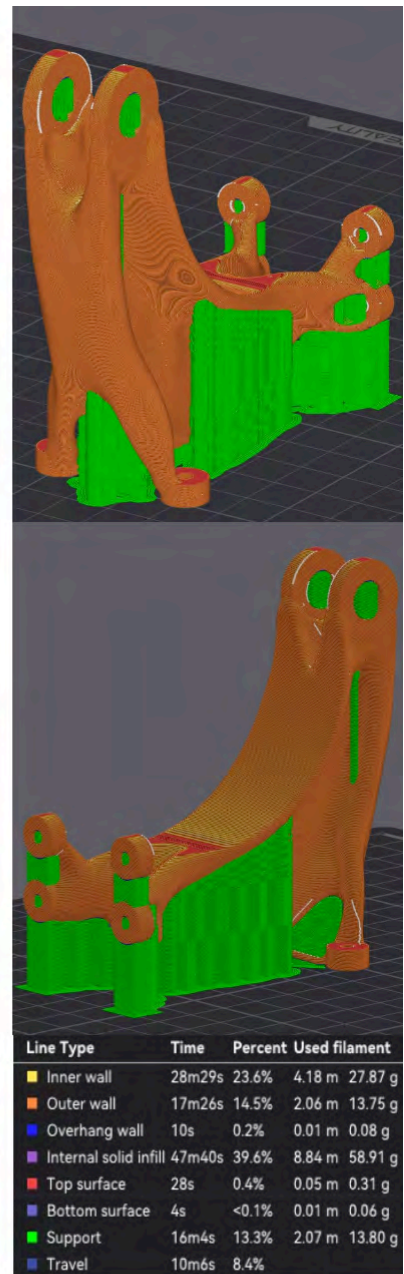
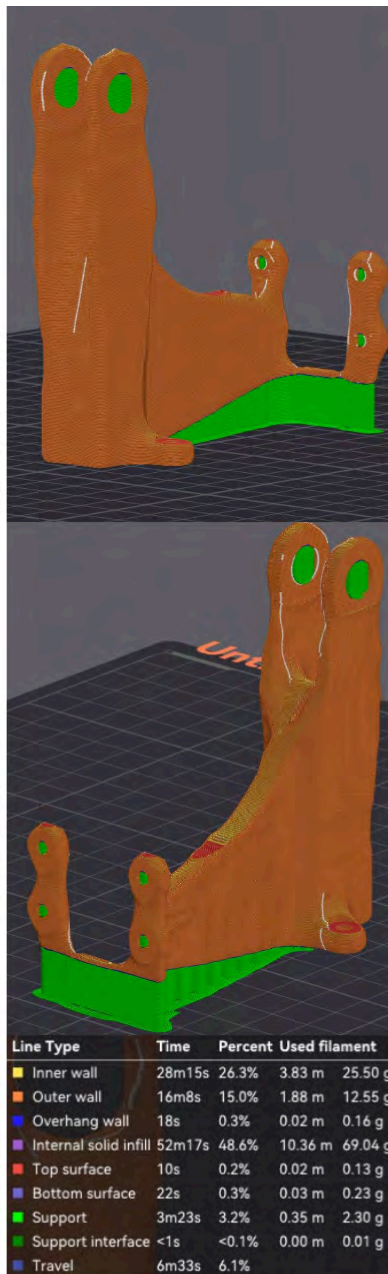
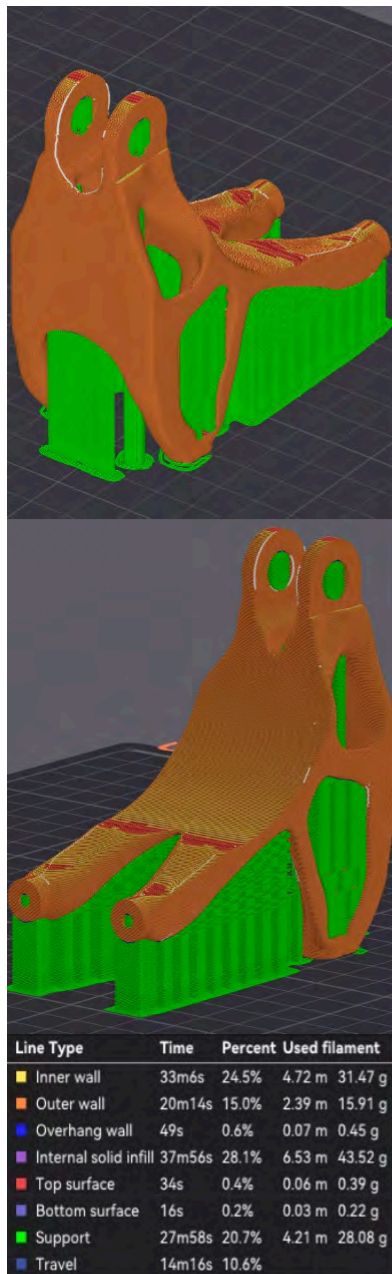
Anhang 76: Optimierungsergebnisse Druckrichtung X+



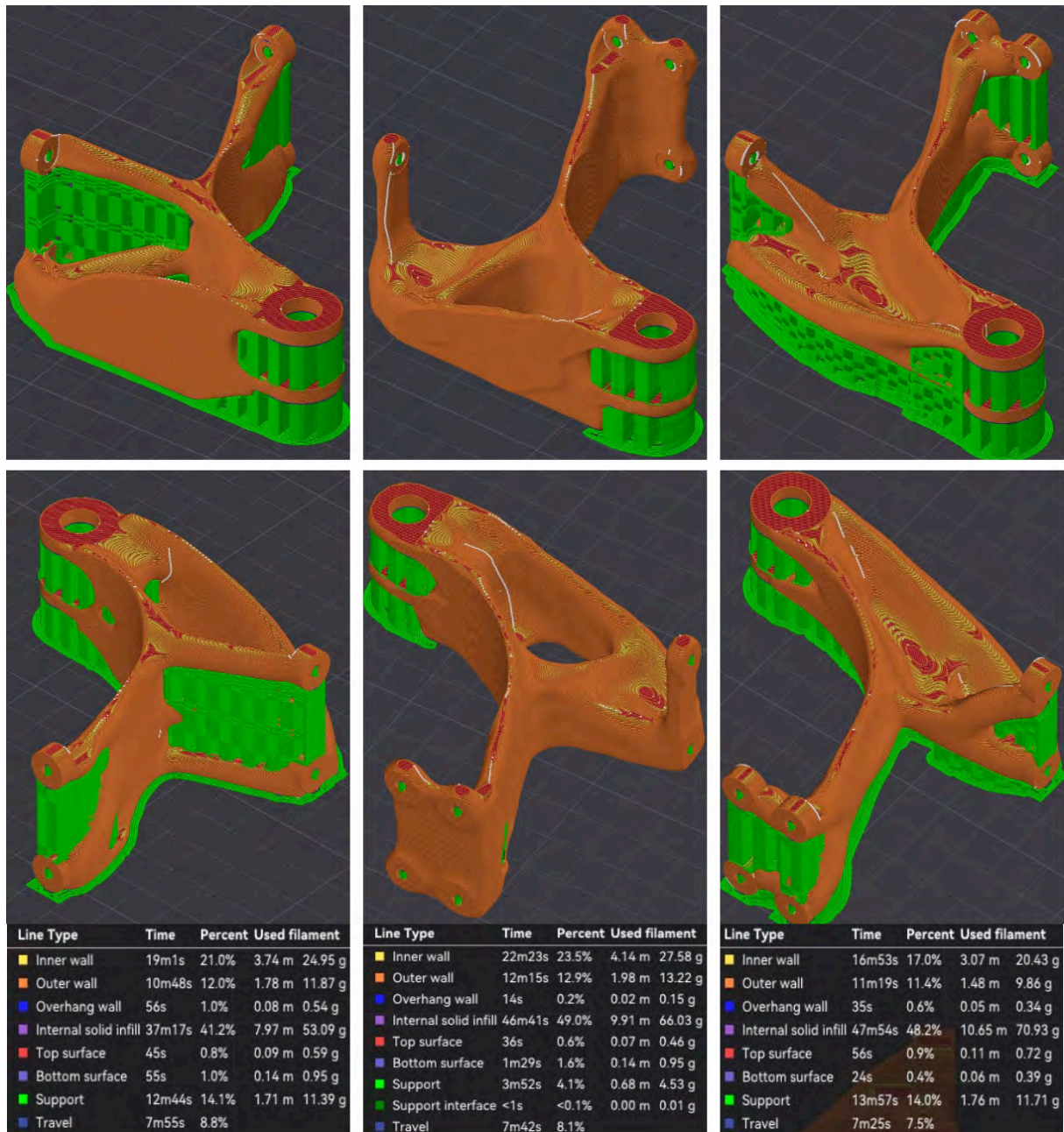
Anhang 77: Supportgeometrien des optimierten Brackets, Druckrichtung Z-



Anhang 78: Supportgeometrien des optimierten Brackets, Druckrichtung Z+



Anhang 79: Supportgeometrien des optimierten Brackets, Druckrichtung Y-



Anhang 80: Supportgeometrien des optimierten Brackets, Druckrichtung X+

Studienbericht

Analysierte Datei	Final 45° Z- 106 Gramm v7
Version	Autodesk Fusion (2.0.20256)
Erstellungsdatum	2024-10-03, 12:55:31
Autor	Jonasschlag

Berichtseigenschaften

Titel	Studien
Autor	Jonasschlag

Simulationsmodell 1

grob

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-19, 15:22:49

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper21	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	26659	15478

mittel

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-19, 13:10:35

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper21	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	50838	29162

Lokales Netz:1

Elementgröße	1.00 mm
--------------	---------

Ausgewählte Objekte



fein

Eigenschaften der Studie

Studientyp	Statische Spannung
Letztes Änderungsdatum	2024-09-19, 13:11:17

Einstellungen

Allgemein

Kontakttoleranz	0.10 mm
Modi für starren Körper entfernen	Nein

Netz

Durchschnittl. Elementgröße (% der Modellgröße)	
Volumenkörper	10
Netzgröße pro Bauteil skalieren	Nein
Durchschnittliche Elementgröße (absoluter Wert)	-
Elementordnung	Parabolisch
Bogenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Max. Drehwinkel auf Kurven (Grad)	60
Max. Größenverhältnis benachbarter Netze	1.5
Max. Seitenverhältnis	10
Minimale Elementgröße (% der durchschnittlichen Größe)	20

Verfeinerung adaptiver Netze

Anzahl der Verfeinerungsschritte	0
Konvergenztoleranz für Ergebnisse (%)	20
Teil der zu verfeinernden Elemente (%)	10
Ergebnisse für Basisliniengenauigkeit	von Mises-Spannung

Materialien

Komponente	Material	Sicherheitsfaktor
Körper21	Aluminium 3.1354T351	Streckgrenze

Aluminium 3.1354T351

Dichte	2.770E-06 kg / mm ³
Elastizitätsmodul	73000.00 MPa
Querdehnung	0.33
Streckgrenze	310.00 MPa
Zugfestigkeit	425.00 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0.18 W / (mm C)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	2.280E-05 / C
Spezifische Wärme	896.00 J / (kg C)

Kontakte

Netz

Typ	Knoten	Elemente
Volumenkörper	148302	88660

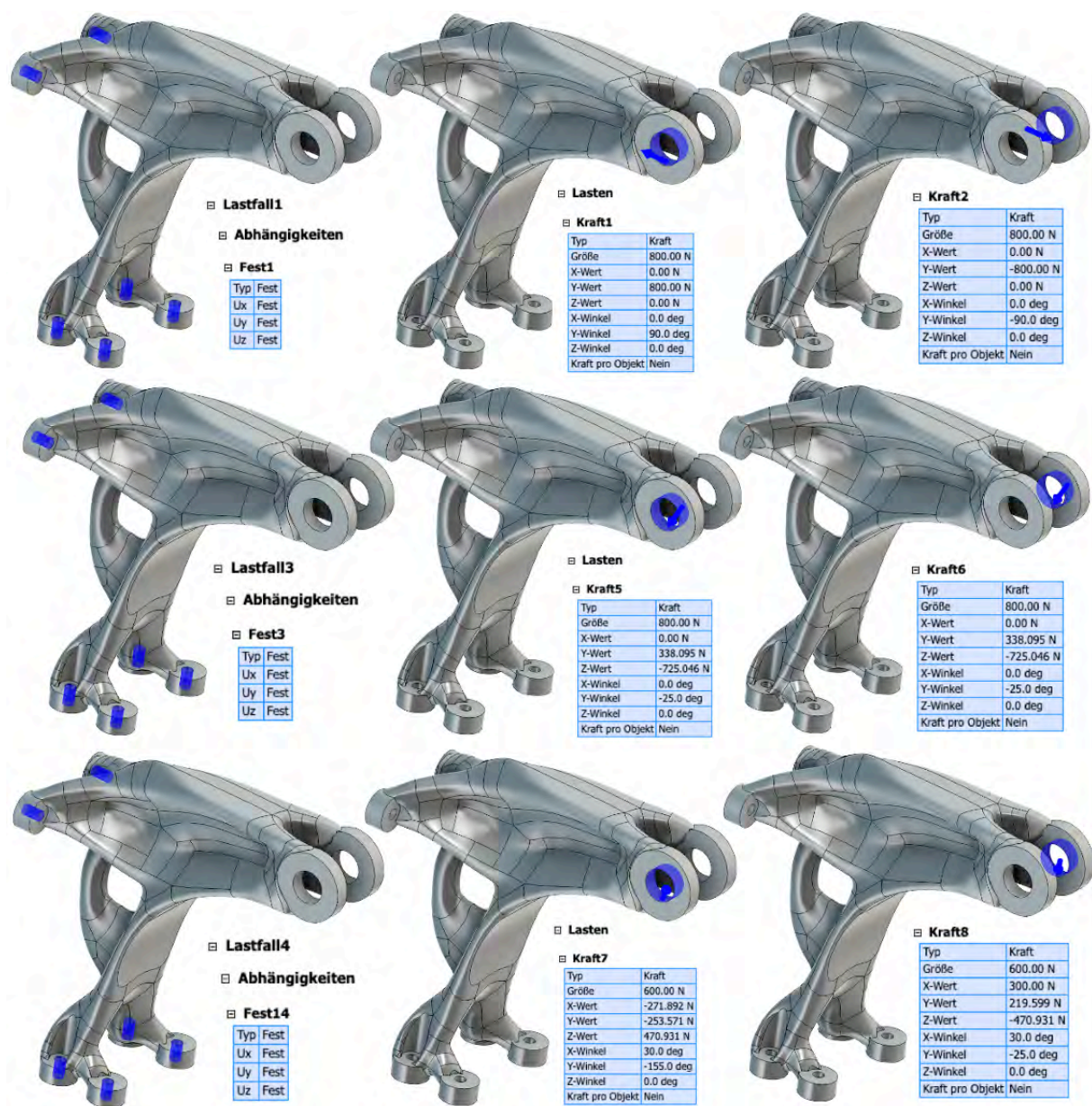
Lokales Netz:1

Elementgröße	0.50 mm
--------------	---------

Ausgewählte Objekte

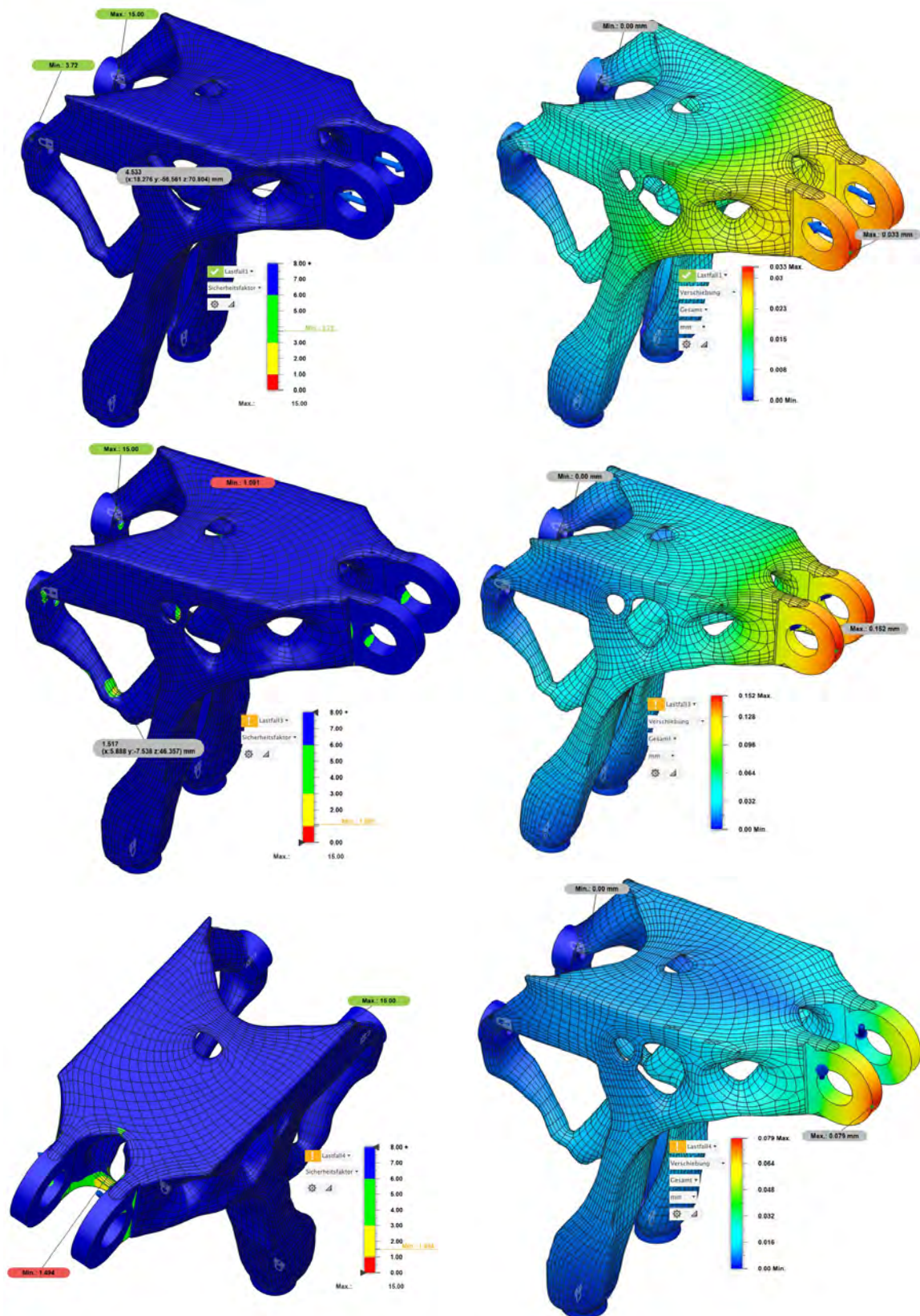


Anhang 81: Einstellungen der FE-Analysen am Beispiel der Optimierung Fusion Z-



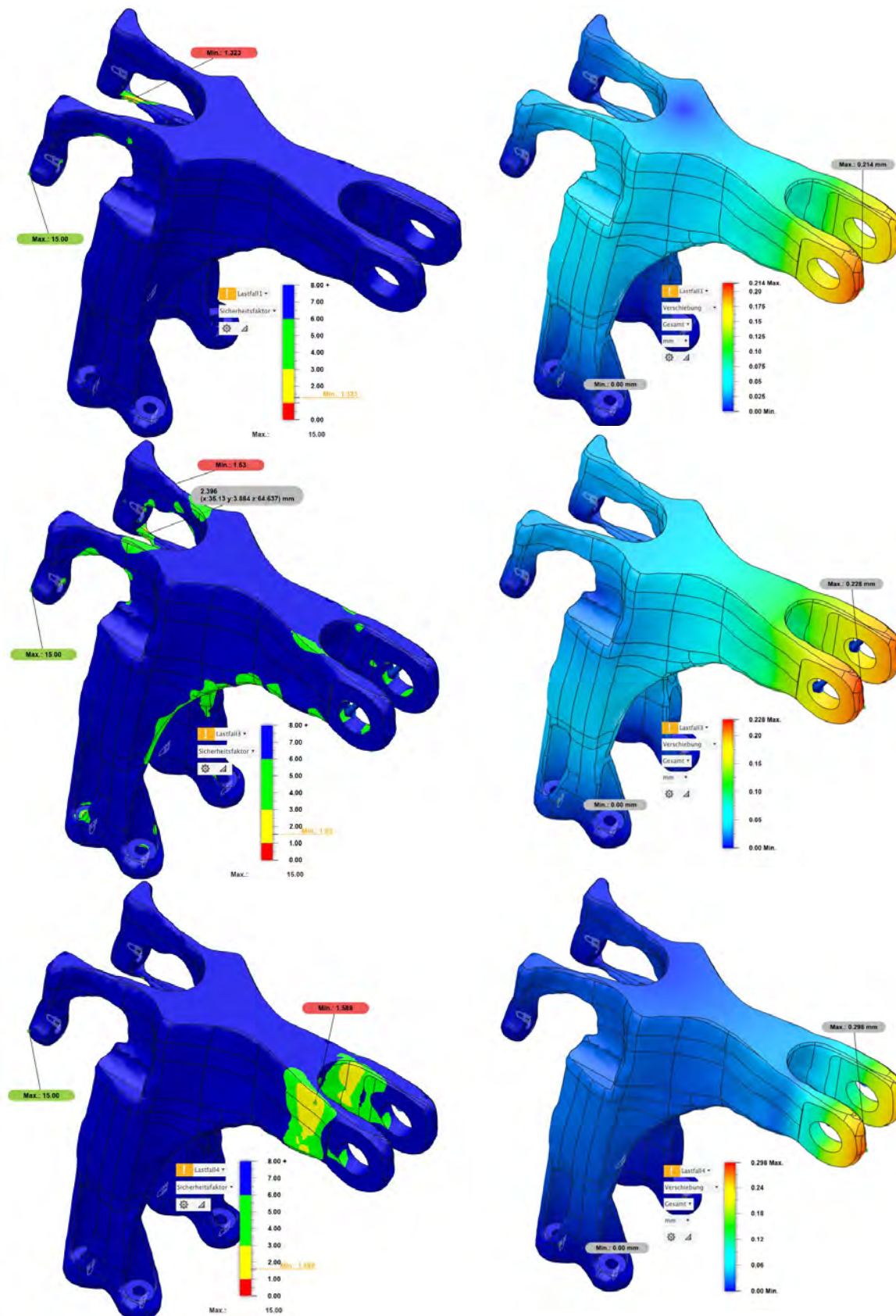
Anhang 82: Definition der Lastfälle für die FE-Analysen am Beispiel der Optimierung Fusion Z-. Von oben nach unten Lastfall 1, 3, 4.

Optimierung Inspire Z-



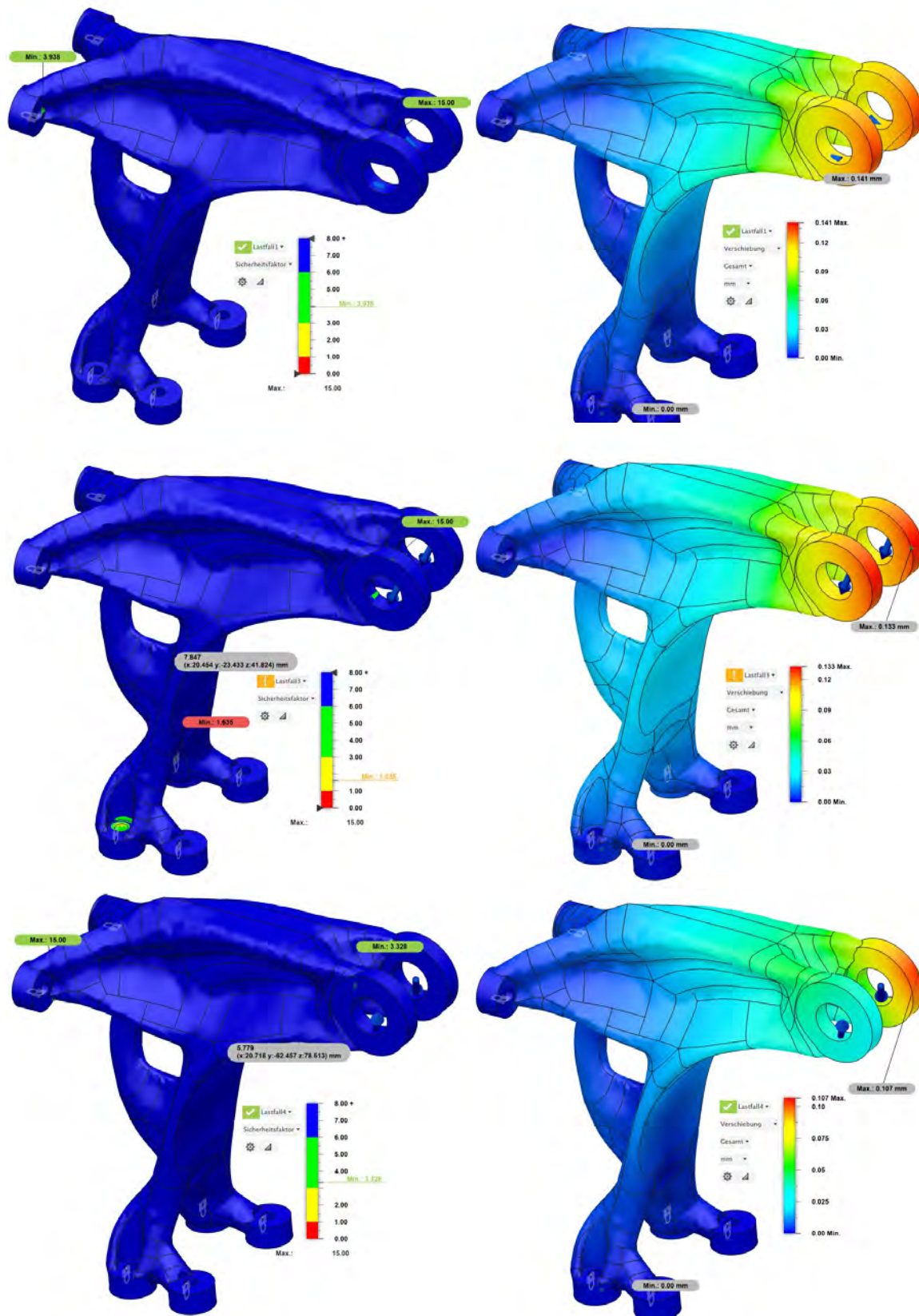
Anhang 83: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Apex Z-



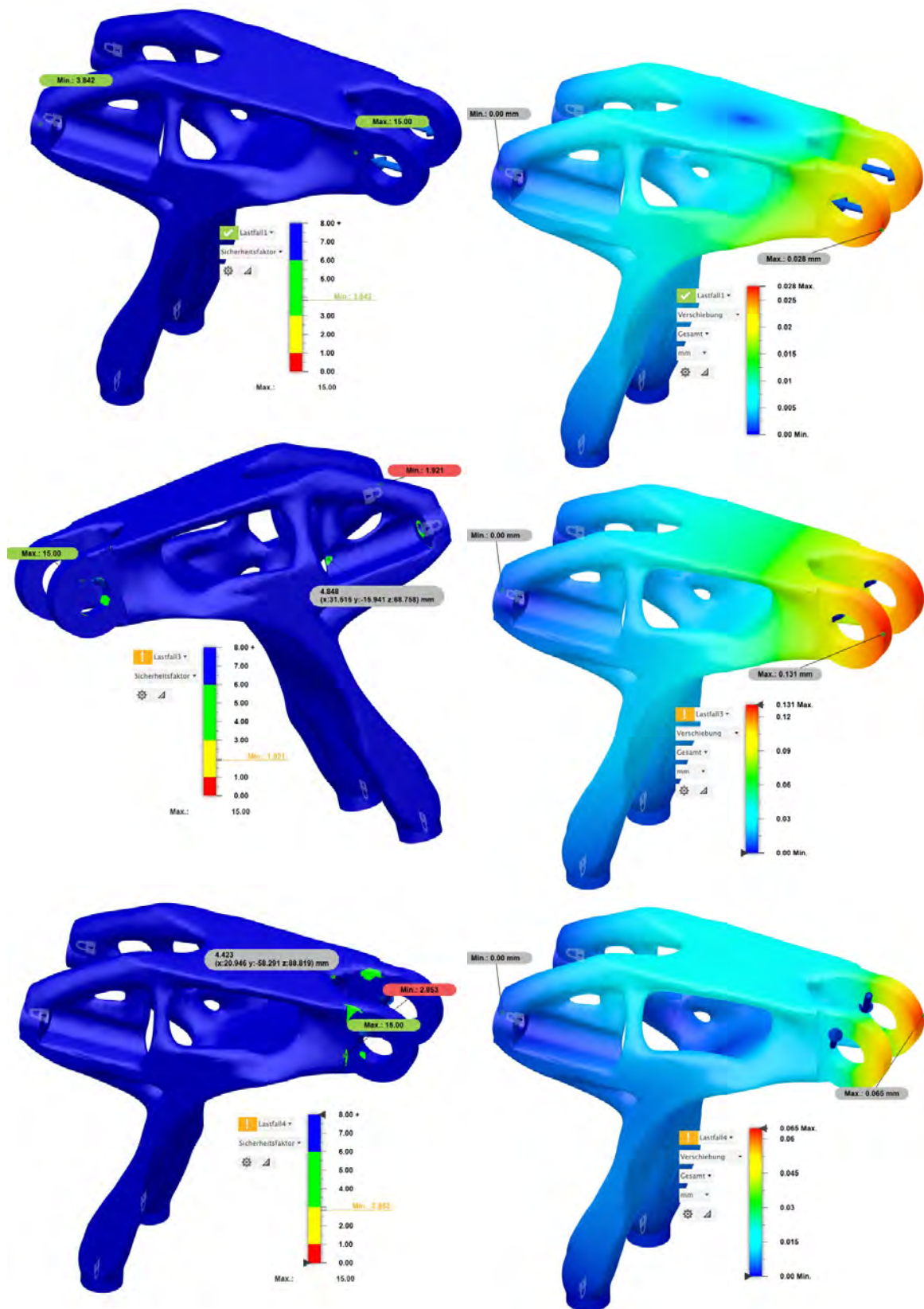
Anhang 84: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Fusion Z-



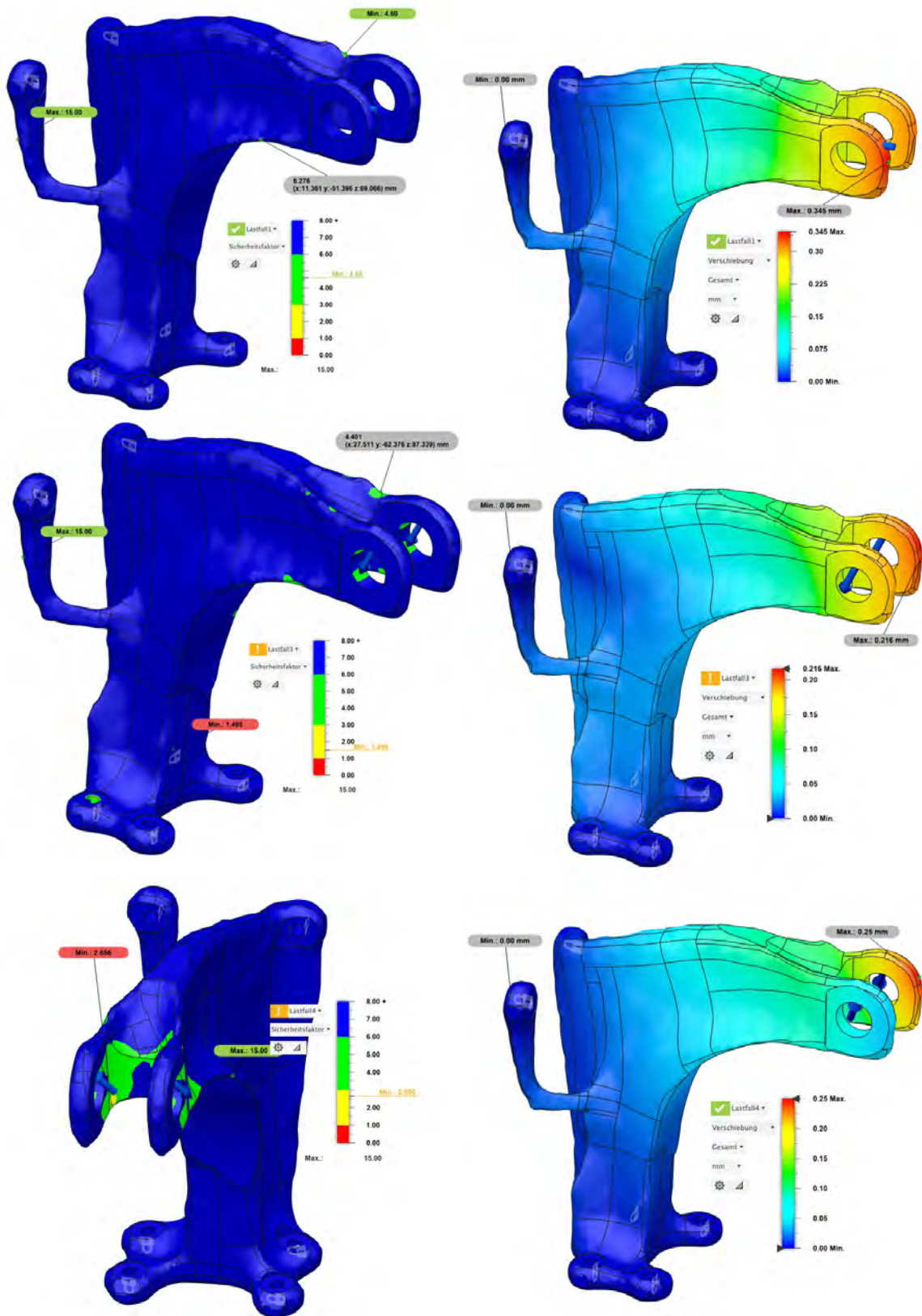
Anhang 85: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Inspire Z+



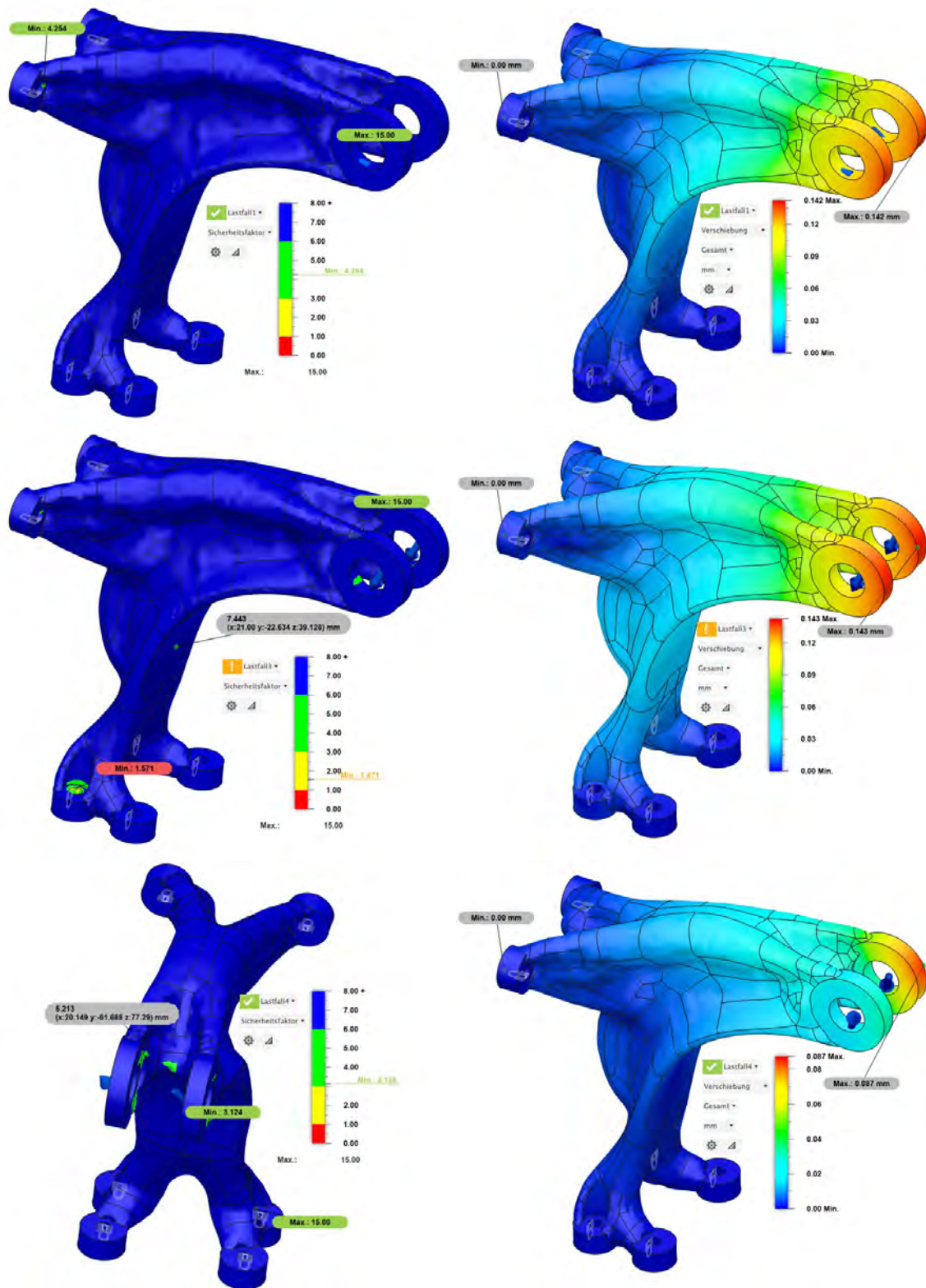
Anhang 86: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Apex Z+



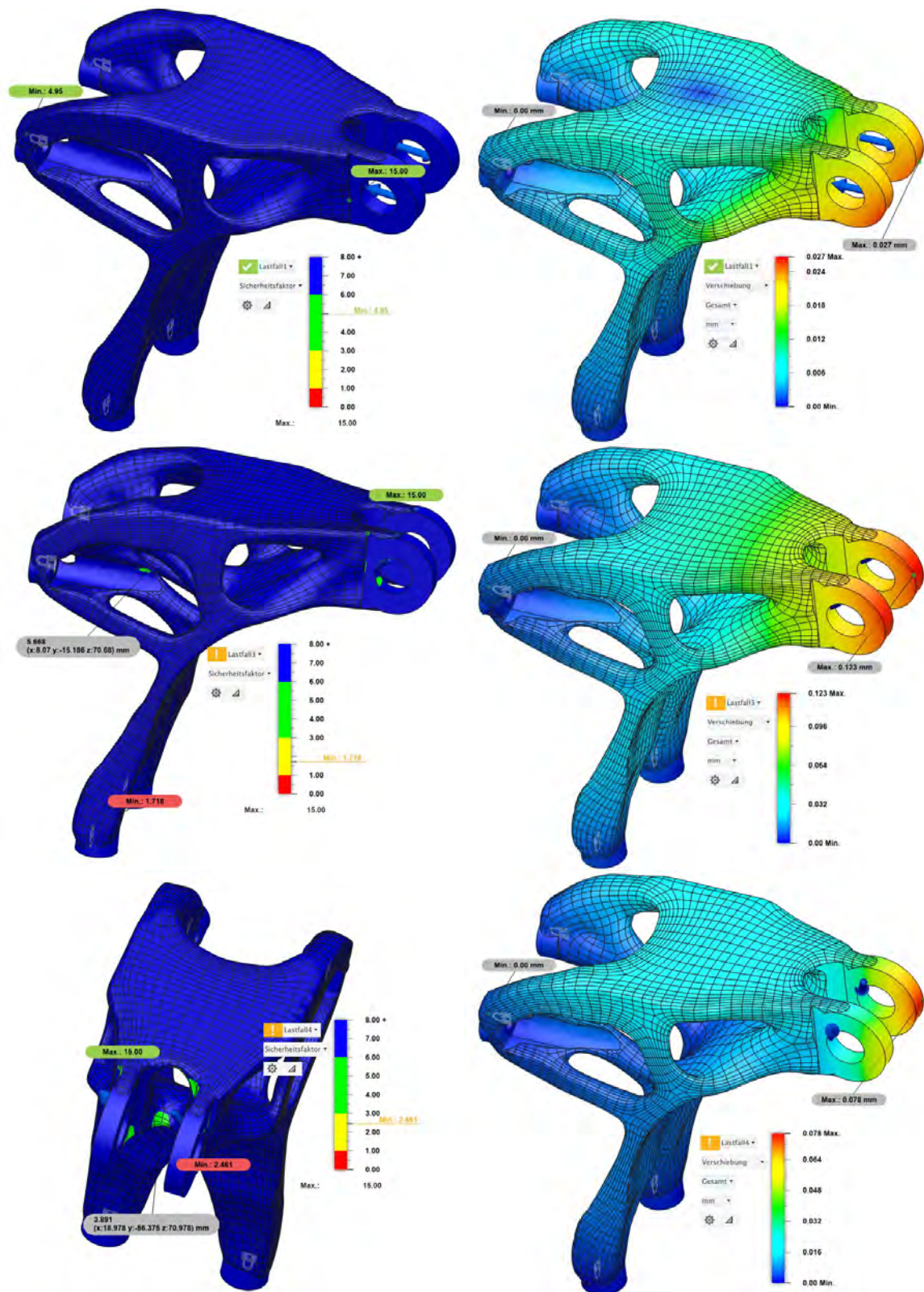
Anhang 87: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Fusion Z+



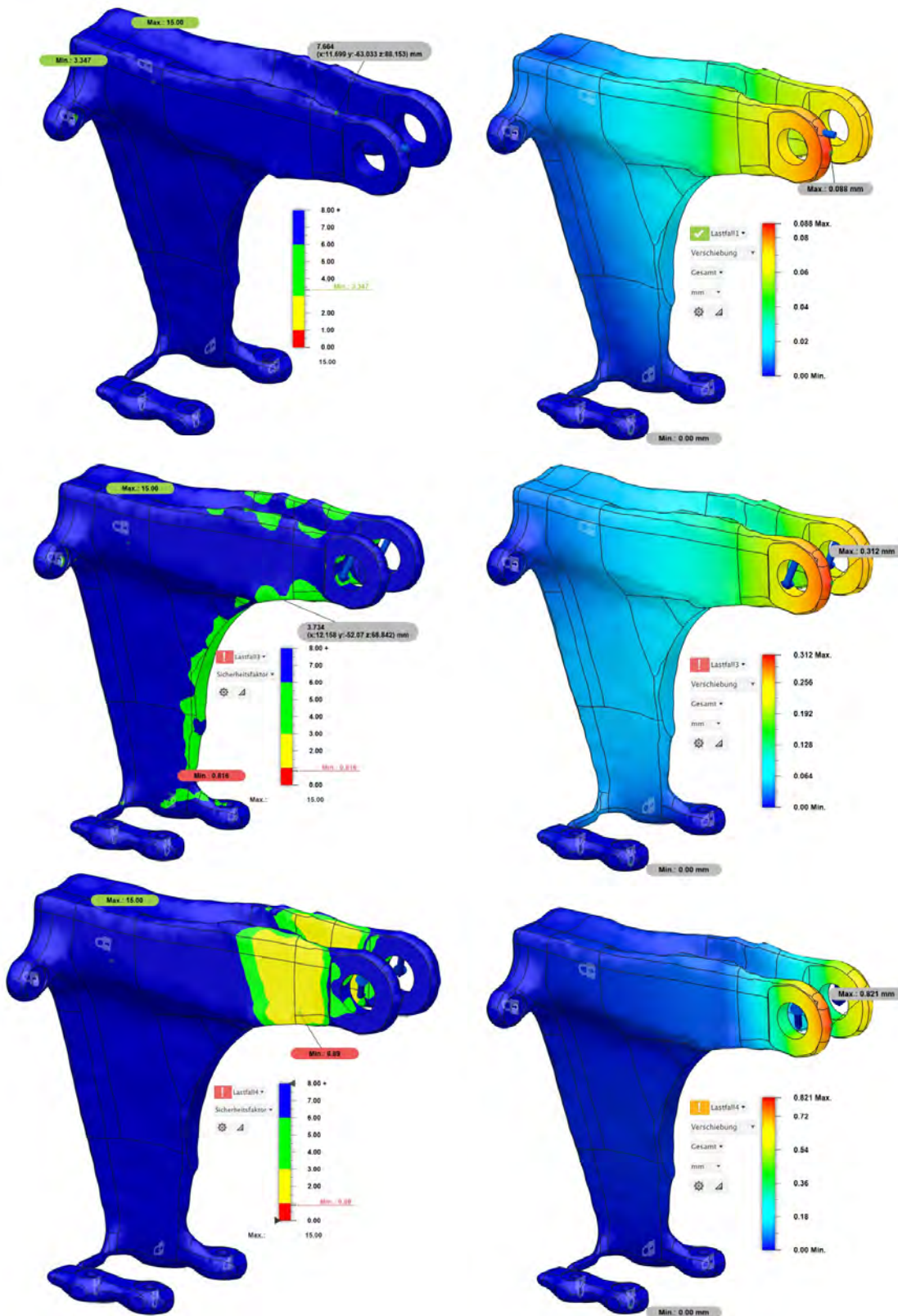
Anhang 88: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Inspire Y-



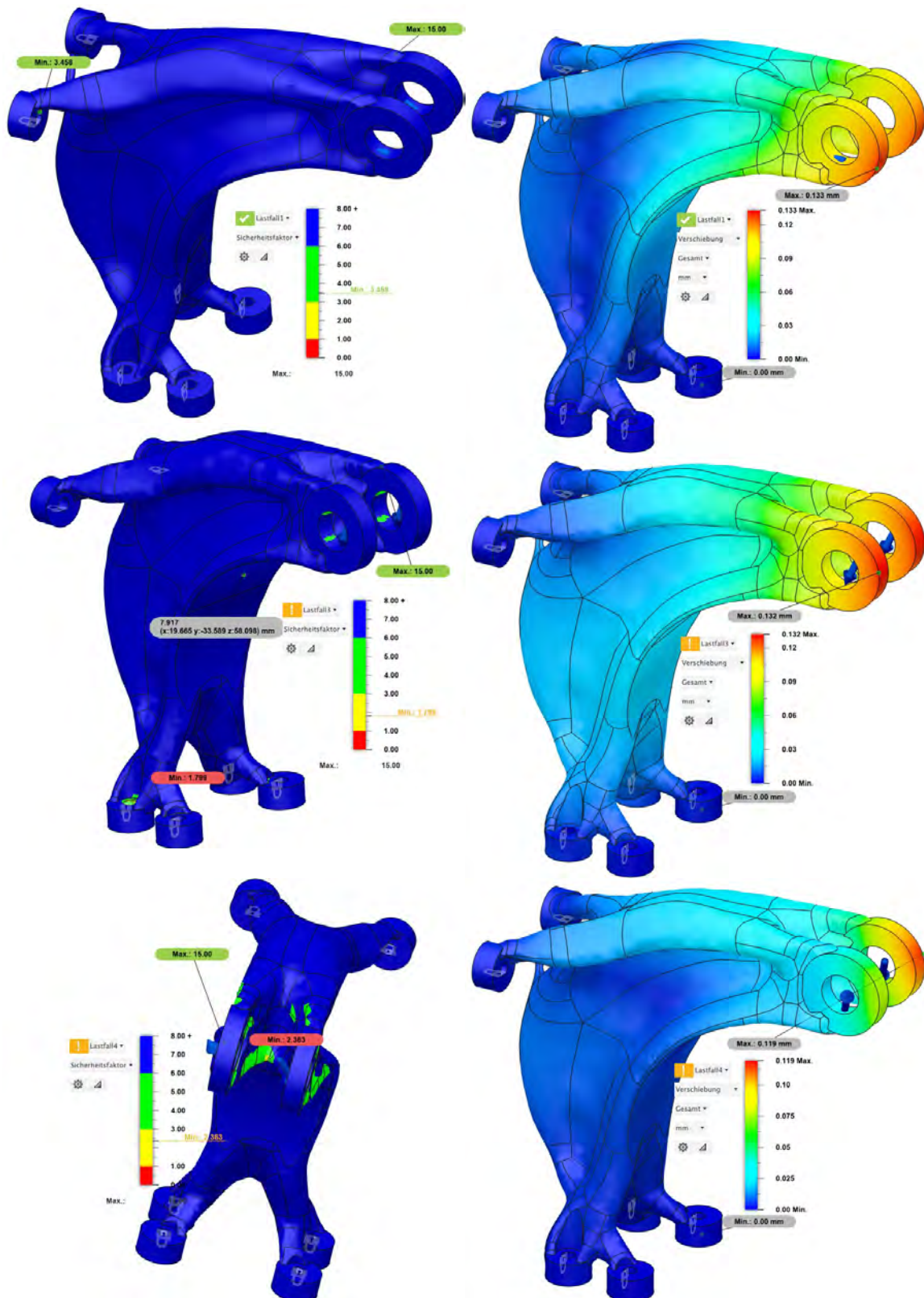
Anhang 89: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Apex Y-



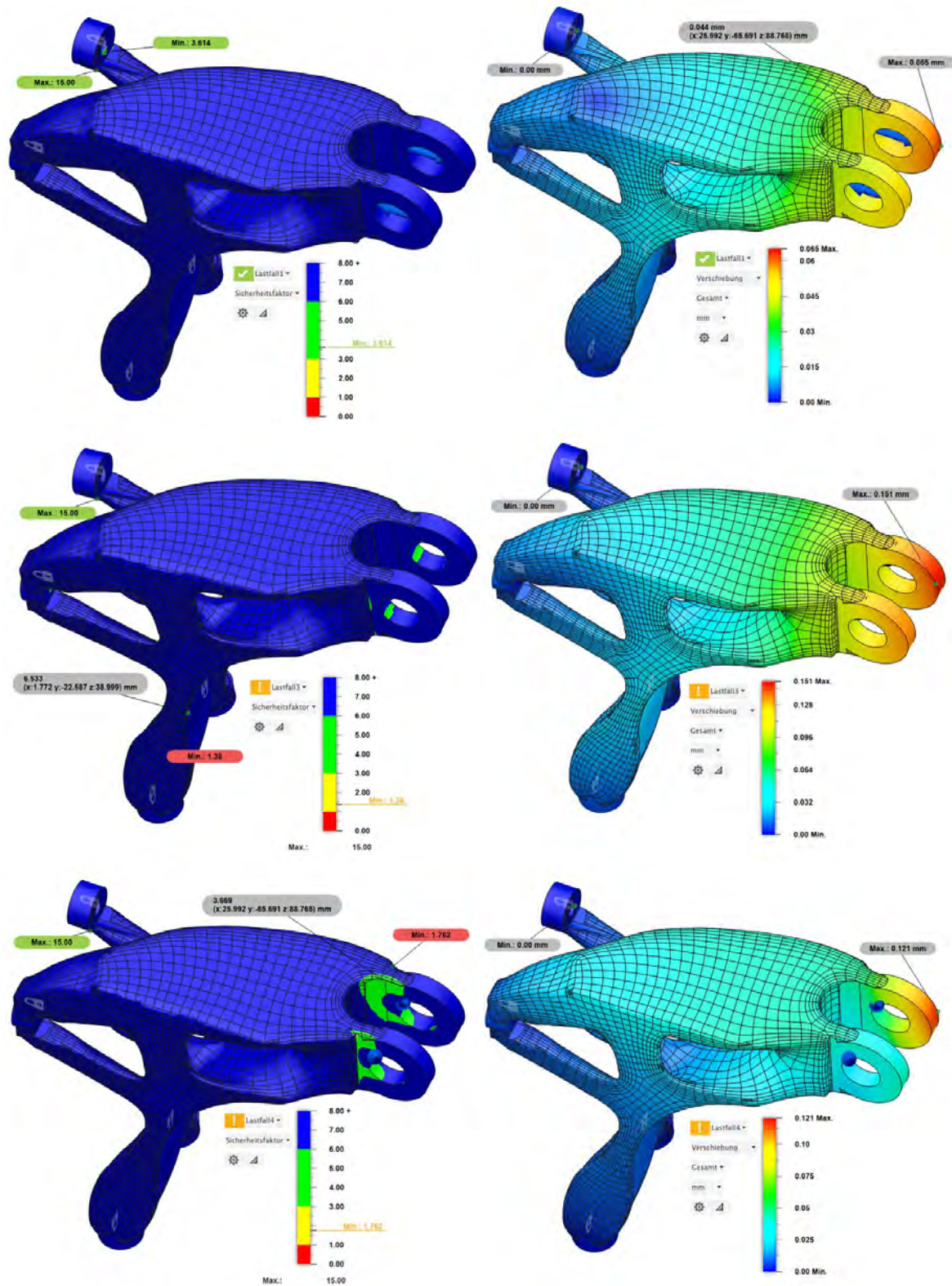
Anhang 90: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Fusion Y-



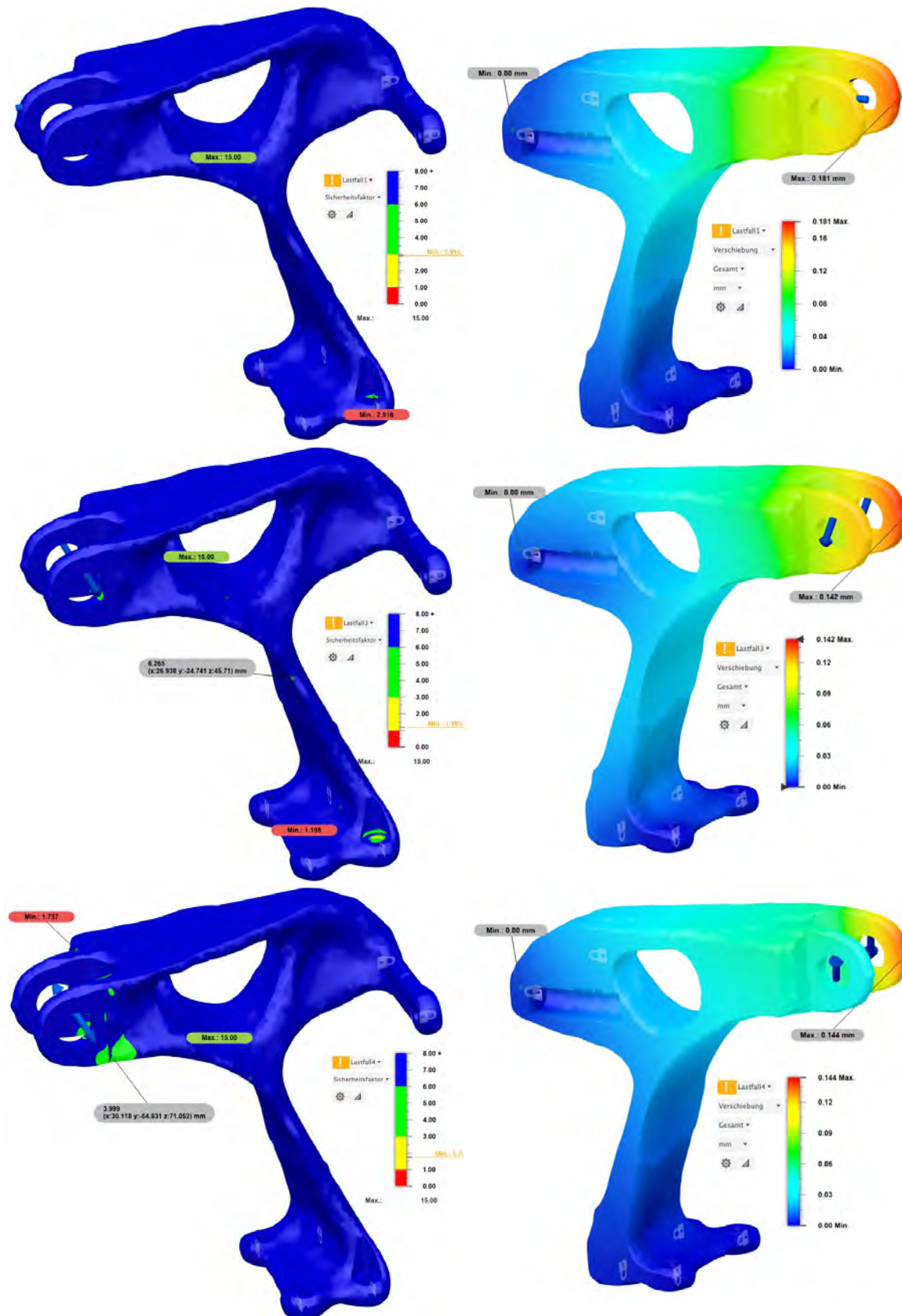
Anhang 91: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Inspire X+



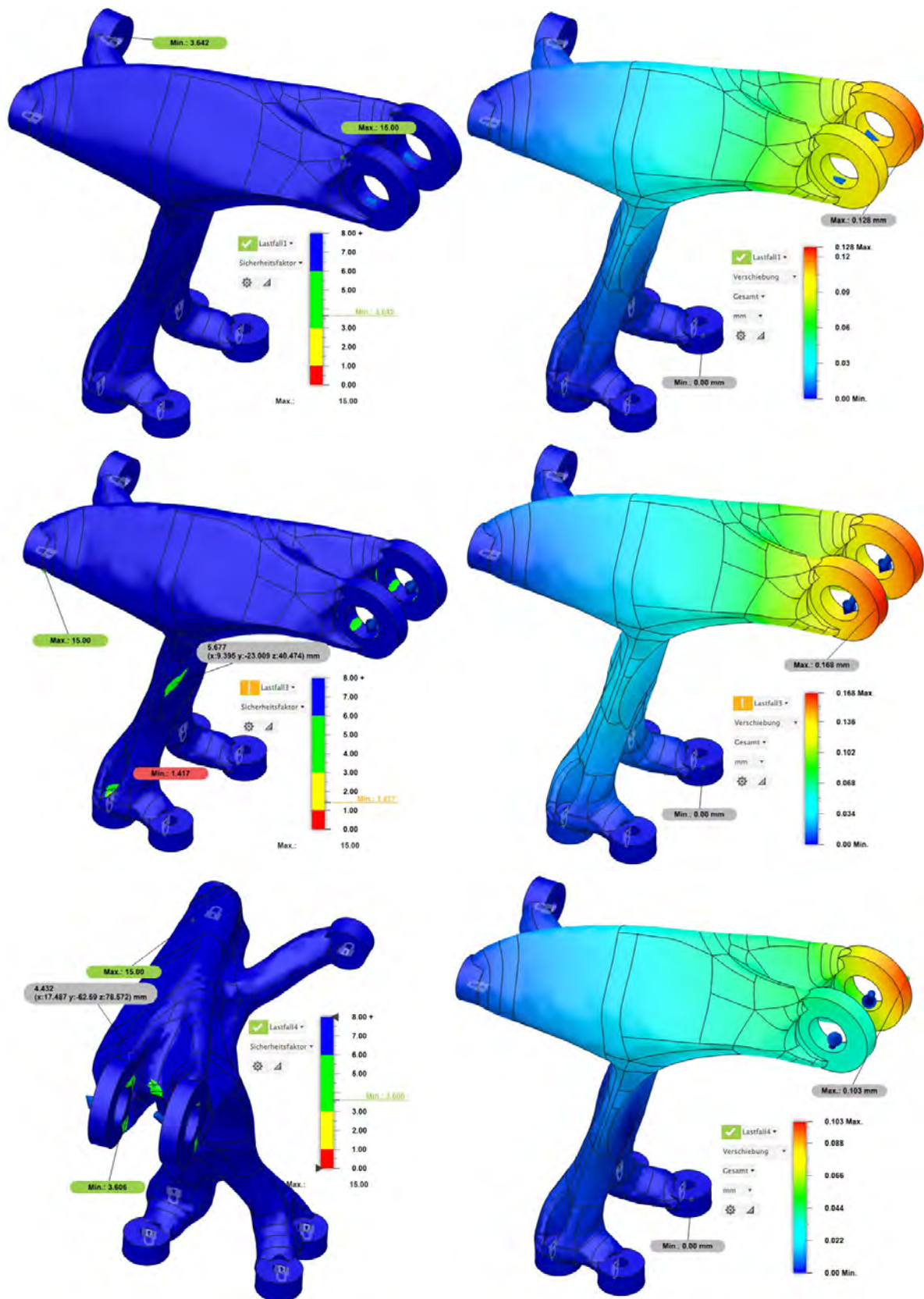
Anhang 92: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Apex X+



Anhang 93: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

Optimierung Fusion X+



Anhang 94: Von oben nach unten: Lastfall 1, 3, 4. Links Auswertung minimaler Sicherheitsfaktor, minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt. Minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie (falls abweichend) grau hinterlegt. Rechts: Auswertung maximale und minimale Verschiebung

maximale Verschiebung [mm]	max 45° Z-			max 45° Z+		
	Inspire	Apex	Fusion	Inspire	Apex	Fusion
Lastfall 1	0,033	0,214	0,141	0,028	0,345	0,142
Lastfall 3	0,152	0,228	0,133	0,131	0,216	0,143
Lastfall 4	0,079	0,298	0,107	0,065	0,250	0,087
Durchschnitt	0,088	0,247	0,127	0,075	0,270	0,124
	max 45° Y-			max 45° X+		
	Inspire	Apex	Fusion	Inspire	Apex	Fusion
Lastfall 1	0,027	0,088	0,133	0,065	0,181	0,128
Lastfall 3	0,123	0,312	0,132	0,151	0,142	0,168
Lastfall 4	0,078	0,821	0,119	0,121	0,144	0,103
Durchschnitt	0,076	0,407	0,128	0,112	0,156	0,133

Anhang 95: maximale Verschiebung innerhalb der optimierten Brackets, Bestperformer in blau

minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie	max 45° Z-			max 45° Z+		
	Inspire	Apex	Fusion	Inspire	Apex	Fusion
Lastfall 1	4,5	1,3	8	8	6,3	8
Lastfall 3	1,4	2,4	7,8	4,8	4,4	7,4
Lastfall 4	1,5	1,6	5,8	4,4	2,7	5,2
Durchschnitt	2,47	1,77	7,20	5,73	4,47	6,87
	max 45° Y-			max 45° X+		
	Inspire	Apex	Fusion	Inspire	Apex	Fusion
Lastfall 1	8	7,7	7,6	8	8	8
Lastfall 3	5,7	3,7	7,9	6,5	6,3	5,7
Lastfall 4	3,9	0,9	2,4	3,5	4,0	4,4
Durchschnitt	5,87	4,10	5,97	6,00	6,10	6,03

Anhang 96: Minimale Sicherheitsfaktoren innerhalb der optimierten Geometrien im Vergleich, Bestperformer in blau. Unentschieden mit dem Wert 8 werden nicht weiter bewertet, da Fusion keine genaue Auswertung dieser Werte ermöglicht.

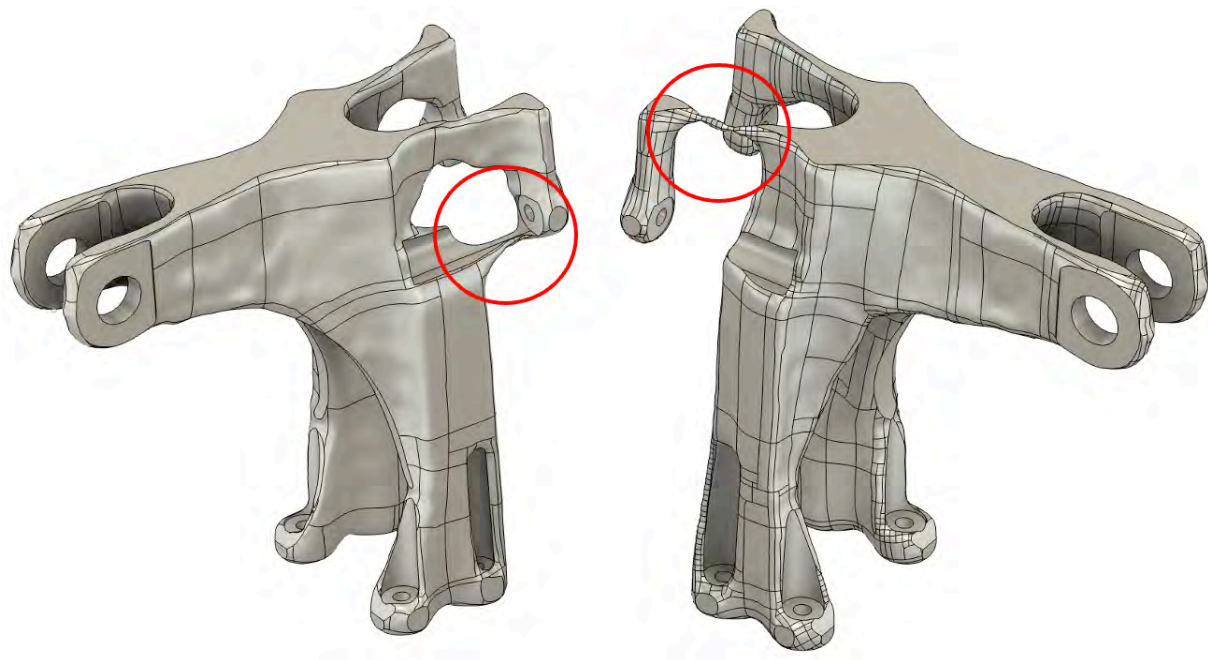
Kennwerte nicht optimiertes Bracket	Lastfall 1	Lastfall 3	Lastfall 4	Durchschnitt
maximale Verschiebung [mm]	0,337	0,233	0,155	0,242
minimaler Sicherheitsfaktor	8	4,5	4,1	5,53

Anhang 97: Kennwerte des Originalbauteils

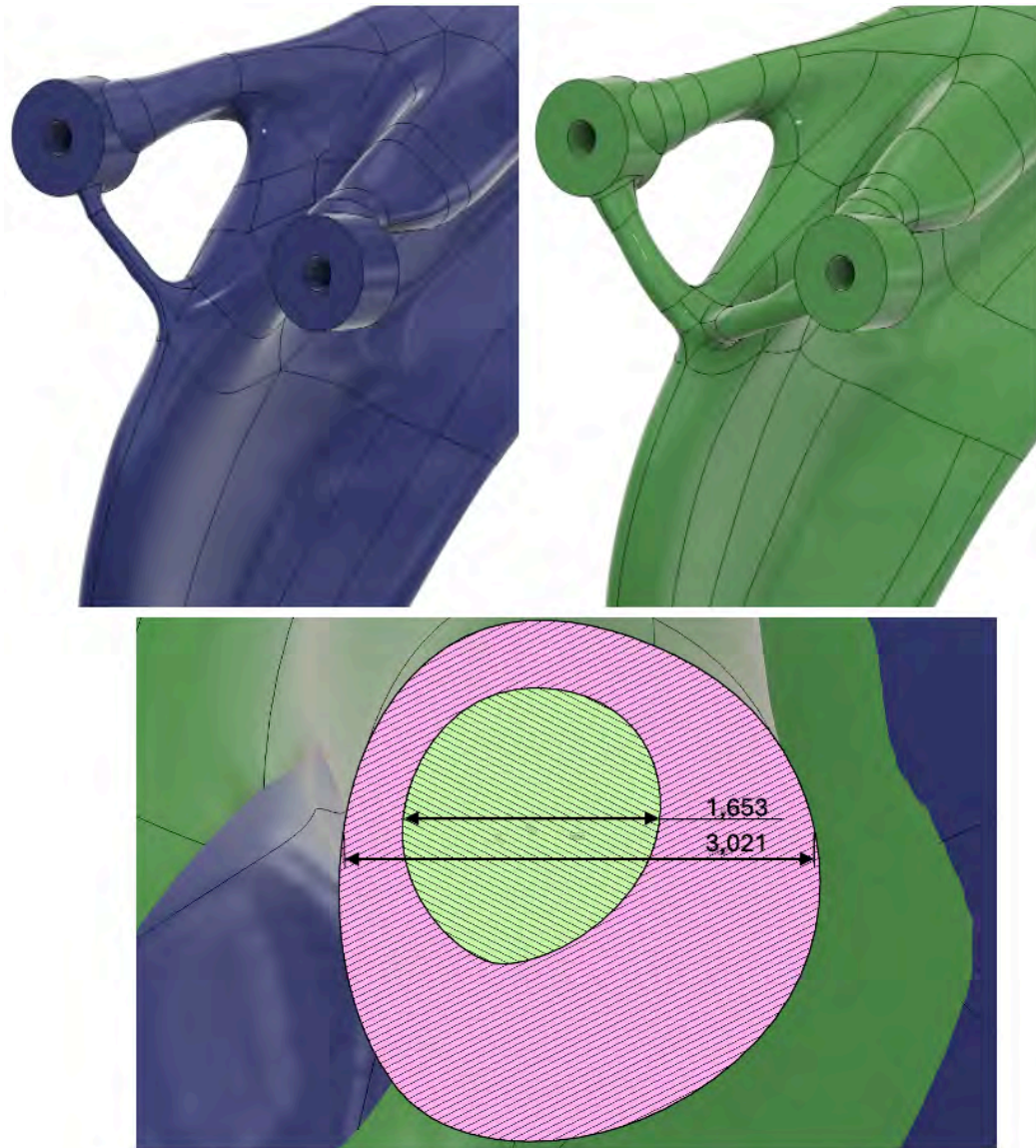
	max 45° Z-			max 45° Z+		
	Inspire	Apex	Fusion	Inspire	Apex	Fusion
Masse optimiertes Bracket [g]	101,86	111,92	103,14	95,41	109,53	104,08
Supportmasse [g]	7,43	10,56	22,25	58,97	22,85	36,94
	max 45° Y-			max 45° X+		
	Inspire	Apex	Fusion	Inspire	Apex	Fusion
Masse optimiertes Bracket [g]	94,43	109,68	103,08	94,4	110,54	104,51
Supportmasse [g]	28,08	2,3	13,80	11,39	4,53	11,71

Anhang 98: Supportmassen und Geometriemassen im Vergleich. Nicht zulässige Massen in rot. Bestperformer in blau, Worstperformer in lila.

8.2 Optimierungen mit Dickenrestriktion

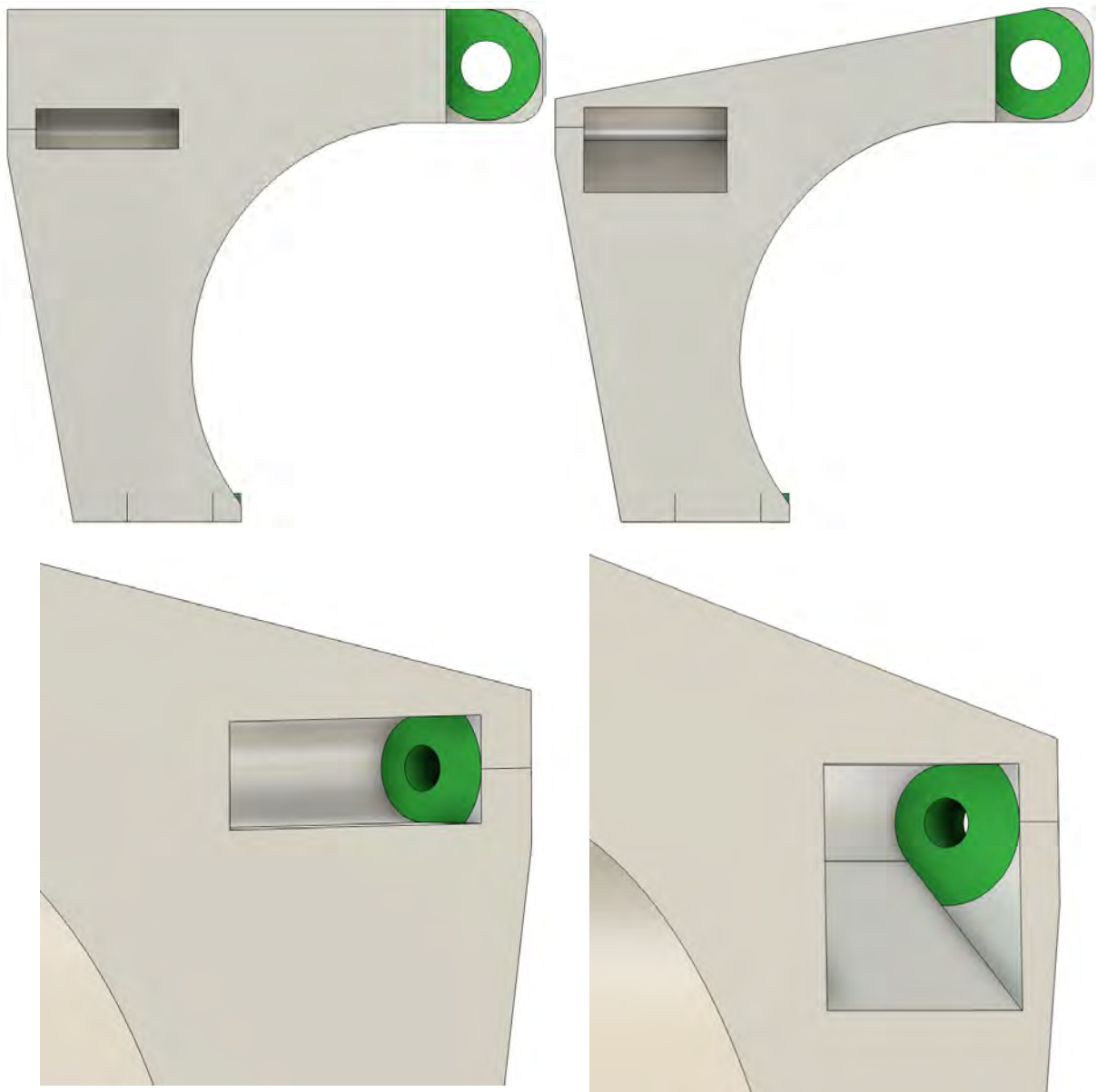


Anhang 99: Links Ergebnis der Optimierung Apex Z- ohne Dickenrestriktion, rechts mit minimaler Dicke 3 mm. Kritische Stellen rot umkreist

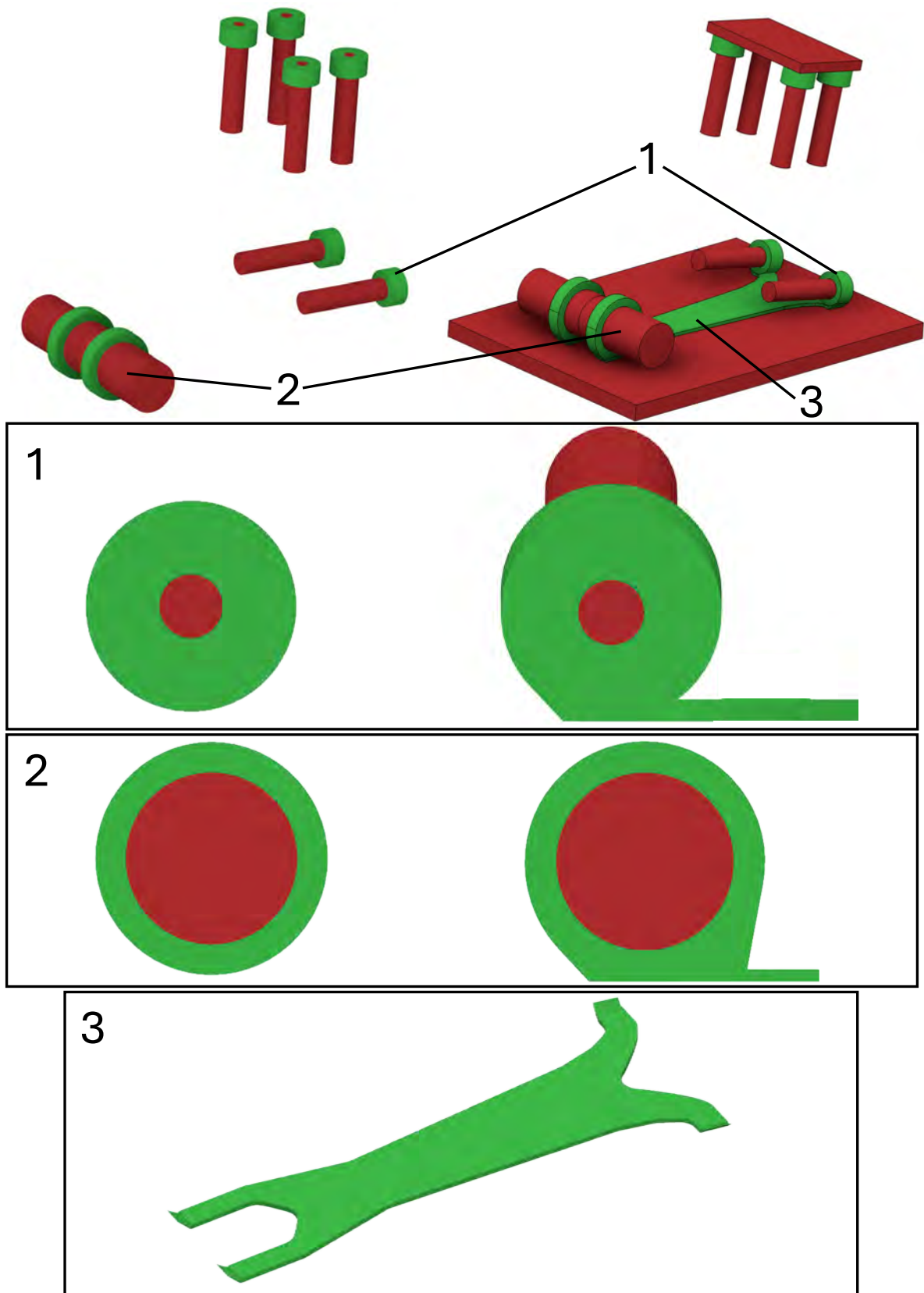


Anhang 100: Umgesetzte Restriktion der minimalen Dicke für die Optimierung Fusion Y-. Links oben ohne Dickenrestriktion, rechts oben mit Restriktion der minimalen Dicke auf 3 mm. Unten die übereinandergelegten Querschnitte der generierten Strebe. In rosa die Geometrie mit Restriktion der minimalen Dicke

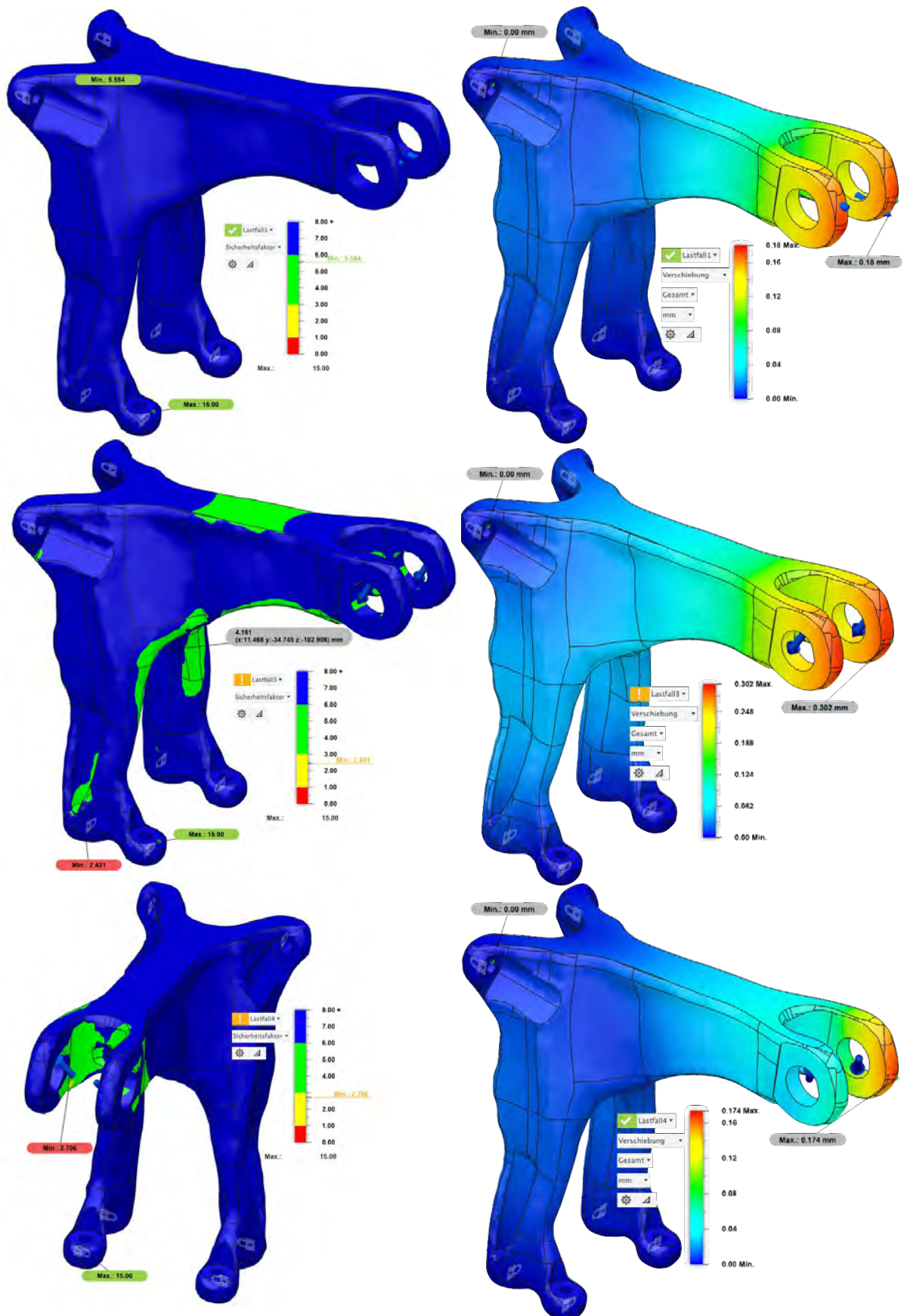
9 Leichtbau



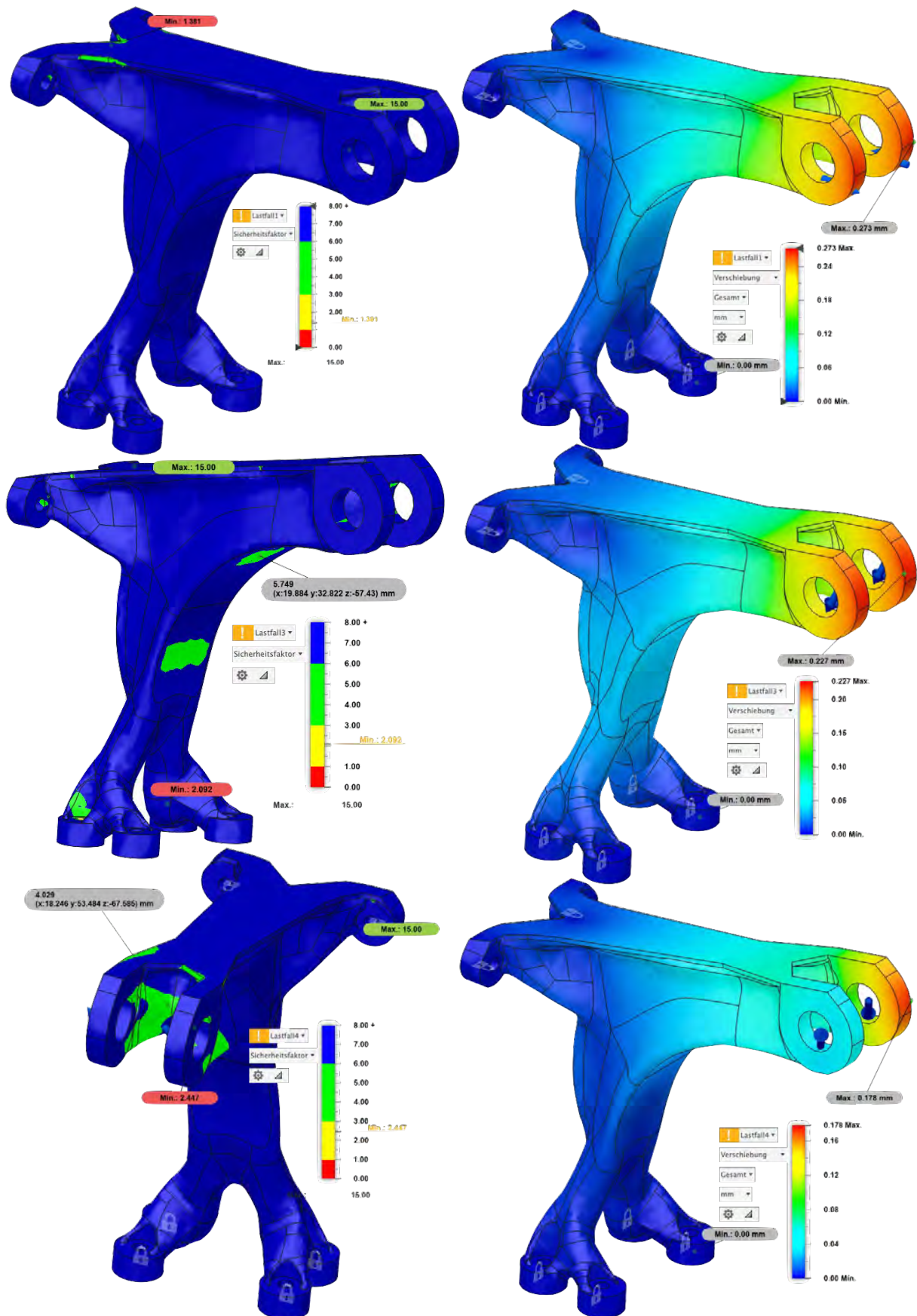
Anhang 101: Designspace für Apex, Links Aufbau Kapitel 8, rechts Aufbau Kapitel 9



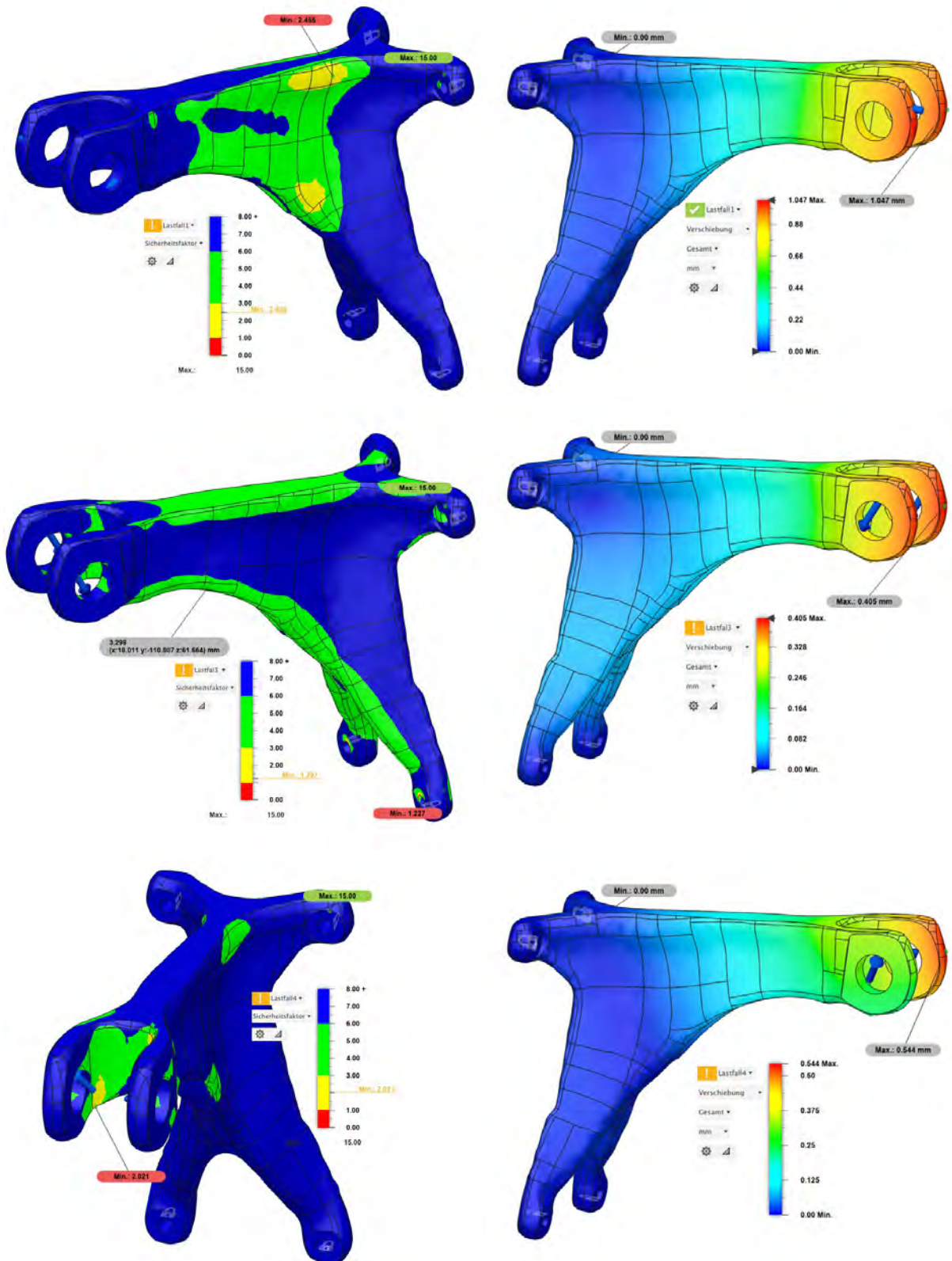
Anhang 102: Veränderungen für das generative Design in Fusion, links Aufbau aus Kapitel 8, rechts Aufbau aus Kapitel 9



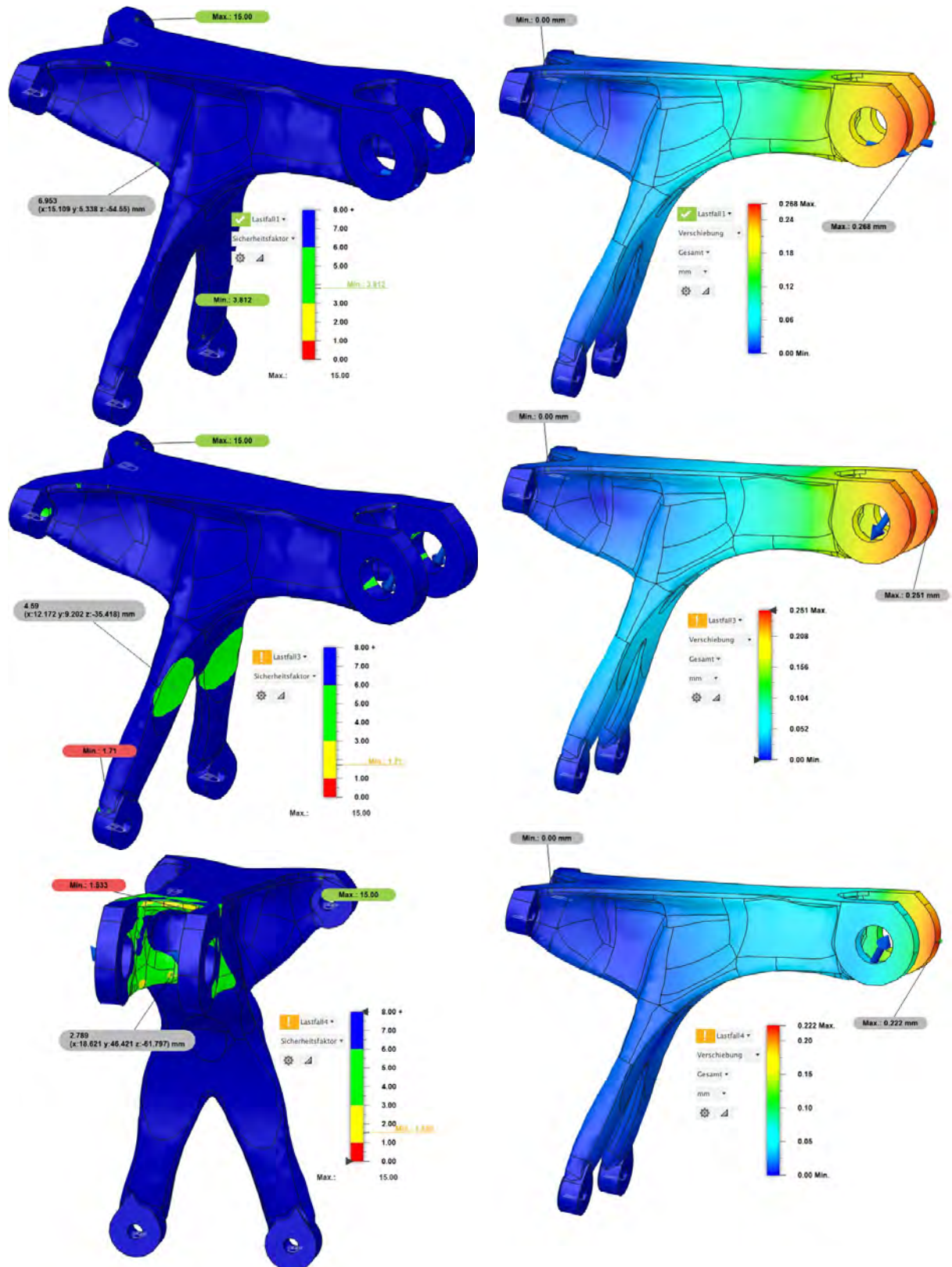
Anhang 103: Ergebnisse der FE-Analyse für die Apex Optimierung. Links minimale Sicherheitsfaktoren, rechts maximale Verschiebung. Von oben nach unten Lastfall 1, 3, 4



Anhang 104: Ergebnisse der FE-Analyse für die Fusion Optimierung. Links minimale Sicherheitsfaktoren, rechts maximale Verschiebung. Von oben nach unten Lastfall 1, 3, 4



Anhang 105: Ergebnisse der FE-Analyse für das Optimierungsergebnis aus Apex. Links minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt, minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie in grau hinterlegt falls abweichend, rechts maximale Verschiebung.



Anhang 106: Ergebnisse der FE-Analyse für das Optimierungsergebnis aus Fusion. Links minimaler Sicherheitsfaktor in rot hinterlegt, minimaler Sicherheitsfaktor innerhalb der optimierten Geometrie in grau hinterlegt falls abweichend, rechts maximale Verschiebung.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

Strukturoptimierung von selbsttragenden Bauteildesigns im Rahmen der sinterbasierten Additiven
Fertigung mittels metal Fused Filament Fabrication

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

11.10.2024

Datum

Unterschrift