



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Fynn-Henrik Duus

Konzeptentwicklung zur Integration von mechanisch hoch belastbaren Infill Lattice-Strukturen in der Bauteiloptimierung unter Anwendung von nTops „Impliziterter Feldtechnologie“ für additive Fertigungsverfahren

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Fynn-Henrik Duus

**Konzeptentwicklung zur Integration von
mechanisch hoch belastbaren Infill
Lattice-Strukturen in der
Bauteiloptimierung unter Anwendung
von nTops „Impliziterter
Feldtechnologie“ für additive
Fertigungsverfahren**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Konstruktionstechnik und Produktentwicklung im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
HAW Hamburg
Institut Produktionstechnik
Berliner Tor 21
20999 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Ing. Jens Telgkamp
Zweitprüfer/in : MSc. Jaco Beckmann

Abgabedatum: 13.08.2024

Zusammenfassung

Fynn-Henrik Duus

Thema der Masterthesis

Konzeptentwicklung zur Integration von mechanisch hoch belastbaren Infill Lattice-Strukturen in der Bauteiloptimierung unter Anwendung von nTops „Impliziterter Feldtechnologie“ für additive Fertigungsverfahren.

Stichworte

Additive Fertigung, Strukturoptimierung, Infill, Leichtbau, FEM, implizierte Feldtechnologie, Topologieoptimierung

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll mittels Anwendung der nTop Softwarelösung ein strukturoptimiertes Demonstrator-Bauteil, unter Einsatz von hoch beanspruchbaren Infill Lattice-Strukturen, entwickelt werden. Es werden Lattice-Strukturen analysiert und in einem Demonstratorbauteil angewandt. Anschließend werden die Ergebnisse im Themengebiet der additiven Fertigung (AM) aufgegriffen sowie im Kontext des Leichtbaus bewertet.

Fynn-Henrik Duus

Topic of the master thesis

Concept development for the integration of mechanically highly resilient infill lattice structures in the component optimization under application of nTops Implicit fieldtechnology for additive manufacturing processes.

Key words

Additive manufacturing, structural optimization, infill, lightweight construction, FEM, implicit fieldtechnology, topologyoptimization

Brief summary

The goal of this Master's thesis is to use nTop software solution to develop a structurally optimized demonstrator component using highly resilient infill lattice structures. Lattice structures are analyzed and applied in a demonstrator component. The results will then be applied in the field of Additive Manufacturing (AM) and evaluated in the context of lightweight construction.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	2
2.1	Additive Fertigung	2
2.2	Lattice-Strukturen	3
2.3	Lattice Arten in nTop	4
2.4	Vielversprechende Lattice-Varianten	8
2.5	nTop	9
2.5.1	Arbeitsstruktur in nTop	9
2.5.2	Lattice	11
2.5.3	Topologieoptimierung	13
2.5.4	Feldoptimierung	19
2.6	Überblick über verschiedene Software zur Erzeugung von Lattice-Strukturen .	22
2.6.1	Altair Sulis	22
2.6.2	Autodesk Fusion 360	23
2.6.3	Carbon Design Engine	23
2.6.4	Simens NX	23
2.6.5	Ultrasim 3D Software HyDesign	24
2.6.6	Zusammenfassung Erzeugung von Lattice Strukturen	24
3	Ansätze zur Bauteiloptimierung mit Infill Lattice-Strukturen	25
3.1	Testmethodik Infill Lattice-Strukturen	26
3.2	Nachweis der Belastbarkeit über FEM	27
3.2.1	Schräger Lastfall	28
3.2.2	Druck Lastfall	29
3.2.3	Torsions Lastfall	30
3.2.4	Fazit	31
3.3	Analyse vielversprechender Lattice-Strukturen	32
3.3.1	Sphere	32
3.3.2	Multi-Topology Lattice RMIT	35
3.3.3	Multi-Topology Lattice 2 RMIT	37
3.3.4	Fazit vielversprechende Lattice-Strukturen	39
3.4	Erstellung einer topologieoptimierten Lattice-Struktur	40
3.5	Vergleich verschiedener Zellgrößen	42
3.6	Fazit Infill Lattice-Strukturen	45
4	Konzeptionelle Entwicklung von Latticing-Gestaltungsweisen	46

4.1	Lattice-Struktur	46
4.2	Zellgröße	46
4.3	Zell Arten	47
4.4	Unterschiede in der additiven Fertigung	47
5	Erstellung eines Demonstrators mit Hilfe der implizierten Feldtechnologie	48
5.1	Vorgehen zur Bewertung der Demonstratoren und der implizierten Feldtechnologie	49
5.2	Erste Optimierung des Demonstrators	50
5.2.1	Topologieoptimierung	50
5.2.2	Shell und Shell/Infill	52
5.2.3	Implizierte Feldoptimierung	53
5.2.4	Nachbearbeitung in Fusion 360	55
5.3	FEM Analyse verschiedener Demonstrator Varianten	57
5.3.1	Lastfall 1	57
5.3.2	Lastfall 2	60
5.3.3	Lastfall 3	62
5.3.4	Lastfall 4	64
5.3.5	Zusammenfassung	66
5.4	Finale Optimierung des Demonstrators	68
5.4.1	Demonstrator Topologieoptimierung	68
5.4.2	Demonstrator Feldoptimierung	69
5.4.3	Demonstrator Lattice-Struktur	70
5.5	FEM Analyse zwischen feldoptimierten Demonstrator, topologieoptimierten Demonstrator, Lattice Demonstrator und Design-Challenge Gewinnerbauteil .	71
5.5.1	Vergleichsspannungen	73
5.5.2	Verformungen	79
5.5.3	Beulen	80
5.5.4	Modalanalyse	83
5.6	Fertigung Demonstrator	83
5.7	Fazit Demonstrator	85
6	Bewertung von Wechselwirkungen im Hinblick auf die Gestaltungsweise von Infill Lattice-Strukturen und den Ergebnissen des Demonstrators	86
7	Herausforderungen & Ausblick	88
8	Literaturverzeichnis	I

Tabellenverzeichnis

1	Lattice-Vergleich Schräge Belastung	28
2	Lattice-Vergleich Druck Belastung	29
3	Lattice-Vergleich Torsion	30
4	Lattice-Vergleich Gesamtvergleichsspannung	31
5	Ergebnisse Vergleich Sphere Lattice-Struktur	34
6	Ergebnisse Vergleich Multi-Topology Lattice-Struktur	36
7	Ergebnisse Vergleich zweite Multi-Topology Lattice-Struktur	38
8	Ergebnisse Topologieoptimierte Lattice-Struktur	41
9	Zellgrößen Vergleich	42
10	Ergebnisse Zellvergleich	42
11	Gewichtsverläufe implizierte Feldoptimierung	54
12	Ergebnisse Lastfall 1	58
13	Ergebnisse Lastfall 2	60
14	Ergebnisse Lastfall 3	62
15	Ergebnisse Lastfall 4	64

Abbildungsverzeichnis

1	Infill Lattice-Struktur Beispiel von ntop [1]	1
2	FFF-Verfahren [3]	3
3	Lattice Teststrukturen at the University of Nottingham [4]	3
4	Eingruppierung Lattice-Strukturen	4
5	5a Simple Cubic 5b Body Centered Cubic 5c	5
6	6a Column 6b Columns 6c Diamond	5
7	7a Fluorite 7b Octet 7c Truncated Cube	5
8	8a Truncated Octahedron 8b Kelvin Cell 8c IsoTruss	5
9	9a Re-Entrant 9b Weaire-Phelan 9c Triangular Honeycomb	6
10	10a Hexagonal Honeycomb 10b Re-Entrant Honeycomb 10c Square Honeycomb Rotated	6
11	11a Square Honeycomb 11b Face Centered Cubic Foam 11c Body Centered Cubic Foam	6
12	12a Simple Cubic Foam	6
13	13a Gyroid 13b Schwarz 13c Diamond (TPMS)	7
14	14a Lidinoid 14b SplitP 14c Neovius	7
15	15a & 15b Multi-Topology Lattices RMIT [6] 15c Sphere Lattice [7]	8
16	Auswahl von Möglichkeiten mit nTop [8]	9

17	17a Notebook Beispiel 17b Block Beispiel	10
18	Block Periodic Lattice	11
19	Auswirkungen Cell Maps bei gleicher Lattice-Struktur 19a rechteckig 19b zylindrisch 19c kugelförmig	11
20	Beispiel Lattice Erzeugung 20a Block Periodic Lattice 20b Lattice Struktur	12
21	Verschiedenen Unit Cells in nTop	12
22	Beispiel Topologieoptimierung [9]	13
23	nTop Notepad Topologieoptimierung	14
24	nTop Sektion Bauteil Topologieoptimierung	14
25	nTop Sektion FE Model Topologieoptimierung	15
26	nTop Sektion Randbedingungen Topologieoptimierung	16
27	nTop Sektion Topologieoptimierung	17
28	28a Original Bauteil 28b Ergebnis Topologieoptimierung	17
29	29a Sektion Nachbearbeitung Topologieoptimierung 29b Finales Ergebnis Topologieoptimierung	18
30	Arten der Feldoptimierung [11]	19
31	31a Parametric Shell-Infill Block 31b Fieldoptimization Block	20
32	Schnittdarstellung feldoptimiertes Bauteil	21
33	Altair Homogen / Heterogenes Lattice [13]	22
34	Modell FEM-Simulation Lattice-Strukturen	26
35	35a Lastfall Schräg 35b Lastfall Druck 35c Lastfall Torsion	27
36	36a Re-Entrant Honeycomb 36b Hexagonal Honeycomb 36c Square Honeycomb	28
37	37a Columns 37b Simple Cubic 37c Neovius	29
38	38a Square Honeycomb 38b Hexagonal Honeycomb 38c Square Honeycomb rotated	30
39	39a Square Honeycomb 39b Hexagonal Honeycomb 39c Neovius	31
40	Sphere Lattice-Struktur [7]	32
41	Krafteinleitung Gyroid vs Sphere [7]	33
42	42a Ausschnitt aus Demobauteil 42b FE Model in nTop	33
43	43a & 43d Schräg 43b & 43e Druck 43c & 43f Torsion	34
44	44a Multi Topology Lattice-Struktur 44b Nachgebaute Version	35
45	45a Lattice-Struktur Multi-Topology 45b FE Model in nTop	35
46	46a & 46d Schräg 46b & 46e Druck 46c & 46f Torsion	36
47	Zwei Ansichten der zweiten RMIT Lattice-Zelle	37
48	48a Lattice-Struktur Multi-Topology 48b FE Model in nTop	37
49	49a & 49d Schräg 49b & 49e Druck 49c & 49f Torsion	38

50	Symmetrieebenen topologieoptimierte Lattice-Struktur	40
51	51a Ergebnis Topologieoptimierung 51b Ergebnis nach Nachbearbeitung . .	40
52	FEM-Simulation in nTop der topologieoptimierten Lattice-Struktur 52a Lastfall 1 Schräg 52b Lastfall 2 Druck 52c Lastfall 3 Torsion	41
53	Zellgrößenvergleich 3 Lastfälle Diagramm	43
54	Zellgrößenvergleich addierte Vergleichsspannung	44
55	55aBauteil GE jet engine bracket[19] 55b Siegerbauteil Design Challenge [20]	48
56	Lastfälle GE jet engine bracket[19]	48
57	Ergebnisse nach Topologieoptimierung 57a & 57b \Rightarrow 536 g 57c & 57d \Rightarrow 725 g	51
58	Ergebnis Topologieoptimierung auf Zielgewicht	51
59	Shell and Volume Lattice Block	52
60	60a Version ohne Lattice 60b Version mit Lattice	52
61	Drop Down Menü Lattice-Strukturen für implizierte Feldoptimierung	53
62	62a Parametric Shell-Infill Block 62b Fieldoptimization Block	54
63	63a Demonstrator 536 g vor Feldoptimierung 63b Demonstrator 725 g vor Feldoptimierung	55
64	Fertig optimierter Demonstrator mit NURBS	56
65	Skizzen zur Nachbearbeitung & nachbearbeiteter Demonstrator	56
66	Lastfall 1 [19]	57
67	Lastfall 1 67a Shell + Lattice 67b Shell	58
68	Lastfall 1 68a Field V3 68b Field V5 68c Topologieoptimiert 68d Gewinnerbauteil	59
69	Lastfall 2 [19]	60
70	Lastfall 2 70a Shell + Lattice 70b Shell	60
71	Lastfall 2 71a Field V3 71b Field V1 71c Topologieoptimiert 71d Gewinnerbauteil	61
72	Lastfall 3 [19]	62
73	Lastfall 3 73a Shell + Lattice 73b Shell	62
74	Lastfall 3 74a Field V3 74b Topologieoptimiert 74c Gewinnerbauteil . . .	63
75	Lastfall 4 [19]	64
76	Lastfall 3 76a Shell + Lattice ?? Shell	64
77	Lastfall 4 77a Field V3 77b Topologieoptimiert 77c Gewinnerbauteil . . .	65
78	Balkendiagramm Gesamtvergleichsspannung alle Demonstratoren mit Gewinnerbauteil	67
79	Balkendiagramm Gesamtvergleichsspannung Demonstratoren Feldoptimierung	68
80	Finaler Demonstrator Topologieoptimierung Rendering	69
81	Finaler Demonstrator Feldoptimierung nach Topologieoptimierung	69

82	Finaler Demonstrator Feldoptimierung Schnitt	70
83	Finaler Demonstrator Feldoptimierung Rendering	70
84	Beispiel Vernetzung finale FEM Berechnung	71
85	Ansicht des Netzes innerhalb des feldoptimierten Demonstrators	72
86	Randbedingungen finale FEM-Simulation	72
87	Ergebnisse Lastfälle 1 bis 4	73
88	Lastfall 1 88a Feldoptimierter Demonstrator 88b Topologieoptimierter De- monstrator 88c Lattice Demonstrator 88d Gewinnerbauteil 2013	74
89	Lastfall 2 89a Feldoptimierter Demonstrator 89b Topologieoptimierter De- monstrator 89c Lattice Demonstrator 89d Gewinnerbauteil 2013	75
90	Lastfall 3 90a Feldoptimierter Demonstrator 90b Topologieoptimierter De- monstrator 90c Lattice Demonstrator 90d Gewinnerbauteil 2013	76
91	Lastfall 4 91a Feldoptimierter Demonstrator 91b Topologieoptimierter De- monstrator 91c Lattice Demonstrator 91d Gewinnerbauteil 2013	77
92	Ergebnis Gesamtvergleichsspannung	78
93	Ergebnis Verformungen je Lastfall	79
94	Ergebnis Gesamtverformung über vier Lastfälle	80
95	Ergebnis Beulen über vier Lastfälle	81
96	Ergebnis Beulen Gesamtlastmultiplikator	82
97	Ergebnisse Eigenfrequenz Analyse	83
98	98a Demonstrator im Druck 98b Demonstrator fertig auf Bauplatte	84
99	Demonstratoren	84
100	Schnitt Demonstrator Lattice (Oben) + Feldoptimierung (Unten)	87

1 Einleitung

Das Thema Nachhaltigkeit wird immer präsenter. Es ist wichtig, Ressourcen zu schonen und die Umwelt zu schützen. Gerade im Bereich der Mobilität ist es wichtig, möglichst Gewicht zu sparen, um den Kraftstoffverbrauch der Verkehrsmittel zu reduzieren.

Generell gibt es viele Faktoren, die in direkter Relation zum Verbrauch stehen. Ein wichtiger Aspekt ist die Masse. Je geringer sie ist, desto niedriger ist der Kraftstoffverbrauch. Dies gilt insbesondere für die Luftfahrt.

Mit Hilfe der additiven Fertigung können Bauteile hergestellt werden, die aufgrund der größeren Gestaltungsfreiheit additiver Fertigungsverfahren konventionell nicht herstellbar sind. Konventionell gefertigte Bauteile können durch strukturoptimierte additive Bauteile ersetzt werden, um die Masse der Bauteile zu reduzieren und damit den Verbrauch der Verkehrsmittel zu senken. Gleichzeitig schont die additive Fertigung Ressourcen, da im Vergleich zur spanenden Fertigung weniger Abfall entsteht und das Material besser ausgenutzt wird.

Das Potential der strukturoptimierten äußeren Bauteilform wird bereits größtenteils genutzt. Im Inneren der Bauteile liegen noch Potenziale, die genutzt werden können. Infill Lattice-Strukturen können mithilfe von additiven Fertigungsverfahren erzeugt werden. Durch die Optimierung dieser Strukturen können weitere Potentiale genutzt werden, um die Bauteilmasse weiter zu reduzieren. Mit Hilfe der "Impliziter Feldtechnologie" von nTop können die Dicken der Schale und der Infill Lattice-Struktur in Abhängigkeit von der Belastung variabel optimiert werden. Ein Beispiel ist in Abb. 1 dargestellt.



Abbildung 1: Infill Lattice-Struktur Beispiel von ntop [1]

Ziel dieser Masterarbeit ist es, ein Konzept für die Auslegung von Infill Lattice-Strukturen zu entwickeln. Dadurch soll eine bessere Optimierungstiefe der Bauteile erreicht werden. Als hauptsächlichliches Tool zur Optimierung wird nTop verwendet.

2 Stand der Technik

2.1 Additive Fertigung

Die additive Fertigung umfasst die Fertigungsverfahren, bei denen durch hinzufügen von Material ein Bauteil entsteht. Dabei wird das Material schichtweise aufgetragen, das neu aufgetragene Material verbindet sich mit der vorigen Schicht. Das Verbinden mit der vorigen Schicht kann auf verschiedene Art und Weisen erfolgen. In der Regel erfolgt das Verbinden der Schichten über das Aufschmelzen beider Werkstoffe, durch eine fotochemische Reaktion oder durch einen Kleber. Zum Einsatz kommen eine Vielzahl an Polymer-, Metall- und Keramikwerkstoffe. In der Kunststoff- sowie Metallverarbeitung, sowie im Leichtbau sind die Hauptanwendungen der additiven Fertigung zu finden. [2].

Die additive Fertigung kann ihre Stärken im Bereich komplexer Bauteile mit filigranen Strukturen ausspielen. So ist ein hoher Optimierungsgrad der Bauteile bei der additiven Fertigung von Vorteil, da bei den meisten Verfahren das Bauteilvolumen entscheidend für die Druckzeit eines Bauteils ist. Durch den hohen Optimierungsgrad kann von einem geringen Bauteilvolumen ausgegangen werden. Dadurch können Ressourcen geschont werden. Insbesondere sind die Verfahren geeignet für Prototypen, Serien in kleiner Stückzahl, sowie Bauteile die individuelle Anpassungen brauchen [2].

Eine generelle Herausforderung in der additiven Fertigung sind die Fertigungskosten. In vielen Fällen ist der Einsatz der additiven Fertigung aufgrund der höheren Stückkosten noch nicht wirtschaftlich. So werden vermutlich in Zukunft bei sinkenden Fertigungskosten, aufgrund von Innovationen in der additiven Fertigung, neue Märkte erschlossen werden.

Die verschiedenen additiven Fertigungsverfahren werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet, da der Fokus auf der Strukturoptimierung liegt. Die Ausnahme bildet hier das FFF-Verfahren, da dies genutzt wird um die späteren Demonstratoren zu fertigen.

Bei dem FFF-Verfahren handelt es sich um ein Strangablegeverfahren. Es wird ein Filament genutzt. Das Filament wird von einer Materialrolle zu dem Extruder befördert. Dieser schmilzt den Kunststoff und extrudiert diesen durch eine Düse. Durch die Extrusion in Kombination mit der Bewegung des Extruders wird das Bauteil Schicht für Schicht aufgetragen. In Abb. 2 ist das Prinzip des FFF-Verfahren zu erkennen [3].

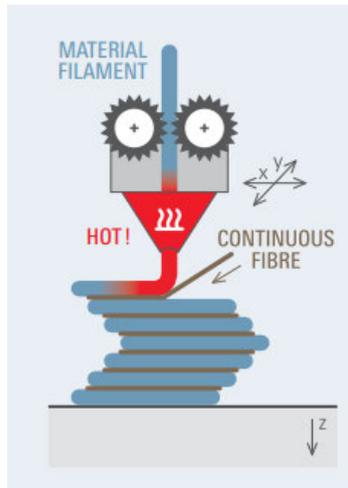


Abbildung 2: FFF-Verfahren [3]

2.2 Lattice-Strukturen

Die additive Fertigung erlaubt die Herstellung von komplexen Strukturen, die mit der klassischen Fertigungsverfahren nicht möglich wären. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit komplexe Formen innerhalb von Bauteilen zu generieren, sie werden Lattice-Strukturen genannt. Mit Hilfe der Lattice-Strukturen können gute mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig deutlich geringerem Gewicht erreicht werden.

Die Besonderheit bei Lattice-Strukturen liegt darin wie die Struktur aufgebaut ist. Die Lattice-Strukturen sind Netzwerke die aus Knoten, Trägen und Streben bestehen. Durch diesen Aufbau kann das Gewicht reduziert werden und die Lattice-Struktur sorgt für die strukturelle Belastbarkeit des Bauteils. Ebenfalls ist es möglich bestimmte mechanische Eigenschaften über die Lattice-Struktur zu erzeugen. Beispielsweise könnte das Bauteil an gewünschten Stellen nachgiebiger sein [4]. In Abb. 3 sind Lattice-Strukturen in verschiedenen Größen dargestellt.



Abbildung 3: Lattice Teststrukturen at the University of Nottingham [4]

Grob kann man die Lattice-Strukturen in drei Gruppen aufteilen. Die Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Lattice-Strukturen, Lattice-Strukturen die aus Streben bestehen und Lattice-Strukturen, die planar sind. In Abb. 4 sind die verschiedenen Lattice Gruppen visualisiert. Generell gibt es noch weitere Gruppen von Lattice-Strukturen, bei den drei hier gezeigten handelt es sich um die Lattice-Strukturen die am verbreitetsten sind. Auch im Hinblick auf das Thema Leichtbau sind dies die drei wichtigsten Gruppen.

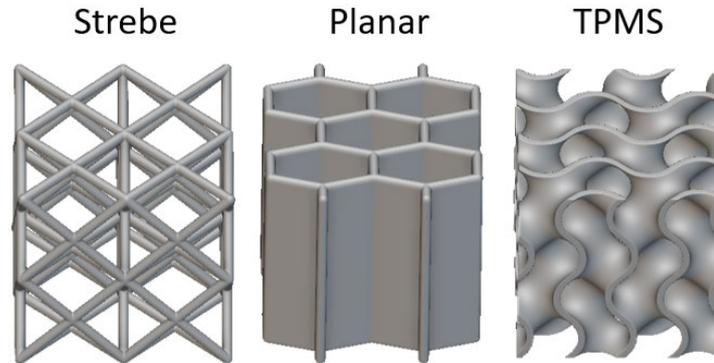


Abbildung 4: Eingruppierung Lattice-Strukturen

TPMS Lattice-Strukturen sind die Ergebnisse von Sinus und Cosinus Funktionen. In Gleichung 1 ist das Beispiel für eine Gyroid TPMS Lattice-Struktur abgebildet. Bei dem TPMS Beispiel aus Abb. 4 handelt es sich um eine Gyroid Lattice-Struktur. Die Gleichungen der weiteren 5 TPMS-Strukturen, die in nTop vorhanden sind können der Quelle entnommen werden [5].

$$\sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y) \cdot \cos(z) + \sin(z) + \cos(x) \quad (1)$$

2.3 Lattice Arten in nTop

In diesem Unterkapitel soll es einen Überblick über die Lattice-Strukturen geben, die in nTop verfügbar sind. Die Begrenzung resultiert daraus, dass für die implizierte Feldtechnologie nur in nTop vorhandenen Lattice-Strukturen nutzbar sind. Es werden die Lattice-Strukturen gezeigt die den drei Gruppen aus Abb. 4 zuzuordnen sind.

Hierzu werden in den folgenden Abschnitten, eine Auswahl an Lattice-Strukturen näher betrachtet. In den folgenden Abbildungen von Abb. 5 bis 12 sind Lattice-Strukturen zu sehen, die einer Graph Unit Cell aus nTop zugewiesen sind. Bei den Abbildungen von 13 bis 14 handelt es sich um TPMS Lattice-Strukturen.

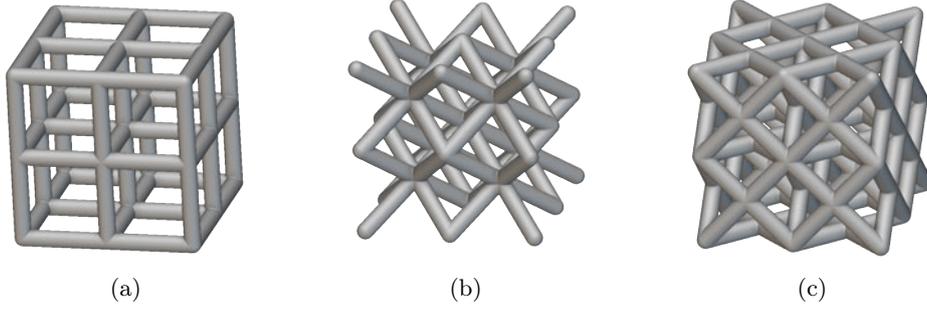


Abbildung 5: 5a Simple Cubic | 5b Body Centered Cubic | 5c Face Centered Cubic

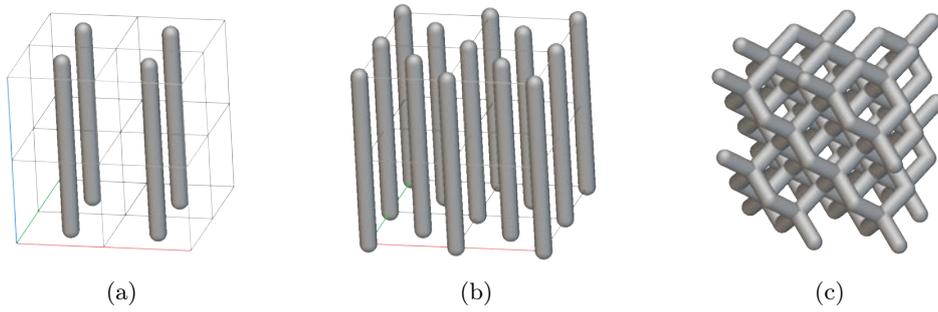


Abbildung 6: 6a Column | 6b Columns | 6c Diamond

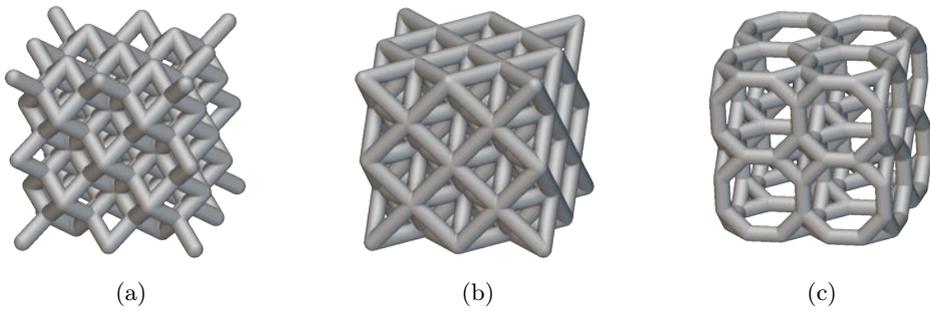


Abbildung 7: 7a Fluorite | 7b Octet | 7c Truncated Cube

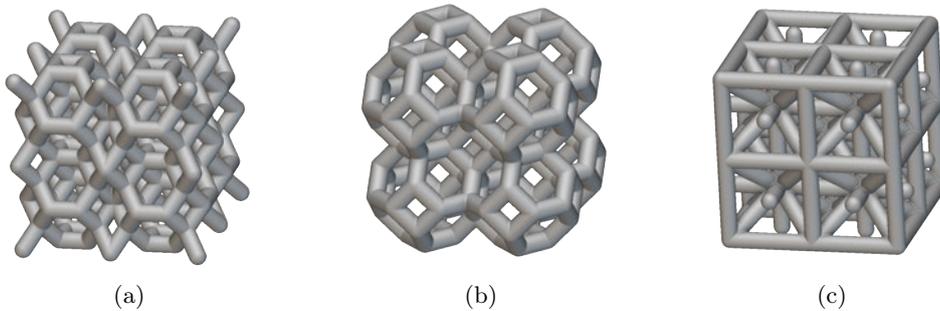


Abbildung 8: 8a Truncated Octahedron | 8b Kelvin Cell | 8c IsoTruss

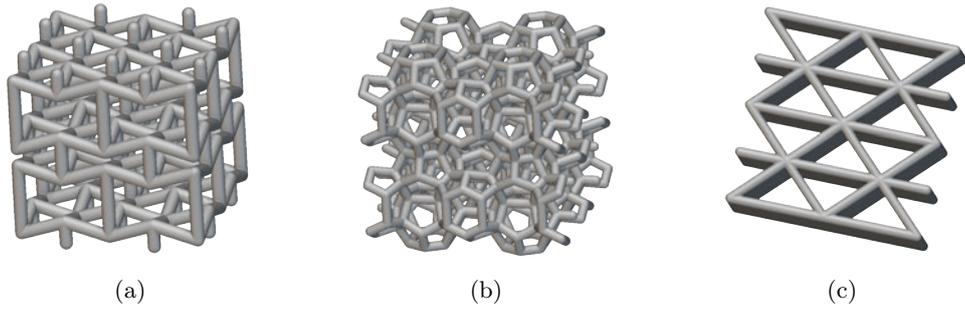


Abbildung 9: 9a Re-Entrant | 9b Weaire-Phelan | 9c Triangular Honeycomb

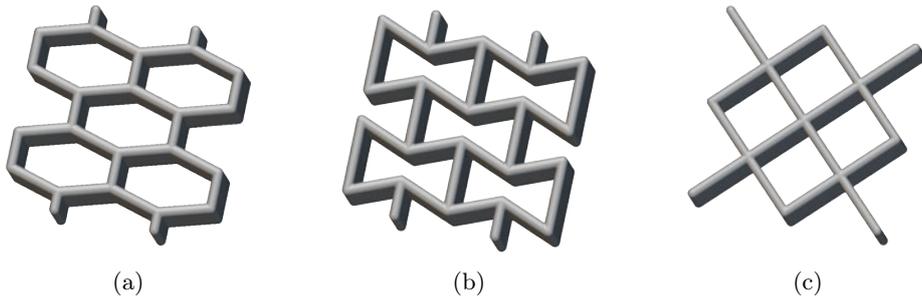


Abbildung 10: 10a Hexagonal Honeycomb | 10b Re-Entrant Honeycomb | 10c Square Honeycomb Rotated

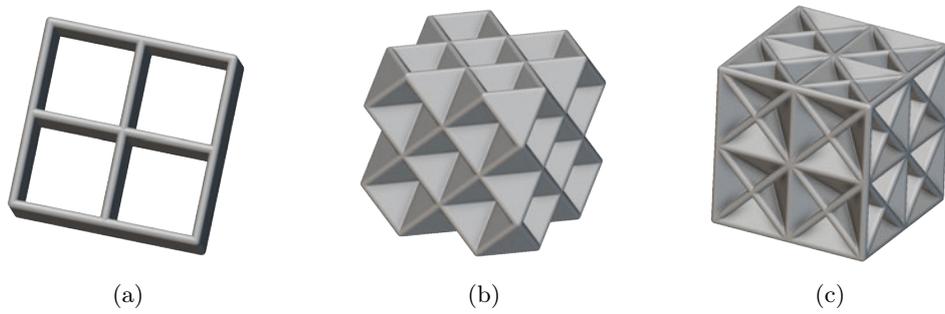


Abbildung 11: 11a Square Honeycomb | 11b Face Centered Cubic Foam | 11c Body Centered Cubic Foam

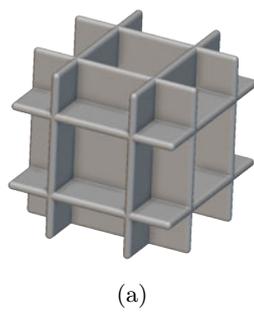


Abbildung 12: 12a Simple Cubic Foam

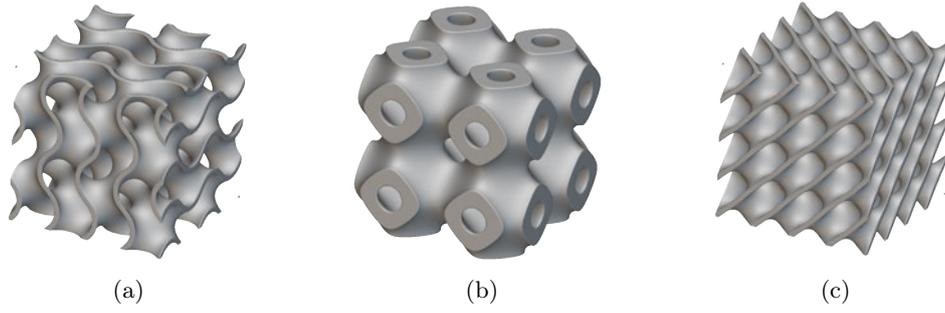


Abbildung 13: 13a Gyroid | 13b Schwarz | 13c Diamond (TPMS)

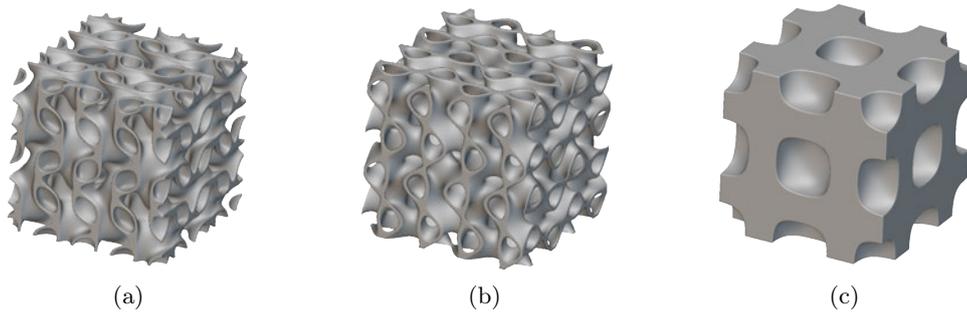


Abbildung 14: 14a Lidinoid | 14b SplitP | 14c Neovius

2.4 Vielversprechende Lattice-Varianten

Innerhalb dieser Thesis sollen drei weitere vielversprechende Lattice-Arten untersucht werden. Hierbei handelt es sich um zwei Multi-Topology Lattices vom Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) und eine Lattice-Struktur Namen Spherene. In Abb. 15 sind diese drei Lattice-Strukturen abgebildet, eine Untersuchung ist in Kap. 3.3 zu finden.

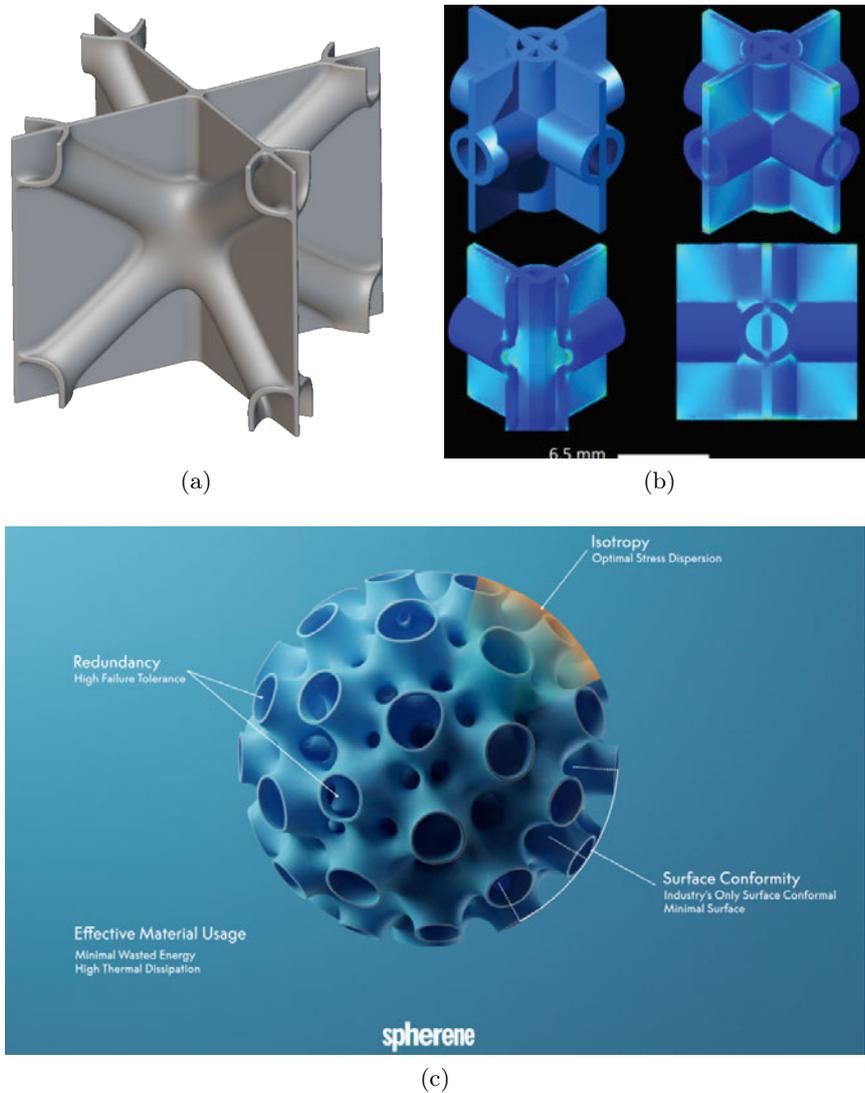


Abbildung 15: 15a & 15b Multi-Topology Lattices RMIT [6] 15c Spherene Lattice [7]

2.5 nTop

nTop ist ein Programm zur Optimierung von Bauteilen. Das Ziel ist es nicht herkömmliche CAD Programme zu ersetzen. nTop dient als Erweiterung der Möglichkeiten. Im allgemeinen Arbeitsablauf wird innerhalb eines CAD Programms ein Bauteil erstellt. Dieses Bauteil kann nun in nTop optimiert werden. Hierfür bietet nTop zahlreiche Möglichkeiten, diese sind in Abb. 16 dargestellt.

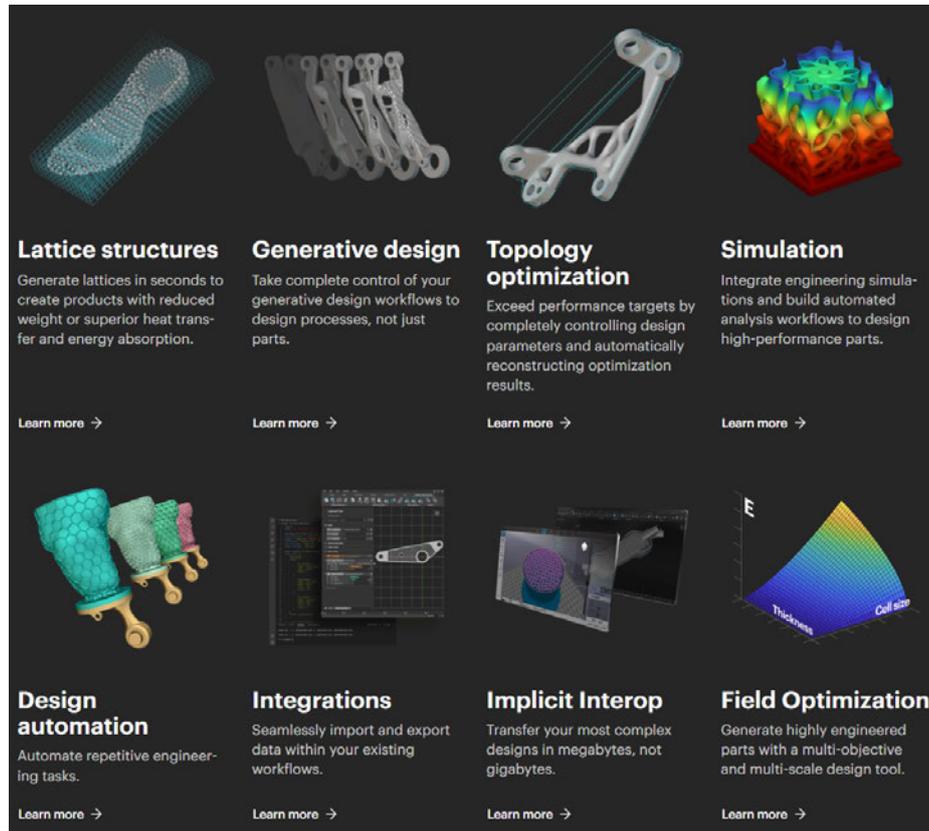


Abbildung 16: Auswahl von Möglichkeiten mit nTop [8]

Der für diese Thesis relevante Teil von nTop ist im Bereich der Lattice Strukturen und der Topologieoptimierung angesiedelt. Diese beiden Optimierungen sind für die additive Fertigung am geeignetsten. In nTop gibt es diese beiden Optimierungen über Felder zu kombinieren, so kann der Optimierungsgrad der Bauteile weiter gesteigert werden. Weitere wichtige Features sind die Automatisierung in nTop und die Möglichkeiten der FEM-Analyse.

2.5.1 Arbeitsstruktur in nTop

In nTop arbeitet man hauptsächlich im Notebook. Hier können dann die verschiedenen Blöcke gewählt und verknüpft werden. In Abb. 17a ist ein Notebook zu sehen. Grundsätzlich gibt es hier 3 Bereiche. Die Bereiche sind Inputs, die Sektionen und Output. Alle Funktionen in nTop sind in Blöcken enthalten, in Abb. 17b sind beispielhaft zwei Blöcke zu erkennen.

Mit den Blöcken erstellt man dann seine gewünschten Arbeitsschritte. Es bietet sich an die Arbeitsschritte in passende Sektionen aufzuteilen. Wie es Beispielsweise in der Abbildung zu sehen ist, zur besseren Übersicht sind hier nur zwei Sektionen aufgeklappt.

Um das gewünschte Ziel in nTop zu erreichen werden die verschiedenen Blöcke miteinander verknüpft. Hierzu gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit ist weitere Blöcke innerhalb von Blöcken zu erstellen, wie in der Abb. 17b bei Finaler Körper zu sehen ist. Die zweite Variante ist es aus einem Block eine Variable zu machen. Sobald ein Block zu einer Variablen wird, kann dem Block ein Name zugewiesen werden, der farblich hinterlegt ist, in diesem Beispiel handelt es sich bei dem Block Finaler Körper und Lattice um Variablen. Über eine Variable kann ein Block mit mehreren anderen Blöcken verknüpft werden. So kann ein Parameter Beispielsweise in mehrere Blöcke integriert werden und bei Bedarf schnell in allen Blöcken angepasst werden. In der Beispiel Abbildung ist der Block Lattice in den Block Finaler Körper integriert, hier Blau hervorgehoben.

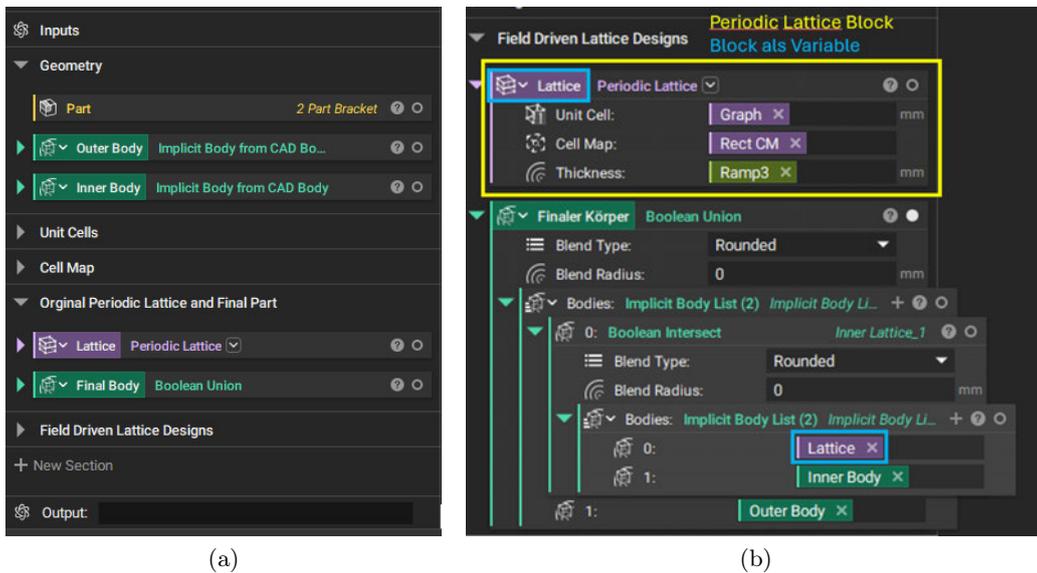


Abbildung 17: 17a Notebook Beispiel | 17b Block Beispiel

Die Bereiche Inputs, sowie Output können für das automatisieren von Aufgaben genutzt werden. So kann ein ganzes Notebook als Custom Block abgespeichert werden. Dieser Custom Block kann dann in andere Notebooks importiert werden.

Es werden im Notebook des Custom Blocks die nötigen Inputs und der Output definiert. Die Sektionen im Custom Block erledigen die jeweilige Aufgaben. So wird beim abarbeiten von sich wiederholenden Aufgaben die Effizienz gesteigert, da nur die eingetragen werden müssen, der Workflow aber bereits erstellt ist.

2.5.2 Lattice

In nTop können Lattice Strukturen für viele verschiedene Anwendungen erstellt werden. Dieses Kapitel beschränkt sich auf die Erstellung von Lattice-Strukturen, die als Infill für Bauteile genutzt werden, bei denen das Optimierungsziel Leichtbau ist. Hier geht es Primär um die Möglichkeiten die nTop für das klassische Latticing bietet. Fortgeschrittene Funktionen wie eine Kombination von Lattice und Feldoptimierung oder Topologieoptimierung werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

Die Standard Funktion zur Erstellung von Lattice-Strukturen heißt Periodic Lattice. Dieser Block ist in Abb. 18 abgebildet. Der Block erfordert drei Inputs. Der erste Input ist die Unit Cell, hierbei handelt es sich um den Lattice Typ. Es können vorgefertigte Lattice-Strukturen verwendet werden, aber auch Custom Lattice-Strukturen finden hier eine mögliche Anwendung.

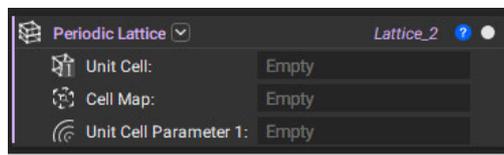


Abbildung 18: Block Periodic Lattice

Bei der Cell Map handelt es sich um den Bereich in dem die Lattice-Struktur erstellt werden soll. Die Cell Map ist eine Gitterstruktur, innerhalb dieser Struktur werden die Lattice Elemente erzeugt. Die Größe der Cell Map bestimmt daher auch die Größe der Lattice-Zellen. Die Gitterstruktur kann verschiedene Formen annehmen. Es gibt eine rechteckige, eine zylindrische und eine sphärische Cell Map. Je nach Auswahl werden die Lattice-Strukturen dann erzeugt und in die passende Form gebracht, des Weiteren gibt es noch die Möglichkeit Cell Maps an vorhandenen Körper anzupassen. In Abb. 19 sind die Unterschiede der verschiedenen Cell Maps zu erkennen. In dieser Thesis wird nicht weiter auf die Vor- und Nachteile der verschiedenen Cell Map Formen eingegangen.

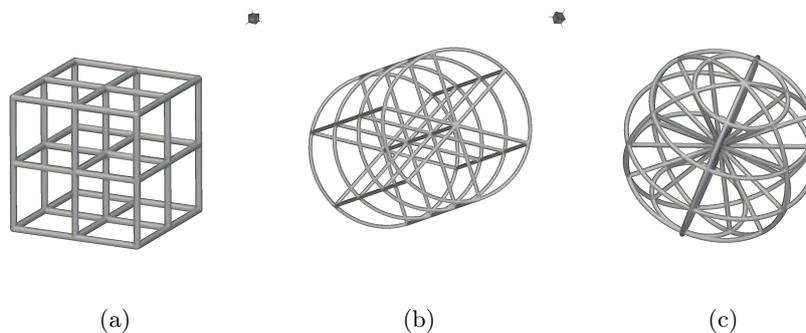
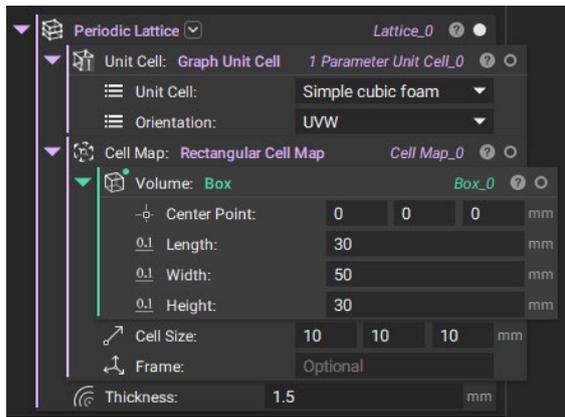


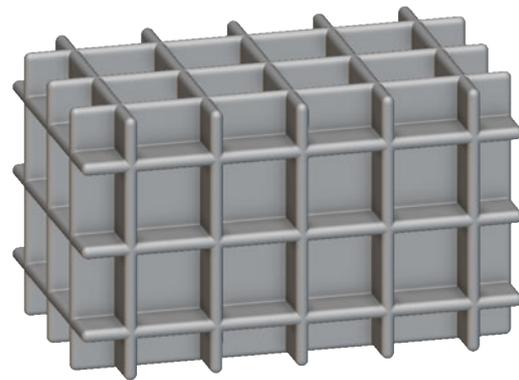
Abbildung 19: Auswirkungen Cell Maps bei gleicher Lattice-Struktur 19a rechteckig 19b zylindrisch 19c kugelförmig

Bei dem dritten benötigten Parameter handelt es sich um die Materialstärke der Lattice-Struktur, so kann die Masse/Dichte der Lattice-Struktur konfiguriert werden.

In Abb. 20 ist ein Beispiel für die Erstellung einer Lattice-Struktur zu sehen. Hier dargestellt ist eine Lattice-Struktur, die aus einem Quader mit den Maßen 30x50x30 mm erstellt wurde. Es wurde eine rechteckige Cell Map gewählt mit einer Zellengröße von 10x10x10 mm. Als Lattice-Struktur dient Simple cubic foam, die Materialstärke beträgt 1,5 mm.



(a)



(b)

Abbildung 20: Beispiel Lattice Erzeugung 20a Block Periodic Lattice 20b Lattice Struktur

Für die Unit Cell können auch andere Lattice-Struktur Arten verwendet werden. In Abb. 21 werden die verschiedenen Unit Cells abgebildet. So können auch Lattice-Strukturen mit mehreren Parametern verwendet werden, ebenso wie Custom Lattice-Strukturen, welche nicht der nTop Bibliothek entstammen. Auf die weiteren Möglichkeiten die nTop hier bietet wird in diesem Überblick der Lattice Funktionen nicht eingegangen.

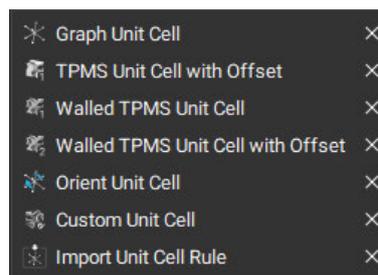


Abbildung 21: Verschiedenen Unit Cells in nTop

2.5.3 Topologieoptimierung

In diesem Kapitel wird die Topologieoptimierung in nTop näher betrachtet, ebenfalls sollen einige vereinfachte Grundlagen in diesem Kapitel erwähnt werden.

Die Topologieoptimierung ist ein Optimierungsverfahren, in dem Algorithmen genutzt werden um die Form eines Bauteils zu optimieren. Die Algorithmen arbeiten mit verschiedenen Vorgaben, dazu zählen die Lasten, die strukturellen Abhängigkeiten, sowie Materialinformationen. Die Algorithmen entfernen Material vom Ursprungsbauteil. Das Material wird hierbei in den Bereichen in denen keine Lasten getragen wird entfernt. So entsteht ein Bauteil dessen Form ähnlich den Kraftverläufen der Lasten und strukturellen Abhängigkeiten ist. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei meistens auf der Gewichtsreduzierung, es können jedoch auch andere Ziele definiert werden wie z.B. die Verringerung von Eigenfrequenzen.

Die Topologieoptimierung kommt häufig in Verbindung mit der additiven Fertigung zum Einsatz, da die komplexen Formen aufgrund der Möglichkeiten der additiven Fertigung gut ausgenutzt werden können. Die hohen Bauteilkomplexitäten können mit klassischen Fertigungsverfahren häufig nur sehr schwer abgebildet werden [9]. In Abb. 22 ist ein Beispiel für eine Topologieoptimierung zu sehen.

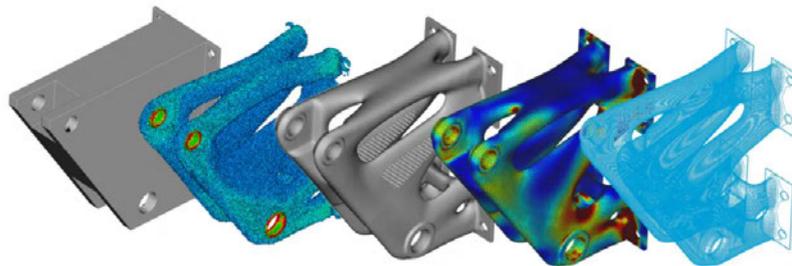


Abbildung 22: Beispiel Topologieoptimierung [9]

nTop nutzt für die Topologieoptimierung die SIMP-Methode. Die SIMP-Methode ist eine mathematische Methode. Hier wird ein Modell erzeugt, das jedem Element einen Dichtewert zuweist. Es wird der Einfluss jedes Elements auf die Steifigkeit des Bauteils bewertet. Die Elemente die einen zu geringen positiven Einfluss haben werden entfernt [10].

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Grenze, welche Elemente entfernt werden sollen im nach hinein verschoben werden kann. So können noch Änderungen an der Masse des Bauteils vorgenommen werden. Auf erneute Berechnung für kleine Anpassungen kann so verzichtet werden.

Im folgenden wird der Ablauf für eine Topologieoptimierung in nTop beschrieben. In Abb. 23 ist das Notepad von einer Topologieoptimierung zu sehen.



Abbildung 23: nTop Notepad Topologieoptimierung

In der ersten Sektion **Bauteil** wird das zu optimierende Bauteil importiert. Hier werden Flächen markiert die für die Funktion relevant sind, dies ist nötig damit die Funktionsflächen in der Nachbearbeitung aufgedickt werden können. Innerhalb der Topologieoptimierung werden diese Bereiche teilweise entfernt. Eine Umwandlung des importierten Dateityps in einen implicit body wird hier durchgeführt. Hierbei handelt es sich um den Dateityp den nTop verarbeiten kann. In Abb. 24 ist die Sektion **Bauteil** zu sehen. Die Funktionsflächen sind hier die Verschraubungen und die Bolzenflächen.

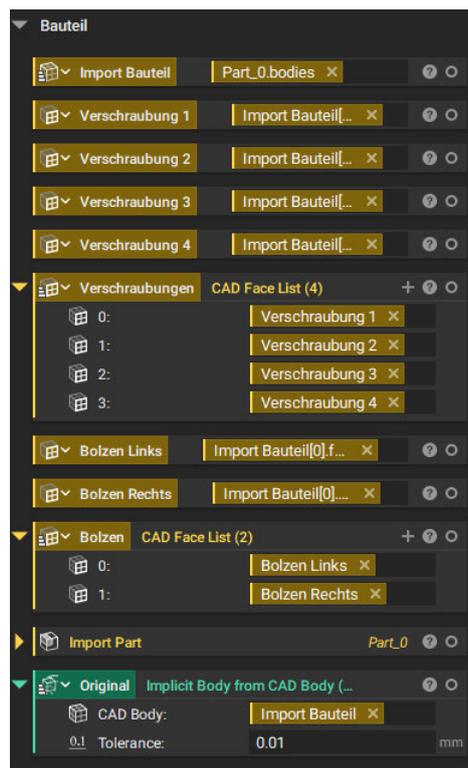


Abbildung 24: nTop Sektion Bauteil Topologieoptimierung

In der kommenden Sektion **FE Model** geht es darum, das Bauteil so vorzubereiten, dass es optimiert werden kann. Hier wird das FE Model aufgebaut. Das FE Modell besteht aus einem Netz und einer Materialzuweisung. Die Vernetzung erfolgt in nTop in mehreren Schritten. Im ersten Schritt kann aus einem Körper ein erstes Netz erzeugt werden. Dabei handelt es sich

um ein grobes Netz, das nur auf der Oberfläche des Körpers liegt. Hier muss eine maximale Toleranzabweichung zum original Bauteil festgelegt werden. Dieser Wert bestimmt auch die Anzahl der Elemente des ersten Netzes.

Im nächsten Block Remesh Surface wird die Oberfläche neu vernetzt, hierbei steigt die Güte des Netzes an. Im nächsten Schritt wird über den Block Volume Mesh ein Netz erzeugt, das das Volumen des Körpers abdeckt. Nun ist das eigentliche Netz erstellt. Dies wird noch in den Block FE Volume Mesh in ein Netz umgewandelt, das für Berechnungen genutzt werden kann. Die blaue Farbe des FE Blocks zeigt, dass es sich um einen Berechnungsblock handelt. Nun kann das FE Model erzeugt werden mit den Block FE Volume Mesh und einem Materialspezifischen Block. Die beschriebene Sektion ist in Abb. 25 zu sehen.

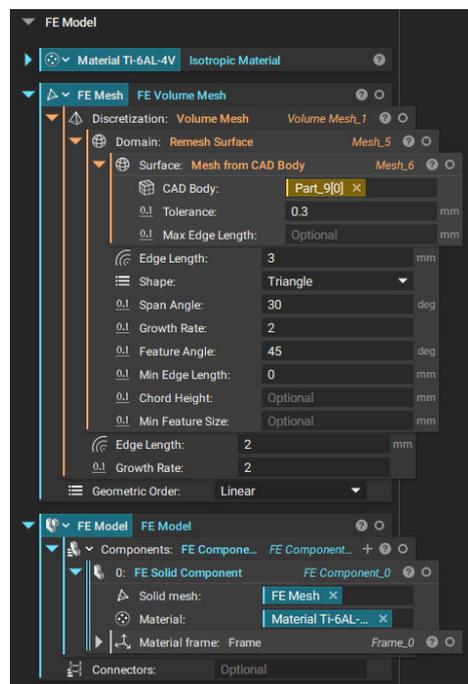


Abbildung 25: nTop Sektion FE Model Topologieoptimierung

In der folgenden Sektion Randbedingungen werden die Lasten und strukturellen Abhängigkeiten festgelegt. Wichtig ist hier, dass jedem Lastfall das passende FE Modell zugewiesen ist. In dem aktuellen Beispiel werden Einspannungen erstellt und die vier jeweiligen Lastfälle erstellt. In Abb. 26 sind die Lasten und strukturellen Abhängigkeiten zu sehen.

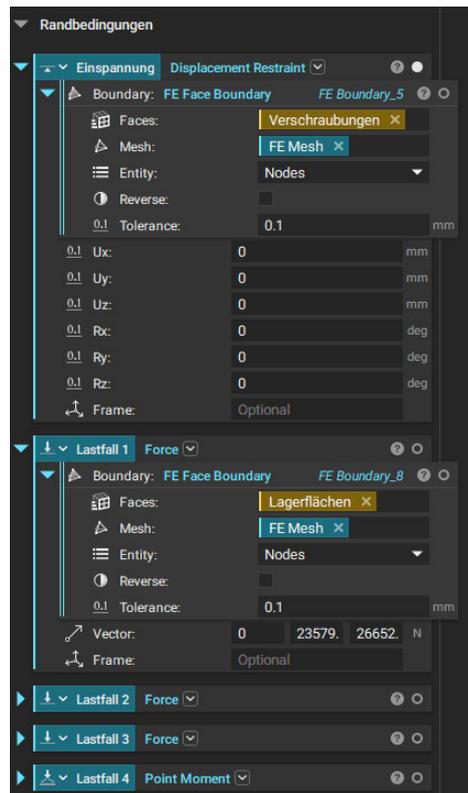


Abbildung 26: nTop Sektion Randbedingungen Topologieoptimierung

Mittlerweile sind alle Bedingungen für eine Topologieoptimierung erfüllt. Nun kann der Topologieoptimierungsblock genutzt werden. Hier gilt es das FE Modell zu nehmen, mit dem auch die Randbedingungen verknüpft sind. Dann wird das Optimierungsziel definiert und die einzelnen Lasten mit den jeweiligen Einspannungen werden eingepflegt. Es könnten noch weitere Bedingungen wie beispielsweise Symmetrieebenen erstellt werden. Des Weiteren gibt es noch Einstellungen hinsichtlich des Abbruchkriteriums. In Abb. 27 ist der Topologieoptimierungsblock zu sehen. Hier mit den vier Lastfällen und dem Ziel der Reduzierung der Masse auf 15 %.

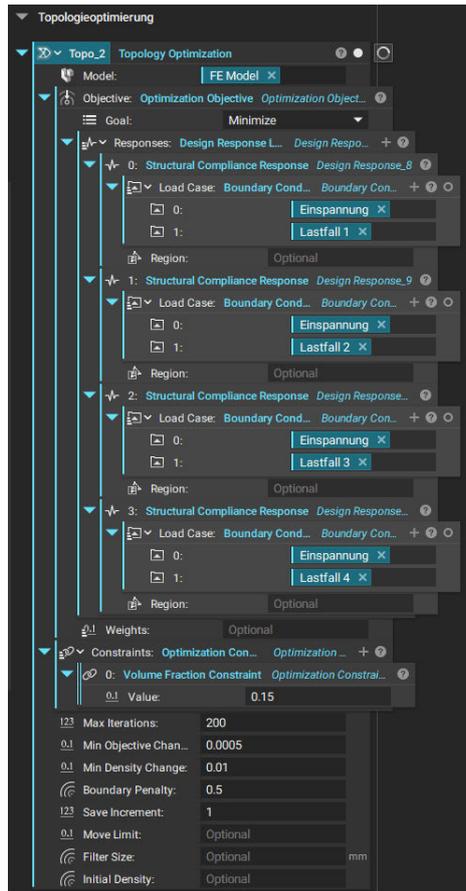
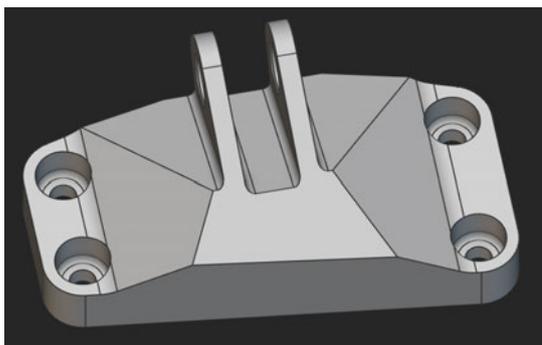


Abbildung 27: nTop Sektion Topologieoptimierung

Das Ergebnis des hier beschriebenen Beispiels ist in Abb. 28 zu sehen. Abgebildet ist das original Bauteil, sowie die Optimierte Version. Die topologieoptimierte Version erfordert eine Nachbearbeitung, da das Bauteil in dem aktuellen Zustand nicht nutzbar ist.



(a)

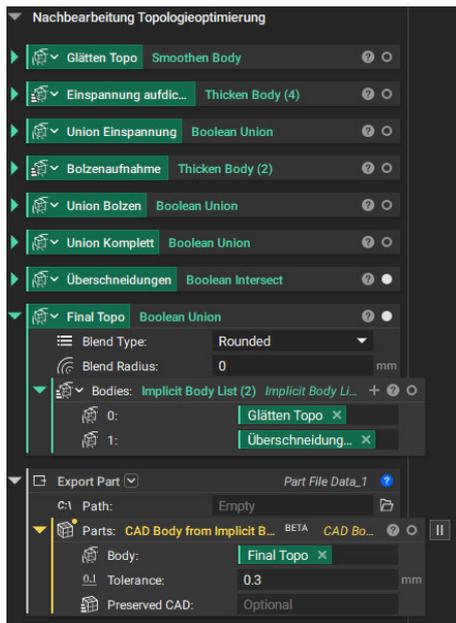


(b)

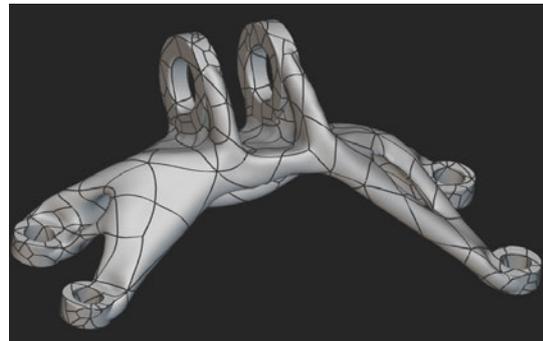
Abbildung 28: 28a Original Bauteil | 28b Ergebnis Topologieoptimierung

Es folgt die letzte Sektion Nachbearbeitung der Topologieoptimierung. Im ersten Schritt wird hier die erzeugte Geometrie geglättet. Dies erfolgt über den Smoothen Body Block. Des weiteren müssen die Funktionsflächen wieder hergestellt werden. Hierfür werden die Funktions-

flächen aufgedickt. Die aufgedickten Funktionsflächen entsprechen noch nicht der benötigten Form, hierfür muss noch ein Boolean Intersect Block angewendet werden. Dieser vergleicht die Aufdickungen mit dem original Bauteil, nur bei Überschneidungen bleibt das Material erhalten. Im letzten Schritt werden alle Körper über den Boolean Union Block miteinander verbunden, sodass ein Bauteil entsteht. Nun muss der Körper noch in ein CAD-Part umgewandelt werden. Nach diesem Schritt ist das Bauteil bereit für den Export. In Abb. 29 ist die letzte Sektion, sowie das Ergebnis nach der Nachbearbeitung und Umwandlung zum exportierbaren Bauteil zu sehen.



(a)



(b)

Abbildung 29: 29a Sektion Nachbearbeitung Topologieoptimierung | 29b Finales Ergebnis Topologieoptimierung

2.5.4 Feldoptimierung

Eine Feldoptimierung ist ein Optimierungstool, das von der Firma nTop entwickelt wurde. Optimiert werden Parameter die innerhalb vordefinierter Grenzen verlaufen. Generell erlaubt der Algorithmus der Feldoptimierung eine Optimierung der Dicken der Schale und Lattice-Struktur, sodass das angegebene Ziel best möglich abgebildet werden kann.

Die Feldoptimierung optimiert nicht die äußere Form des Bauteils. Aus diesem Grund ist es zu empfehlen eine Topologieoptimierung nach Kap. 2.5.3 durchzuführen, mit einem höheren Gewichtsziel. Die Optimierung hin zum Zielgewicht erfolgt dann mit Hilfe der Feldoptimierung.

Für die Feldoptimierung müssen wie für die Topologieoptimierung einige Vorbereitungen getroffen werden. Es muss hier ein FE Volume Mesh erzeugt werden und die Lasten und Strukturellen Abhängigkeiten müssen erstellt werden. In Kap. 2.5.3 steht näher beschrieben, wie der Arbeitsablauf für diese beiden Schritte ist.

Bei der Feldoptimierung gibt es vier verschiedene Optimierungsarten. Bei der ersten Art handelt es sich um den Parametric Lattice Component. Hier wird aus dem Modell eine Lattice-Struktur mit veränderlichen Materialstärken erzeugt, es gibt keine Schale. Die zweite Variante ist die Parametric Shell Component. Bei dieser Version wird eine Schale erzeugt mit variablen Dicken, ohne Lattice Struktur. Bei der dritten Variante handelt es sich um den Parametric Shell-Infill Component. Hier wird sowohl die Schale als auch die Lattice-Struktur mit variablen Dicken optimiert. Dies ist auch die Variante, die in dieser Thesis näher untersucht wird. Zur Vollständigkeit wird noch die vierte Variante ergänzt. Hier handelt es sich um den Parametric Voronoi Component. Diese Version erzeugt eine Voronoi-Lattice Struktur. Diese ist jedoch für Anwendungen im Bereich Leichtbau mit dem Ziel der maximalen Performance ungeeignet. Voronoi Lattice-Strukturen eignen sich besser um bestimmte Nachgibigkeiten zu erreichen. In Abb. 30 sind die verschiedenen Versionen mit einem Beispielbild aufgelistet.

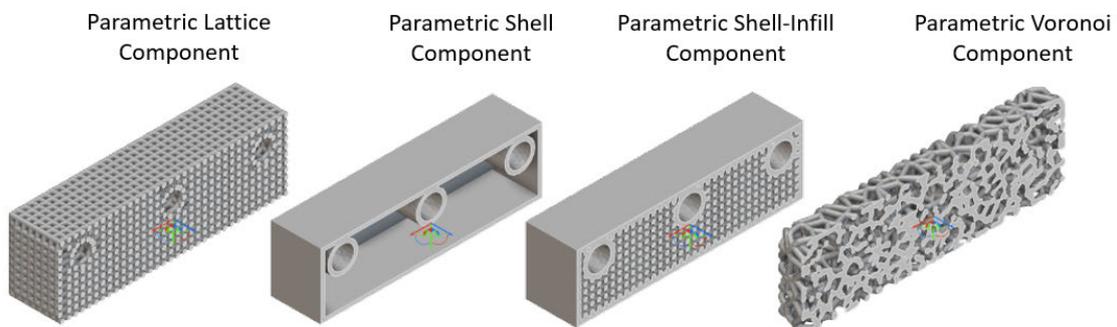


Abbildung 30: Arten der Feldoptimierung [11]

Im folgenden wird gezeigt wie der Workflow für eine Feldoptimierung aussieht. Das Anlegen des Netzes sowie der Lasten und strukturellen Abhängigkeiten kann dem Kap. 2.5.3 entnommen werden. Auch die Nachbearbeitung unterscheidet sich nicht von dem der Topologieoptimierung.

Die nötigen Blöcke für die Feldoptimierung sind in Abb. 31 zusehen. In der Feldoptimierung gibt es kein FE Model. Hier wird das FE Volume Mesh in einen Block der vier Feldoptimierungsarten aus Abb. 30 eingefügt. In diesem Beispiel in den Parametric Shell-Infill Component Block. In diesem Block müssen weitere Parameter eingepflegt werden. Das Material wird hier definiert. Die Art der Infill Lattice-Struktur, die Zellgröße, die jeweiligen Grenzabmaße für die Lattice-Struktur und die Schale, sowie deren Startgrößen. Die Lattice-Strukturen sind hier auf die in nTop vorhandenen begrenzt, es können keine Custom Lattice-Strukturen eingesetzt werden. Der Parametric Shell-Infill Block kann nun in den Feldoptimierungsblock eingesetzt werden.

In dem Feldoptimierungsblock wird nun das Ziel definiert in diesem Fall die Masse zu minimieren zu einem Zielwert. Nun werden noch vier Lastfälle angegeben die bei der Optimierung berücksichtigt werden sollen. Es finden sich noch Abbruchkriterien am Ende des Blocks.

Damit ist die Feldoptimierung vollständig und kann ausgeführt werden.



Abbildung 31: 31a Parametric Shell-Infill Block | 31b Fieldoptimization Block

In Abb. 32 ist eine Schnittdarstellung von dem feldoptimierten Bauteil zu sehen. Hier sind die variablen Wandstärken der Schale gut zu erkennen. Die unterschiedlich Lattice dicken sind auf der Abbildung schwer zu erkennen.



Abbildung 32: Schnittdarstellung feldoptimiertes Bauteil

2.6 Überblick über verschiedene Software zur Erzeugung von Lattice-Strukturen

In diesem Abschnitt des Kapitels soll es um verschiedene Programme zur Erzeugung von Infill Lattice-Strukturen gehen. Zu nTop wird es in diesem Kapitel keine weiteren Erklärungen geben, da bereits in Kapitel 2.5 die Funktionsweise und die Möglichkeiten von nTop aufgeführt sind. Im Vergleich zwischen den Programmen wird nTop mit einbezogen. Aufgrund des hohen Aufwands wird auf eine Einarbeitung in die einzelnen Programme verzichtet und es soll lediglich kurz aufgezeigt werden, wie weit fortgeschritten andere Lattice Werkzeuge sind, im Vergleich zu nTop mit der implizierten Feldoptimierung. Die Auswahl der Programme hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.6.1 Altair Sulis

Altair hat zwei Programme mit denen Lattice-Strukturen erstellt werden können. Hierzu zählen Altair Inspire und Altair Sulis. Das fortgeschrittenere Programm ist Altair Sulis [12]. Altair Sulis ist speziell für das Erstellen von Lattice-Strukturen für die additive Fertigung ausgelegt.

Die Auswahl der möglichen Lattice-Strukturen bewegt sich in einem ähnlichen Bereich wie nTop. Hier sind keine größeren Unterschiede zu erkennen.

In Altair kann die Lattice-Struktur heterogen ausgelegt werden. Dies bedeutet, dass die Lattice-Struktur sich innerhalb eines Bauteils verändern kann. In Abb. 33 ist ein Beispiel abgebildet. Eine Abhängigkeit von Belastungen und strukturellen Randbedingungen für die Lattice-Struktur oder die Schale gibt es nicht. Somit können lediglich händische Versuche unternommen werden, die Performance der Lattice-Struktur weiter zu steigern.

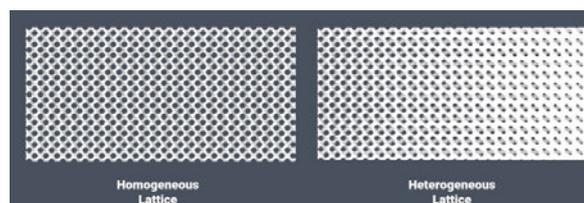


Abbildung 33: Altair Homogen / Heterogenes Lattice [13]

Fazit

Altair bietet zwei Programme mit denen Lattice-Strukturen erstellt werden können. In einem Programm gibt es die Möglichkeit innerhalb einer Lattice-Struktur die Parameter anzupassen, dies jedoch nicht in Abhängigkeit von Randbedingungen.

2.6.2 Autodesk Fusion 360

In Fusion 360 gibt es innerhalb der Product Design Erweiterung die Möglichkeit Lattice-Strukturen einzubringen. Das Tool in Fusion 360 ist jedoch nicht umfangreich. Es gibt lediglich die Möglichkeit Lattice-Strukturen einzubringen. Die Anpassung von Parametern ist möglich, jedoch geht es nicht über die Standards hinaus [14]. Die Erzeugten Lattice-Strukturen sind konstant und können sich nach einer Bedingung verändern, wie in Abb. 33.

Fazit

Fusion 360 deckt im Bereich Lattice nur mit einem Zusatzpaket die nötigsten Funktionen ab. Insgesamt steht diese Produkterweiterung in keiner Konkurrenz mit nTop.

2.6.3 Carbon Design Engine

Die Firma Carbon hat eine Software auf den Markt gebracht, die speziell für die Erstellung von Lattice-Strukturen ausgelegt ist. Die Carbon Design Engine bietet außerhalb der Lattice Erstellung keine weiteren Features. Es ist möglich innerhalb dieser Software viele gängige Lattice-Strukturen zu nutzen. Des Weiteren können Zonen definiert werden, welche verschiedene Eigenschaften haben sollen in der Lattice Erzeugung. Allerdings gibt es hier ebenfalls keine Möglichkeit die Lattice-Struktur in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen zu erzeugen [15].

Fazit

Die Carbon Design Engine bietet alle klassischen Latticing Möglichkeiten, es können genauere Anpassungen über Zonen gemacht werden. Hierrüber könnte Iterativ die Lattice-Struktur optimiert werden. Das Programm bietet keine Möglichkeit äußere Rahmenbedingungen mit in die Erstellung der Lattice-Struktur einzubeziehen.

2.6.4 Siemens NX

Bei Siemens NX handelt es sich eine Software, die von der Konstruktion bis zu Fertigung alle Bereiche abdeckt. Siemens NX ist ein vollwertiges CAD-System [16]. Im Bereich der Lattice Erstellung werden die grundlegenden Funktionen angeboten. Siemens NX ermöglicht sowohl eine Topologieoptimierung, wie auch das generative Design. Eine Optimierung der Lattice-Struktur nach Lastfällen und strukturellen Abhängigkeiten ist jedoch nicht möglich.

Fazit

Siemens NX ist generell ein starkes Werkzeug im Bereich der Konstruktion und Optimierung. Im Bereich der Lattice-Erzeugung sind jedoch bis auf die normalen Tools zur Erzeugung von Lattice-Strukturen keine weiteren Funktionen vorhanden.

2.6.5 Ultrasim 3D Software HyDesign

Ultrasim HyDesign ist eine Software für die Lattice Erzeugung, die zur BASF-Gruppe gehört. Die Software ist ausschließlich zur Erzeugung von Lattice-Strukturen geeignet. Hierbei werden alle Standard Funktionen ermöglicht. Es ist möglich, die Bauteile in verschiedene Zonen zu unterteilen und diesen unterschiedliche Eigenschaften zuzuweisen. Eine Besonderheit dieser Software ist es, dass die Steifigkeit je nach Zone definiert werden kann. Dies ist beispielsweise für Sohlen sinnvoll. Funktionen in Richtung Leichtbau, die Lasten und strukturelle Abhängigkeiten mit einbeziehen gibt es nicht [17].

Fazit

Die Ultrasim 3D Software HyDesign bietet die normalen Lattice-Funktionen. Durch die Zonen und Parameter wie zum Beispiel die Steifigkeit können den Produkten bestimmte Eigenschaften mitgegeben werden. Fortgeschrittene Funktionen die dem Leichtbau zuträglich sind gibt es nicht.

2.6.6 Zusammenfassung Erzeugung von Lattice Strukturen

Es gibt eine größere Auswahl an Programmen, die die Erzeugung von Lattice-Strukturen ermöglichen. Allerdings kein Programm, das den Optimierungsgrad der implizierten Feld-technologie ermöglicht. In diesem Bereich hat nTop bisher ein Monopol. Es ist davon auszugehen, dass weitere Programme in dieser Nische nachkommen werden. Bisher kam es aber nicht dazu.

3 Ansätze zur Bauteiloptimierung mit Infill Lattice-Strukturen

Die additive Fertigung bietet die Möglichkeit Bauteile mit hoher Komplexität zu fertigen. In Bereichen in denen klassische Fertigungsverfahren an ihre Grenzen stoßen, kann die additive Fertigung ihre Stärken ausspielen. Aufgrund der additiven Bauweise können die Bauteile beliebig komplex werden, ohne dass sich der Fertigungsaufwand erhöht. Die Komplexität der Bauteile muss sich aber im Rahmen der Gestaltungsfreiheit des jeweiligen additiven Fertigungsverfahrens aufhalten.

In der Regel kann bei additiven Fertigungsverfahren pro Zeit ein bestimmtes Volumen aufgebaut werden. Die Konsequenz ist, dass ein Bauteil mit einem hohen Optimierungsgrad lediglich das erforderliche Mindestmaß an Volumen aufweist. Dies resultiert in einer gesteigerten Effizienz der Fertigung, da das Bauteil in kürzerer Zeit gefertigt werden kann.

Somit dient ein hoher Optimierungsgrad sowohl der Fertigung, wie auch der Nutzung. Der hauptsächlich genutzte Ansatz für die Optimierung von additiv gefertigten Bauteilen ist die Topologie Optimierung. Hier wird in Bereichen in denen es kein Kraftfluss gibt Material entfernt. Es entsteht ein Bauteil dessen Form an die auftretenden Belastungen angepasst ist. Um den Optimierungsgrad des Bauteils weiter zu erhöhen, können Infill Lattice-Strukturen zur Anwendung kommen. In diesem Kapitel soll auf die Möglichkeiten und die dazugehörigen Ansätze eingegangen werden, die durch eine Optimierung der Infill Lattice-Strukturen erreicht werden können.

In diesem Kapitel geht es um die Bewertung von verschiedenen Infill Lattice-Strukturen. Dazu werden die Lattice-Strukturen von nTop einer FEM Analyse mit drei verschiedenen Belastungsfällen unterzogen. So können die am besten geeigneten Lattice-Strukturen identifiziert werden, welche für die später folgende Feldoptimierung genutzt werden sollen.

Die implizierte Feldoptimierung lässt nur Lattice-Strukturen zu die bereits in nTop integriert sind. Dies schließt auch alle Custom-Lattice Strukturen aus, die in nTop importiert werden können. Es können nur die Strukturen aus Kap. 2.3 für die implizite Feldoptimierung genutzt werden.

In diesem Kapitel werden trotzdem drei weitere Lattice-Strukturen genauer betrachtet. Einen Versuch mit Hilfe der Topologieoptimierung eine Lattice-Struktur zu erzeugen wird es ebenfalls geben. Diese Erkenntnisse dienen zur Erweiterung des Wissens, über Lattice-Strukturen die vielversprechend sind.

In nTop gibt es zahlreiche verschiedene Lattice-Strukturen die sinnvoll genutzt werden können im Kontext des Leichtbau. Die verschiedenen Lattice-Strukturen sind in Kap. 2.3 visualisiert. In Kapitel 3.2 werden die Ergebnisse der nTop Lattice-Strukturen vorgestellt.

3.1 Testmethodik Infill Lattice-Strukturen

Um einen möglichst genauen Vergleich zwischen den verschiedenen Infill Lattice-Strukturen zu gewährleisten, gilt es für alle Lattice-Strukturen möglichst gleiche Bedingungen zu schaffen.

Hierfür wird ein Testaufbau geschaffen, dieser umfasst zwei Platten mit den Maßen 13x13x2mm, die beiden Platten haben einen Abstand von 9mm. Zwischen den beiden Platten werden in einem Würfel 9x9x9mm die Lattice-Strukturen erzeugt. Die Zellgröße ist auf 4,5x4,5x4,5mm festgelegt, so entstehen insgesamt 8 Zellen. In Abb. 34 ein Beispiel dieses Modells visualisiert. Die Randbedingungen liegen jeweils an den Platten an. Die untere Platte ist eingespannt, die obere Platte wird belastet. So laufen die Beanspruchungen über die Lattice-Strukturen, die die beiden Platten verbindet.

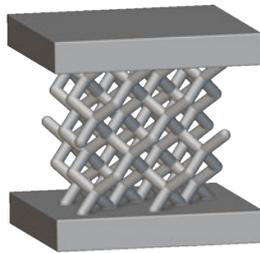


Abbildung 34: Modell FEM-Simulation Lattice-Strukturen

Für die folgende FEM Berechnung werden isotrope Materialeigenschaften genutzt. Auf die Einbeziehung anisotropen Eigenschaften verschiedener additiver Fertigungsverfahren wird nicht weiter eingegangen. Zur Berechnung wird das Material Aluminium genutzt. Hierbei wird das E-Modul auf 70.000 MPa und Poissonzahl auf 0,34 festgelegt [18]. Die Dichte liegt bei $2700 \frac{kg}{m^3}$ [18], hieraus ergibt sich bei einem 9x9x9mm Würfel eine Masse von etwa 1,96g. Um die Lattice-Strukturen zu vergleichen wird das Lattice Gewicht auf $\frac{1}{3} \approx 0,66g$ festgelegt. Für den Test werden die Wandstärken der Lattice-Strukturen so ausgewählt, dass das Gewicht der Lattice-Strukturen im Bereich von $0,66g \pm 0,003g$ liegt.

Um die Wirkung verschiedener Belastungen auf die Lattice-Strukturen bewerten zu können werden drei verschiedene Lastfälle gewählt. Diese sind in Abb. 35 zu sehen.

Hierbei handelt es sich um einen schrägen Lastfall Abb 35a. Hier wirken jeweils 100 N in drei Achsen. Bei dem zweiten Lastfall handelt es sich um eine Druckbelastung in der Z-Achse, dies ist in Abb. 35b dargestellt. Es wirkt eine Kraft von 500N. Bei dem dritten Lastfall handelt es sich um eine Torsionsbelastung die um die Z-Achse wirkt. Diese wurde über die vier Außenflächen der Platten eingebracht, dies ist in Abb. 35c zu erkennen. Das wirkende Moment beläuft sich auf 1,3 Nm, dies resultiert aus den jeweils 50 N die an den Flächen anliegen.

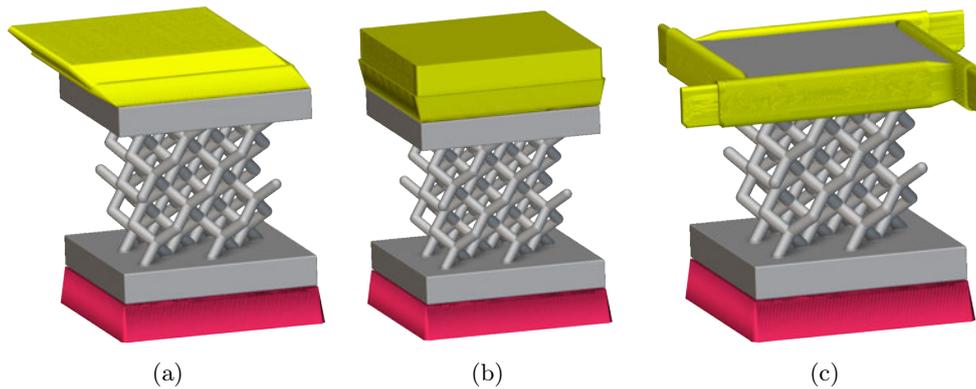


Abbildung 35: 35a Lastfall Schräg | 35b Lastfall Druck | 35c Lastfall Torsion

Aufgrund der guten Automatisierbarkeit von nTop wird die Berechnung der verschiedenen Lattice-Strukturen in nTop stattfinden. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass die drei FEM Modelle nur einmal aufgebaut werden müssen und aufgrund der Notebook Struktur von nTop die Bedingungen schnell geändert werden können. So muss nur die Latticeart und die Wandstärke angepasst werden und die Berechnung startet automatisch ohne weitere Anpassungen. Aufgrund des deutlich erhöhten Aufwandes wird auf einen Einsatz von Ansys verzichtet.

3.2 Nachweis der Belastbarkeit über FEM

Die Randbedingungen für den Vergleich der verschiedenen Lattice-Strukturen wurden in Kap. 3.1 festgelegt. Für die Berechnung wurden quadratische Funktionen benutzt. In diesem Kapitel gilt es nun die Ergebnisse der verschiedenen Lattice-Strukturen zu bewerten.

3.2.1 Schräger Lastfall

Die Simulationsergebnisse des ersten Lastfalls sind in Tab. 1 zu sehen. Die drei am besten performenden Lattice-Strukturen werden jeweils in einer Abbildung dargestellt. In diesem Fall in Abb. 36. Auffallend ist, dass es sich hier bei allen drei Lattice-Strukturen um planare Lattice-Strukturen handelt.

Lattice	Schräg Vergleichsspannung in MPa
Re Entrant Honeycomb	90,85
Hexagonal Honeycomb	91,71
Square Honeycomb	98,08
Neovius	105,18
Triagular Honeycomb	110,71
Square Honeycomb Rotated	120,39
Simple Cubic	146,76
Columns	147,85
IsoTruss	156,23
Simple Cubic Foam	161,23
Schwarz	168,46
Column	197,95
Body Centered Cubic Foam	201,36
Truncated Cube	216,40
Octet	219,96
Face Centered Cubic Foam	224,77
SplitP	228,20
Truncated Ocathedron	237,39
Diamond TPMS	262,13
Gyroid	270,75
Diamond	289,83
Kelvin Cell	308,34
Fluorite	370,43
Body Centered cubic	385,88
Waire-Phelan	503,13
Re-Entrant	838,50

Tabelle 1: Lattice-Vergleich Schräge Belastung

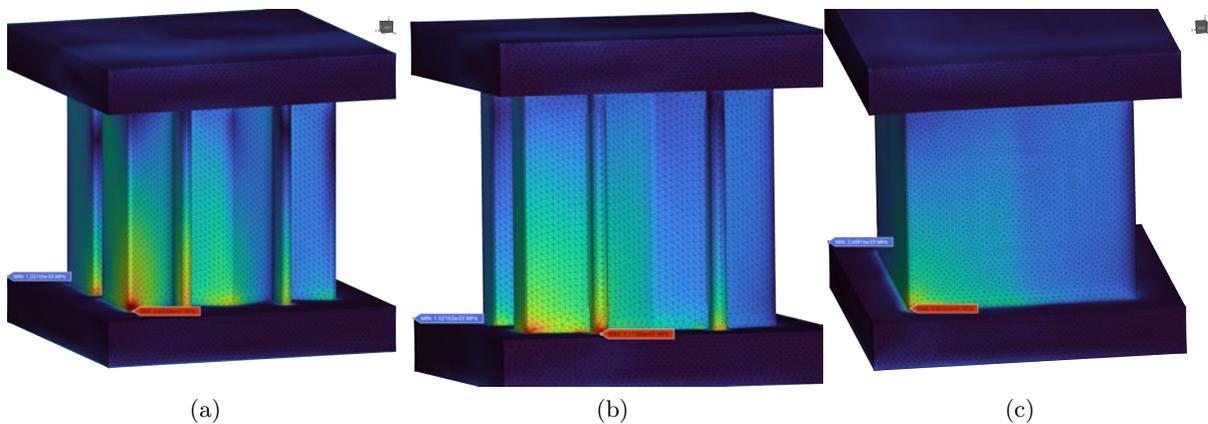


Abbildung 36: 36a Re-Entrant Honeycomb | 36b Hexagonal Honeycomb | 36c Square Honeycomb

3.2.2 Druck Lastfall

Die Ergebnisse der Simulation für Lattice-Strukturen mit Lastfall der Druckbelastung sind in Tab. 2 zu sehen. In Abb. 37 sind die drei Lattice-Strukturen zu sehen, die die niedrigste Vergleichsspannung aufweisen. Hier sind unter den drei Lattice-Strukturen zwei vorhanden, die der Streben Latticegruppe zugeordnet werden können und eine TPMS Lattice-Struktur.

Lattice	Druck Vergleichsspannung in Mpa
Columns	30,04
Simple Cubic	59,08
Neovius	61,65
Square Honeycomb	67,27
Re Entrant Honeycomb	75,55
Hexagonal Honeycomb	83,68
Diamond TPMS	86,89
Triangular Honeycomb	88,54
Square Honeycomb Rotated	90,96
IsoTruss	98,65
Schwarz	107,32
Truncated Cube	112,53
Gyroid	124,56
Column	127,74
Octet	137,01
Simple Cubic Foam	138,79
Body Centered Cubic Foam	143,54
Truncated Ocathedron	156,43
Diamond	178,05
SplitP	178,49
Face Centered Cubic Foam	185,45
Fluorite	201,25
Kelvin Cell	204,39
Body Centered cubic	255,04
Weaire-Phelan	290,72
Re-Entrant	754,56

Tabelle 2: Lattice-Vergleich Druck Belastung

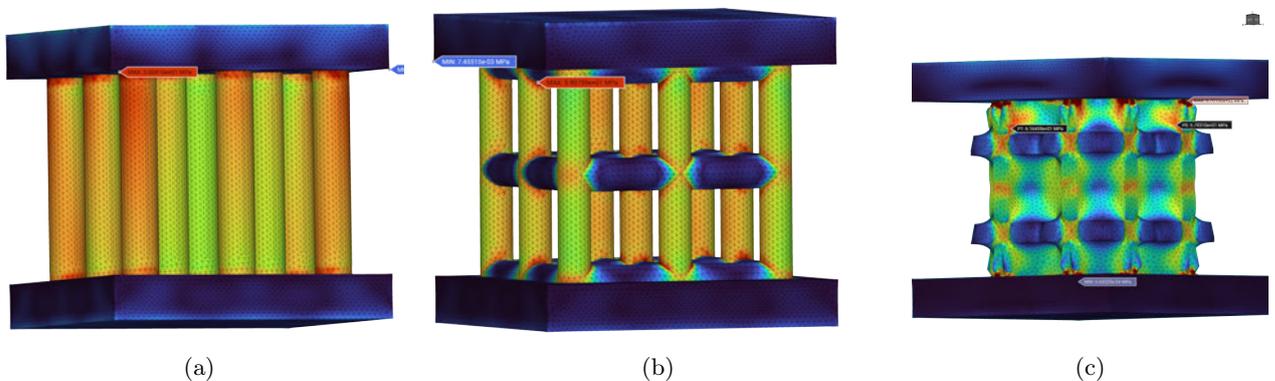


Abbildung 37: 37a Columns | 37b Simple Cubic | 37c Neovius

3.2.3 Torsions Lastfall

Die Simulationsergebnisse der Lattice-Strukturen für den dritten Lastfall der Torsion sind der Tab. 3 zu entnehmen. In Abb. 38 sind die Lattice-Strukturen abgebildet, die für diesen Lastfall die geringsten Vergleichsspannungen aufweisen. Für den Lastfall der Torsion handelt es sich wieder um Lattice-Strukturen, die planar sind.

Lattice	Torsion Vergleichsspannung in Mpa
Square Honeycomb	47,71
Hexagonal Honeycomb	91,43
Square Honeycomb Rotated	92,07
Gyroid	101,66
Neovius	104,14
Schwarz	104,37
Octet	112,33
Diamond TPMS	130
Re Entrant Honeycomb	131,43
Triangular Honeycomb	144,68
Body Centered cubic	150,21
Face Centered Cubic Foam	150,39
Simple Cubic Foam	197,70
IsoTruss	200,11
Body Centered Cubic Foam	207,24
Truncated Cube	218,89
SplitP	219,03
Fluorite	239,50
Diamond	264,85
Columns	269,44
Column	270,60
Kelvin Cell	270,76
Simple Cubic	305,68
Weaire-Phelan	416,93
Truncated Ocathedron	483,56
Re-Entrant	1250,08

Tabelle 3: Lattice-Vergleich Torsion

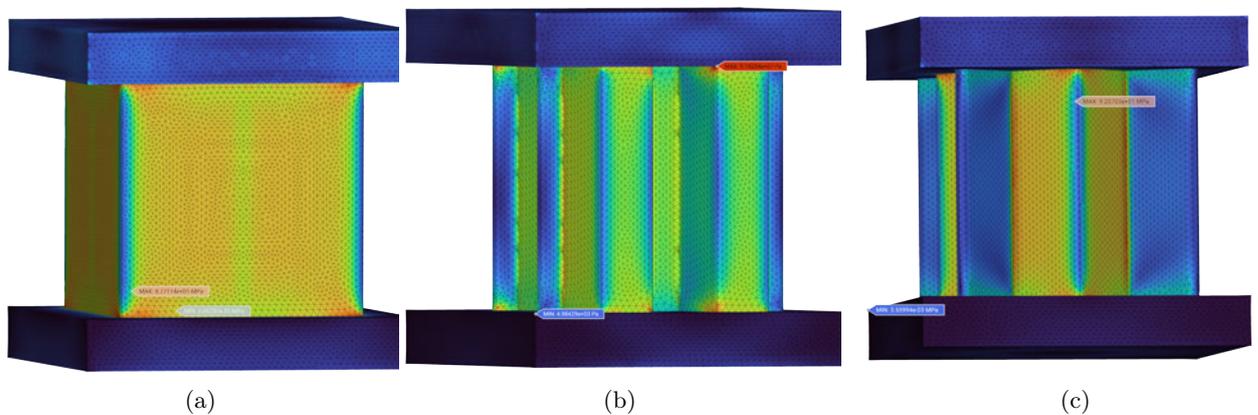


Abbildung 38: 38a Square Honeycomb | 38b Hexagonal Honeycomb | 38c Square Honeycomb rotated

3.2.4 Fazit

Um ein Gesamtfazit zu ziehen, werden die drei Vergleichsspannungen der Lattice-Strukturen addiert und ebenfalls in Tab. 4 dargestellt. Die drei Lattice-Strukturen mit der geringstem Gesamtvergleichsspannung sind in Abb. 39 abgebildet. Mit insgesamt 213,06 MPa wies die Lattice-Struktur Square Honeycomb die geringsten Vergleichsspannungen auf. Die Lattice-Struktur wird für den Demonstrator in Kap. 5 genutzt. Generell fällt auf, dass die Honeycomb Lattice-Strukturen im Vergleich gut abgeschnitten haben.

Lattice	Gesamt Vergleichsspannung in Mpa
Square Honeycomb	213,06
Hexagonal Honeycomb	266,82
Neovius	270,97
Re Entrant Honeycomb	297,83
Square Honeycomb Rotated	303,42
Triangular Honeycomb	343,93
Schwarz	380,15
Columns	447,33
IsoTruss	454,99
Octet	469,30
Diamond TPMS	479,02
Gyroid	496,97
Simple Cubic Foam	497,72
Simple Cubic	511,52
Truncated Cube	547,82
Body Centered Cubic Foam	552,14
Face Centered Cubic Foam	560,61
Column	596,29
SplitP	625,72
Diamond	732,73
Kelvin Cell	783,49
Body Centered cubic	791,13
Fluorite	811,18
Truncated Ocathedron	877,38
Weaire-Phelan	1210,78
Re-Entrant	2843,14

Tabelle 4: Lattice-Vergleich Gesamtvergleichsspannung

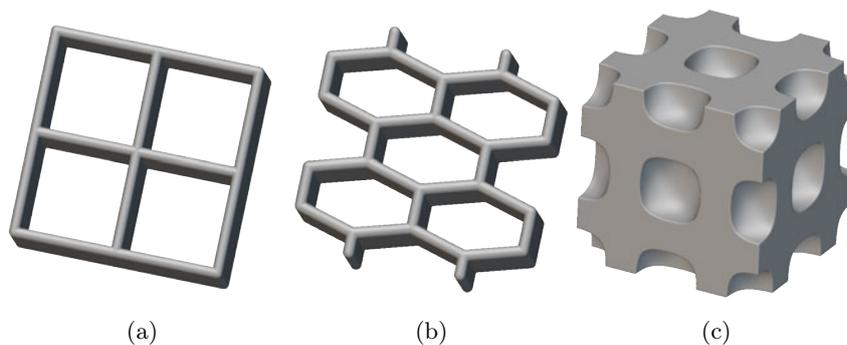


Abbildung 39: 39a Square Honeycomb | 39b Hexagonal Honeycomb | 39c Neovius

3.3 Analyse vielversprechender Lattice-Strukturen

In diesem Kapitel werden drei vielversprechende Lattice-Strukturen mit der Square Honeycomb Lattice-Struktur verglichen. Dies wird gemacht um einen Vergleich mit der am besten performenden Lattice-Struktur aus Kap. 3.2 ziehen zu können.

Bei den Lattice-Strukturen handelt es sich um Spherene und zwei Lattice-Strukturen die dem Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) entstammen.

3.3.1 Spherene

Bei Spherene handelt es sich um eine isotropische Minimaloberflächen Lattice. In Abb. 40 ist die Spherene Lattice-Struktur zu sehen.

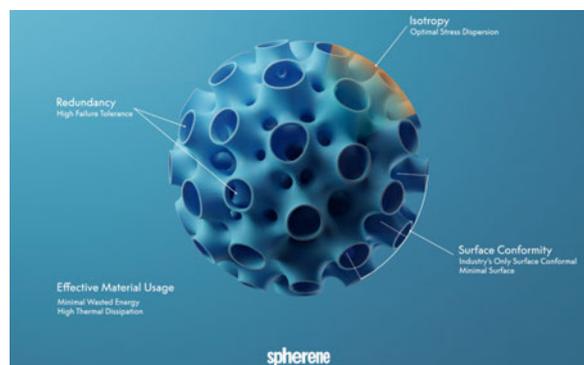


Abbildung 40: Spherene Lattice-Struktur [7]

Der Entwickler von Spherene spricht davon, dass durch die konforme Minimaloberfläche eine optimale Spannungsverteilung erreicht werden kann. Die Lattice-Struktur soll sich an jede Form anpassen können. In Abb. 41 wird die Wirkung von Kräften auf diese Lattice-Struktur visualisiert. Um die Wirkung besser darzustellen, hat sich der Hersteller entschieden eine Gyroid Lattice-Struktur im Vergleich dazu abzubilden. In der Abbildung wird deutlich, dass die Krafteinleitung in die Spherene Lattice-Struktur im Vergleich zur Gyroid Lattice-Struktur verbessert wurde [7]. Ein Vergleich mit der Gyroid Lattice Struktur hinsichtlich der Spannungen wird nicht erfolgen, da die Gyroid Lattice-Struktur in Kap. 3.2 schlechter abgeschnitten hat, als die Square Honeycomb Lattice-Struktur.

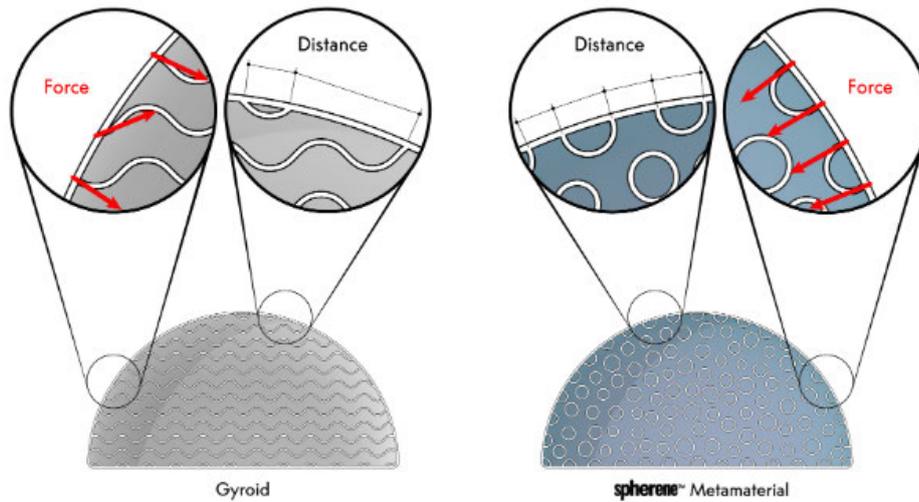


Abbildung 41: Krafteinleitung Gyroid vs Spherone [7]

Aufgrund der nicht vorhandenen Lizenz wurde aus einem Demobauteil ein 15 x 15 x 15 mm großer Würfel ausgeschnitten der für den Vergleich mit der Square Honeycomb genutzt wird. In Abb. 42 wird der Ausschnitt und das FE Model dargestellt.

Die Art der Lastfälle sind zu den vorigen Tests aus Kap. 3.2 identisch (siehe Abb. 35), aufgrund des größeren Würfels sind die Kräfte für diesen Vergleich höher. Die Druckkraft liegt bei 1000 N, der schräge Lastfall liegt bei 300 N pro Achse, die Torsion liegt bei 3,6 Nm.

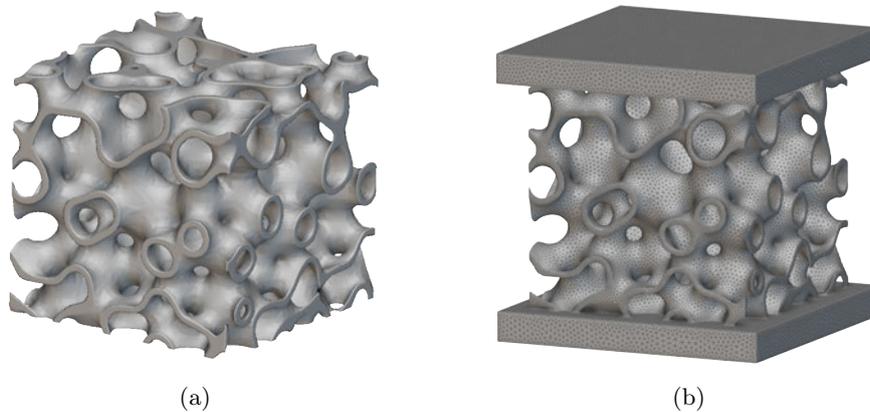


Abbildung 42: 42a Ausschnitt aus Demobauteil | 42b FE Model in nTop

Aufgrund dessen, dass die Spherone Lattice-Struktur einem Demobauteil entstammt, konnten hier keine Einstellungen hinsichtlich der Materialstärke oder ähnliches vorgenommen werden. Um eine gute Vergleichbarkeit zu erzielen, wird zum Vergleich eine Square Honeycomb Lattice-Struktur erzeugt, mit einer 5 x 5 x 5 mm Zellgröße die vom Gewicht her identisch ist in einem Rahmen von $\pm 0,003 g$. Die Zellgröße wurde ausgewählt, damit ein Würfel der Größe 15 x 15 x 15 mm erzielt werden kann.

Die Ergebnisse sind der Tab. 5 zu entnehmen. Hier wird deutlich, dass die Sphärische Struktur im Vergleich zum Square Honeycomb in jedem Lastfall schlechter abschneidet. Wenn man die Gesamtvergleichsspannung betrachtet führt das Nutzen einer Square Honeycomb Lattice-Struktur zu einer Spannungsreduzierung von etwa 35 %. Als Referenz am Rande, die Square Honeycomb Struktur reduziert die Vergleichsspannung im Vergleich zu einer Gyroid Lattice-Struktur um etwa 57 %. Im Vergleich zur Gyroid Lattice-Struktur hat die Sphärische Lattice-Struktur Vorteile erreichen können. Im offenen Vergleich mit dem best performingen Lattice hingegen hat die Sphärische Lattice-Struktur in den gegebenen Lastfällen schlechter abgeschnitten. In der Nachfolgenden Abb. 43 werden die Ergebnisse der FEM-Berechnungen visualisiert.

Lattice	Gewicht in g	Schräg				Gesamt
		Druck	Torsion	in MPa		
Sphärische	1,9611	246,534	158,246	154,514	559,294	
Square Honeycomb	1,9607	212,707	94,801	56,676	364,184	

Tabelle 5: Ergebnisse Vergleich Sphärische Lattice-Struktur

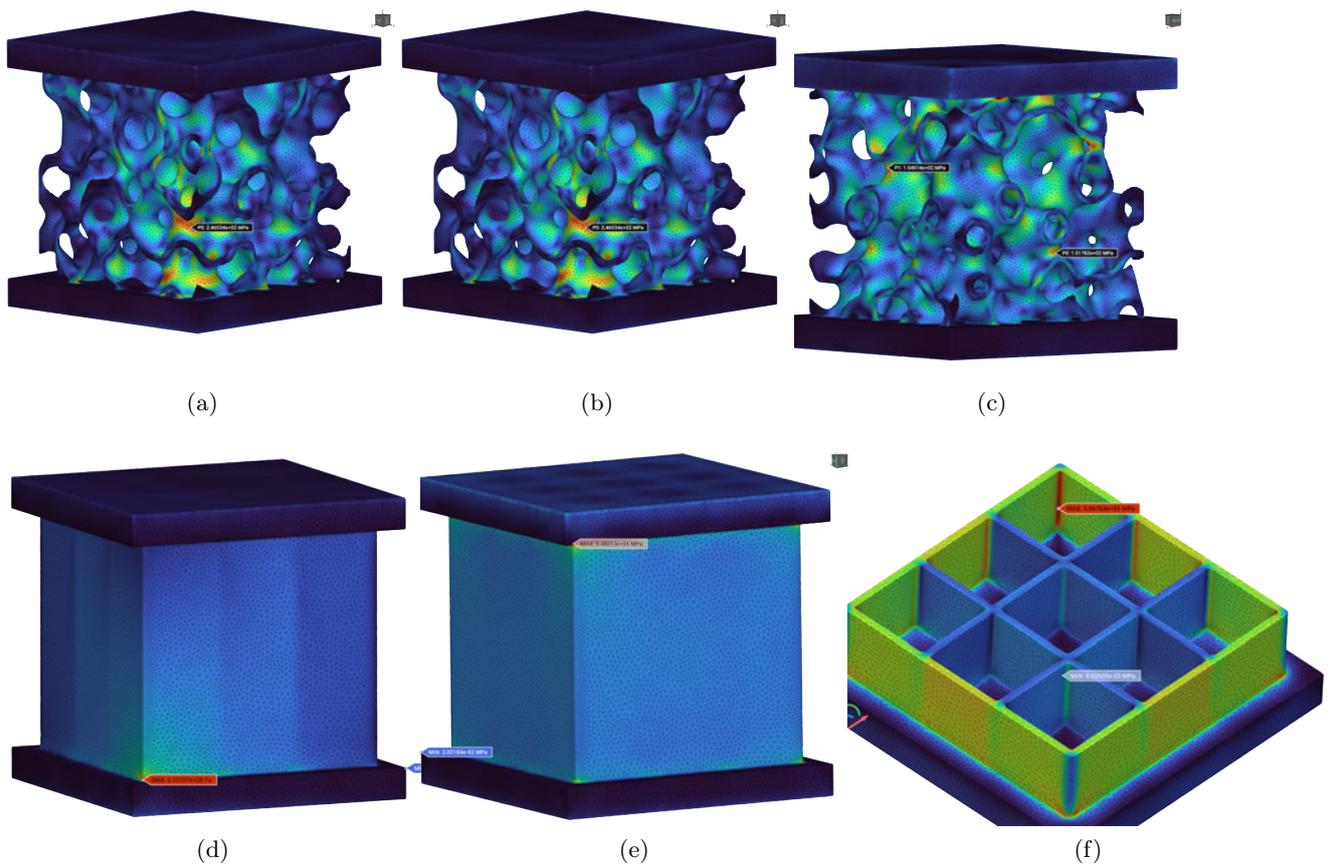


Abbildung 43: 43a & 43d Schräg | 43b & 43e Druck | 43c & 43f Torsion

3.3.2 Multi-Topology Lattice RMIT

In diesem Kapitel wird eine Lattice-Struktur die vom RMIT entwickelt wurde nach gebaut und mit der Square Honeycomb Struktur verglichen. In dem Paper Titanium Multi-Topology Metamaterials with Exceptional Strength [6], wird eine Multi Topology Lattice-Struktur beschrieben die gute mechanische Eigenschaften aufweisen soll. Die Zelle der Struktur aus dem Paper ist in Abb. 44 zu sehen. Des Weiteren ist in der Abbildung die nachgebaute Version zu sehen, da die eigentliche Lattice-Struktur aus dem Paper nicht verfügbar ist.

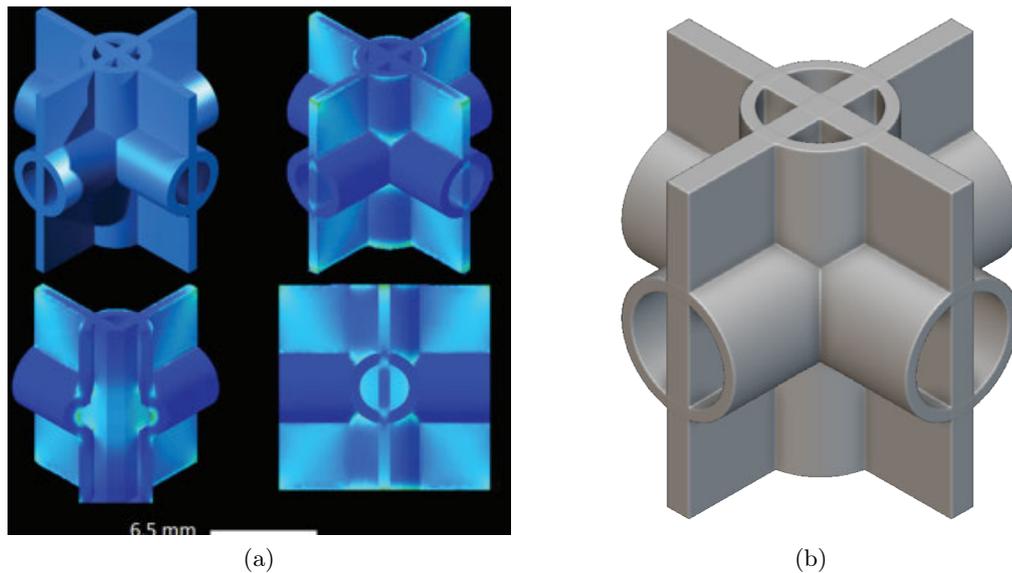


Abbildung 44: 44a Multi Topology Lattice-Struktur | 44b Nachgebaute Version

Die in Abb. 44b abgebildete Lattice-Zelle hat eine Größe von 5 x 5 x 5 mm. Für den Vergleich wird die Gesamte Lattice-Struktur 10 x 10 x 10 mm groß sein. Es werden die drei bisher genutzten Lastfälle weiter genutzt. Die Druckkraft liegt bei 1000 N, der schräge Lastfall liegt bei 150 N pro Achse, die Torsion liegt bei 2,2 Nm. In Abb. 45 ist die gesamte Lattice-Struktur zu sehen, sowie das FE-Modell.

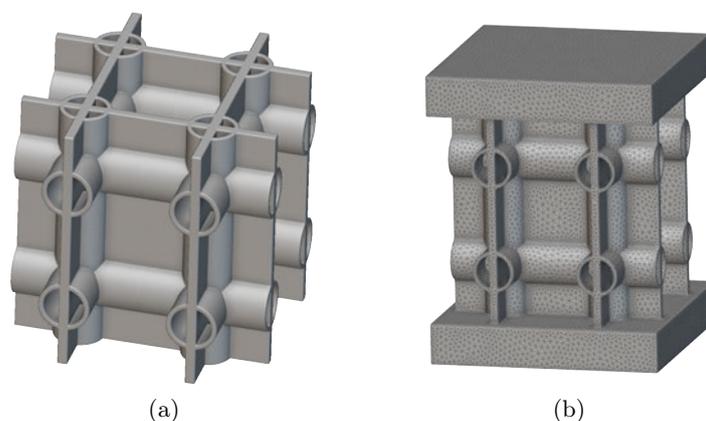


Abbildung 45: 45a Lattice-Struktur Multi-Topology | 45b FE Model in nTop

Für den Vergleich wird eine Square Honeycomb Lattice-Struktur erstellt mit der gleichen Zellgröße und einem Gewichtsunterschied kleiner als $\pm 0,003g$.

Die Ergebnisse des Vergleichs sind der Tab. 6 zu entnehmen.

In diesem Fall ist die Square Honeycomb Lattice-Struktur der nachgebauten Multi-Topology Lattice-Struktur, bei den gegebenen Lastfällen, deutlich überlegen. In jedem Lastfall weist die Square Honeycomb Lattice-Struktur signifikant geringere Vergleichsspannungen auf. Im Durchschnitt konnte die Square Honeycomb Lattice-Struktur eine Vergleichsspannungsreduzierung von etwa 48 % erreichen. In Abb. 49 sind die Ergebnisse der FEM-Berechnungen visualisiert.

Lattice	Gewicht in g	Schräg	Druck		Torsion	Gesamt
			in MPa			
Multi-Topology Lattice	0,6168	253,708	212,051	298,085	763,844	763,844
Square Honeycomb	0,6170	199,739	105,302	93,414	93,414	398,455

Tabelle 6: Ergebnisse Vergleich Multi-Topology Lattice-Struktur

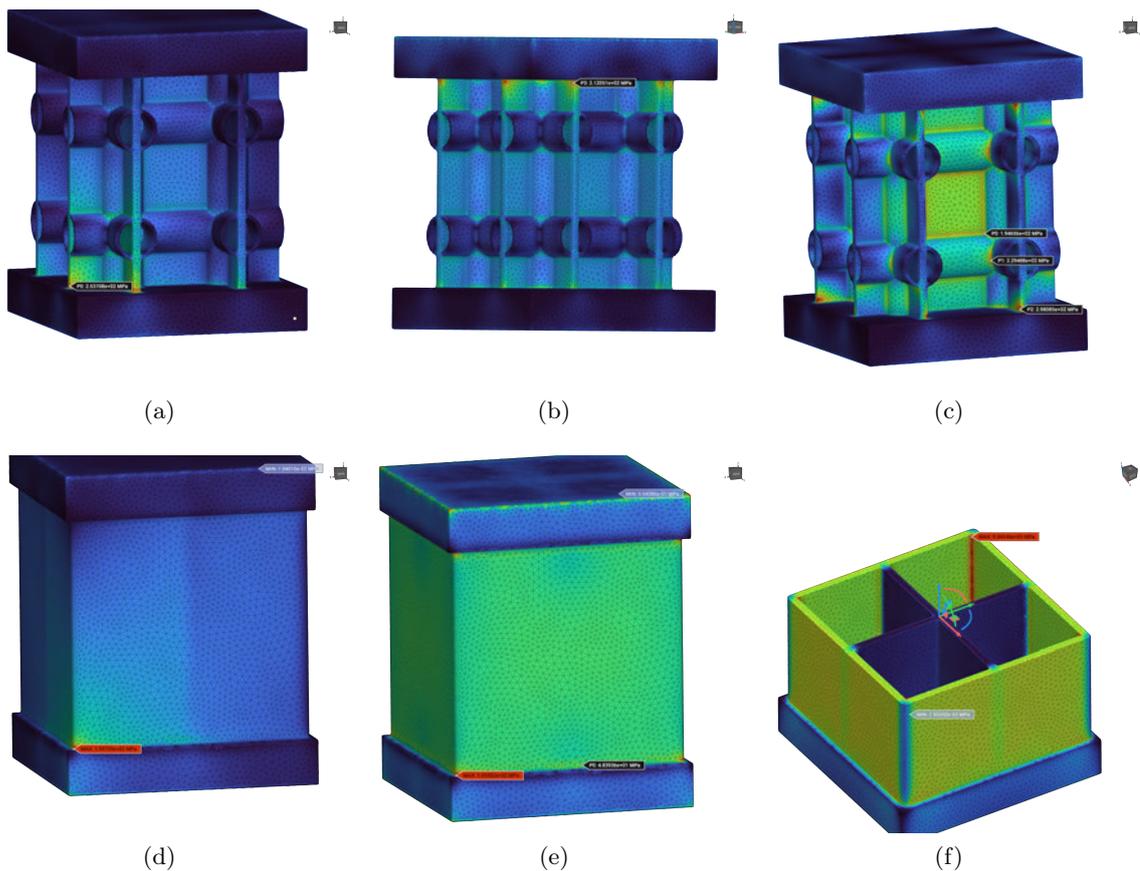


Abbildung 46: 46a & 46d Schräg | 46b & 46e Druck | 46c & 46f Torsion

3.3.3 Multi-Topology Lattice 2 RMIT

Das RMIT hat eine Lattice-Struktur zum Download für nTop bereit gestellt. Es handelt sich hier ebenfalls um eine Multi-Topology Lattice-Struktur. Zu dieser wurden jedoch keine näheren Informationen gefunden. Aber aufgrund der vorhandenen Daten kann ein Vergleich der Performance erstellt werden. Die zweite Multi-Topology Lattice Zelle ist in Abb. 47 zu sehen.

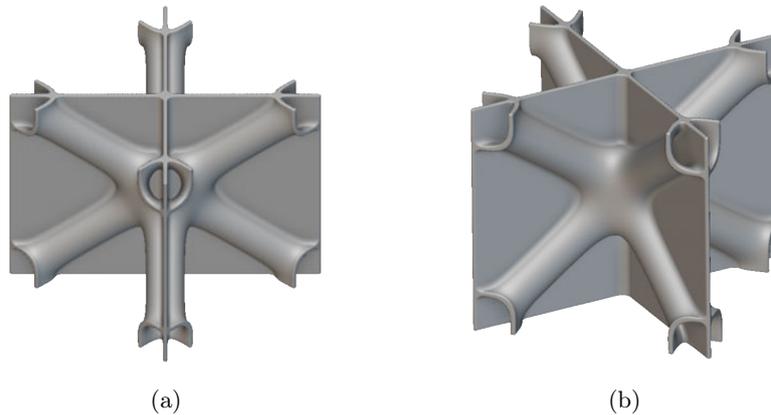


Abbildung 47: Zwei Ansichten der zweiten RMIT Lattice-Zelle

Die zweite RMIT Multi-Topology Lattice Zelle hat eine Größe von 5 x 5 x 5 mm. Die Lattice-Struktur für den Vergleich hat eine Gesamtgröße von 10 x 10 x 10 mm. Es werden die gleichen Lastfälle genutzt wie in den anderen Lattice Berechnungen. Die Druckkraft liegt bei 1000 N, der schräge Lastfall liegt bei 150 N pro Achse, die Torsion liegt bei 2,2 Nm. In Abb. 48 ist die gesamte Lattice-Struktur zu sehen, sowie das FE-Modell.

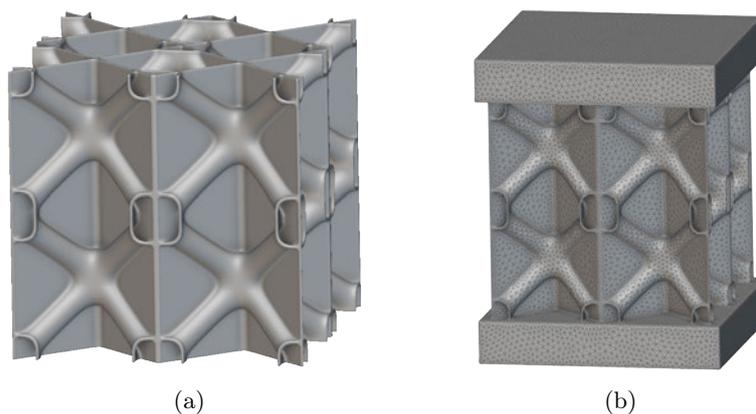


Abbildung 48: 48a Lattice-Struktur Multi-Topology | 48b FE Model in nTop

Für den Vergleich wird hier eine Square Honeycomb Lattice-Struktur erstellt mit identischer Zellgröße und einem Gewichtunterschied kleiner als $\pm 0,003g$.

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen der zweiten RMIT Mutli-Topology Lattice-Struktur und der Square Honeycomb Lattice-Struktur ist der Tab. 7 zu entnehmen.

In diesem Vergleich schneidet die Square Honeycomb Lattice-Struktur in jedem Lastfall deutlich besser ab. Im Durchschnitt konnte die Square Honeycomb Lattice-Struktur einen Vergleichsspannungsvorteil von etwa 50 % erreichen. Die zweit RMIT Lattice-Struktur erreicht damit etwa die doppelte Vergleichsspannung der Square Honeycomb Lattice-Struktur im Durchschnitt. In Abb. 7 sind die Ergebnisse der FEM Berechnungen visualisiert.

Lattice	Gewicht	Schräg	Druck	Torsion	Gesamt
	in g	in MPa			
Multi-Topology Lattice 2	0,2846	696,359	425,672	518,165	1640,196
Square Honeycomb	0,2824	418,317	232,401	175,222	825,940

Tabelle 7: Ergebnisse Vergleich zweite Multi-Topology Lattice-Struktur

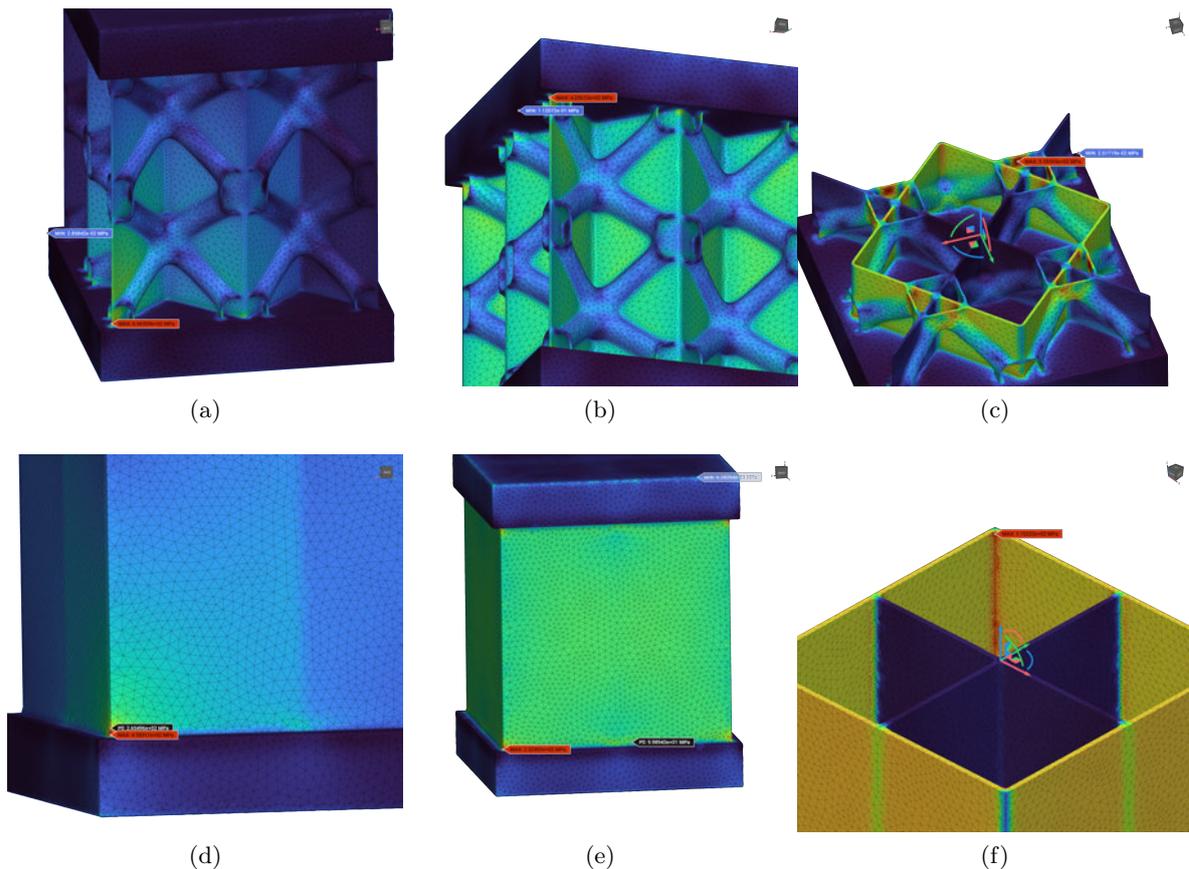


Abbildung 49: 49a & 49d Schräg | 49b & 49e Druck | 49c & 49f Torsion

3.3.4 Fazit vielversprechende Lattice-Strukturen

Der Vergleich zwischen der besten Lattice-Struktur aus Kap. 3.2 und den drei vielversprechenden Lattice-Strukturen hat gezeigt, dass weder die beiden RMIT Lattice-Strukturen, noch die Spherene Lattice-Struktur eine bessere Performance aufweisen kann.

Die beiden RMIT Lattice-Strukturen schnitten in dem Vergleich schlechter als die Spherene Lattice-Struktur ab. Die Square Honeycomb Lattice-Struktur konnte die durchschnittliche Vergleichsspannung um 48 % und 50 % senken, im Vergleich zu den beiden RMIT Multi-Topology Lattice-Strukturen. Dies entspricht etwa einer Halbierung der beiden Gesamtvergleichsspannungen. Daher kann die Nutzung der beiden RMIT Lattice-Strukturen nicht empfohlen werden, die Square Honeycomb Lattice-Struktur ist deutlich besser geeignet.

Die Square Honeycomb Lattice-Struktur konnte die im Vergleich zur Spherene Lattice-Struktur eine Gesamtvergleichsspannungsreduzierung von etwa 35 % erreichen. Der Abstand ist damit signifikant und daher kann aus der Perspektive des Leichtbaus ebenfalls von der Spherene Lattice-Struktur abgeraten werden. Die Square Honeycomb Lattice-Struktur ist hier deutlich besser geeignet. Es ist zu sehen, dass für gewisse Anwendungen die Spherene Lattice-Struktur im Vorteil ist, dann liegt der Fokus des Bauteils jedoch nicht auf dem Leichtbau.

3.4 Erstellung einer topologieoptimierten Lattice-Struktur

Ziel dieses Kapitels ist es eine mögliche Infill Lattice-Struktur mit Hilfe von nTops Topologieoptimierung zu finden.

Hierfür wird für den einfacheren Vergleich mit den bereits durchgeführten Test aus Kapitel 3.2 eine Zellgröße von 4,5x4,5x4,5 mm gewählt. Es wird ein entsprechend großer Würfel in CAD erstellt und in nTop importiert. Die Zieldichte der topologieoptimierten Infill Lattice-Struktur liegt bei 33% gleich wie den bereits durchgeführten Simulationen. Bei dem gewählten Material handelt es sich um das gleiche Material wie in Kapitel 3.2.

Die Rahmenbedingungen sind gelegt und es kann mit dem Aufbau des Notepads für die Topologieoptimierung begonnen werden. Der Aufbau der Topologieoptimierung orientiert sich am Kap. 2.5.3. Die Lastfälle und Strukturellen Abhängigkeiten sind wie in Kap. 3.1 gewählt. Damit die Zellen die Belastungen aus allen Richtungen ertragen können und eine Stapelbarkeit der Zellen gewährleistet werden kann, werden Symmetrieebene vorgegeben. In Abb. 50 sind die Symmetrieebene zum besseren Verständnis abgebildet.

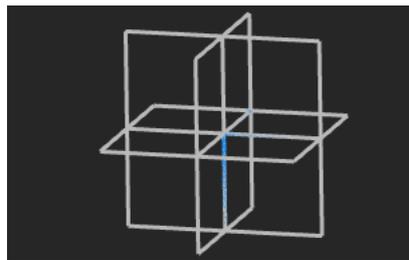


Abbildung 50: Symmetrieebenen topologieoptimierte Lattice-Struktur

Da alle Rahmenbedingungen nun festgelegt sind, kann die Topologieoptimierung nun durchgeführt werden. In Abb. 51a ist das roh Ergebnis direkt nach der Topologieoptimierung zu sehen. In Abb. 51b ist das Ergebnis nach der Nachbearbeitung zu sehen.

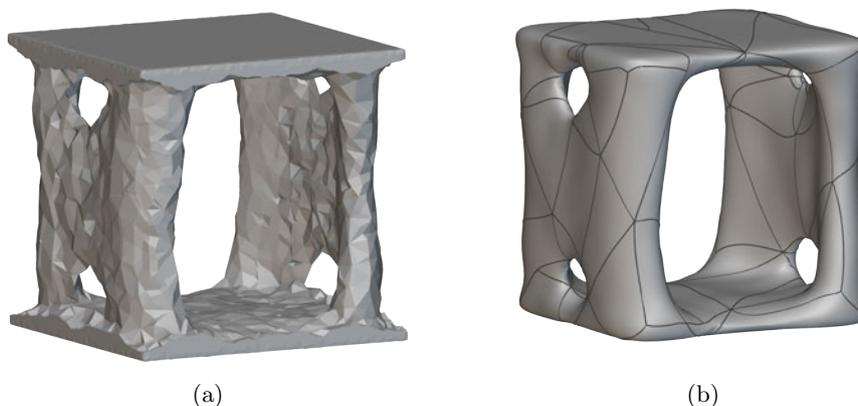


Abbildung 51: 51a Ergebnis Topologieoptimierung | 51b Ergebnis nach Nachbearbeitung

Im nächsten Schritt gilt es diese topologieoptimierte Struktur einer FEM-Analyse zu unterziehen. Als Vergleich dient die Lattice-Struktur, die in Kap. 3.2, die beste Performance erbracht hat. Dabei handelt es sich um Square Honeycomb. Die Square Honeycomb Lattice-Struktur weist hier ein Gewicht von 0,660g auf, die topologieoptimierte Lattice-Struktur ein Masse von 0,654g. Die Gewichtsabweichung liegt hier bei 0,9 %.

Die Vergleichsspannung unterliegen keinem linearem Verlauf hinsichtlich der Masse. Trotzdem wird für diese relativ kleine Abweichung ein linearer Verlauf angenommen um die Ergebnisse der FEM-Analyse zu bewerten.

In Tab. 8 sind die Ergebnisse der FEM-Berechnung denen des Square Honeycomb-Lattice gegenübergestellt. In Abb. 52 sind die drei Lastfälle und deren Ergebnisse visualisiert.

Die Performance unterschiede sind hier deutlich. Die topologieoptimierte Lattice-Struktur weist deutlich höhere Vergleichsspannungswerte auf, der Einfluss des geringern Gewichts kann hier vernachlässigt werden.

Aufgrund der nicht geschlossenen Flächen der topologieoptimierten Lattice-Struktur entstehen Kerbwirkungen, die die Performance negativ beeinflussen. Das Hauptproblem liegt darin, dass eine Topologieoptimierung nicht dafür gemacht ist eine Zelle zu optimieren, die in alle Richtungen mit der gleichen Zelle verbunden werden kann.

Lattice	Gewicht	Schräg	Druck	Torsion	Gesamt
	in g	in MPa			
Topo Lattice-Struktur	0,654	326,42	124,36	251,63	701,99
Square Honeycomb	0,66	98,08	67,27	47,71	213,06

Tabelle 8: Ergebnisse Topologieoptimierte Lattice-Struktur

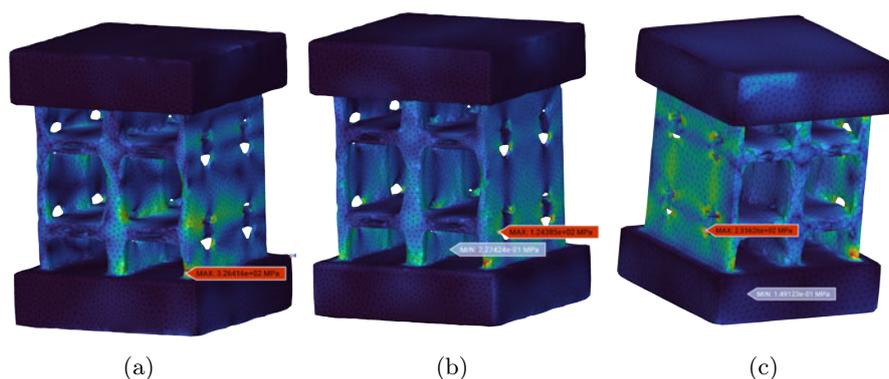


Abbildung 52: FEM-Simulation in nTop der topologieoptimierten Lattice-Struktur | 52a Lastfall 1 Schräg | 52b Lastfall 2 Druck | 52c Lastfall 3 Torsion

Eine topologieoptimierte Lattice-Struktur bietet Nachteile in der Performance und hat Herausforderungen aufgrund der schlechten Anbindungsmöglichkeiten, sobald mehrere Zellen benötigt werden. Daher wird dieser Ansatz verworfen und nicht weiter verfolgt.

3.5 Vergleich verschiedener Zellgrößen

Ein weiterer möglicher Performance Faktor für Lattice-Strukturen ist die Zellgröße. Die Zellgröße bestimmt die Größe einer Lattice Zelle. In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche Zellgröße zu einer besseren Performance führt. Hierzu werden die gleichen Lastfälle wie in Kap. 3.2 genutzt. Die Kräfte und Momente sind in diesem Kapitel höher, da es sich um eine größere Lattice Struktur handelt.

Der Lattice-Struktur Bereich für diesen Test sollte 36x36x36 mm groß sein. Für die Berechnungen oder den Export der Strukturen zur Berechnung wird jedoch mehr Arbeitsspeicher benötigt als bereit gestellt (32GB) ist, daher wird der Bereich auf 18x18x18 mm reduziert um die Berechnung durchführen zu können. So können statt 8 verschiedenen Zellgrößen nur noch 6 abgedeckt werden, die Anzahl sollte jedoch ausreichen um eine Aussage über den Einfluss der Zellgröße auf die Performance der Lattice-Struktur treffen zu können.

Der Raum soll wie in Kap. 3.2 zu $\frac{1}{3}$ mit Lattice-Struktur gefüllt sein. Hieraus ergibt sich bei der Dichte von Aluminium ($2,7 \frac{g}{cm^3}$ [18]) eine Gesamtmasse von etwa 5 g. Als Lattice-Struktur wird Square Honeycomb benutzt. Die Zellgrößen die getestet werden können der Tab. 9 entnommen werden.

Zellgröße (quadratisch)	Anzahl Zellen
3,0 mm	216
3,6 mm	125
4,5 mm	64
6,0 mm	27
9,0 mm	8
18,0 mm	1

Tabelle 9: Zellgrößen Vergleich

Die Test wurden in nTop durchgeführt. In Tab. 10 sind die Ergebnisse des Zellvergleichs zu sehen.

Zellgröße	Lattice-Strärke	Gewicht	Schräg	Druck	Torsion	Gesamt
in mm		in g	Vergleichsspannung in MPa			
3,0	0,435	5,0037	24,38	28,67	39,93	92,99
3,6	0,505	5,0013	37,70	36,94	29,01	103,65
4,5	0,603	5,0025	32,51	37,86	30,15	100,51
6,0	0,747	5,0048	41,57	34,96	32,45	108,98
9,0	0,982	5,0037	28,08	22,47	26,13	76,67
18,0	1,436	5,035	25,63	12,24	20,65	58,52

Tabelle 10: Ergebnisse Zellvergleich

Die Ergebnisse der drei Lastfälle sind in Abb. 53 visualisiert. Die Verläufe zwischen den Datenpunkten sind nicht bekannt, zur besseren Anschauung wurde trotzdem eine Linie gewählt. Die Linie dient daher nur zur besseren Nachverfolgung der Datenpunkte und trifft selbst keine

Aussage über die Performance.

Der erste Lastfall, die schräge Belastung, ist hier in blau dargestellt. Hier ist die Spannung in der kleinsten getesteten Zellgröße (3 mm) am geringsten. Im weiteren Verlauf steigt die Vergleichsspannung bis zur Zellgröße von 6,0 mm an. Danach fällt die Vergleichsspannung bis die Vergleichsspannung bei der 18,0 mm Zellgröße wieder einen ähnlichen Wert, wie die 3 mm Zellgröße erreicht hat.

Bei dem Lastfall Druck, in der Abbildung als gelb dargestellt, ist ein ähnliches Verhalten zu sehen. Bei diesem Lastfall sind jedoch die Ausprägungen anders. Von der 3 mm Zellgröße bis zur 4,5 mm Zellgröße steigt die Vergleichsspannung an. Ab diesem Punkt fällt die Vergleichsspannung deutlich. Die Vergleichsspannung bei der 18 mm Zellegröße ist mit 12,24 MPa deutlich kleiner als der Startwert der 3 mm Zellgröße mit 28,67 MPa. Hier führt eine Vergrößerung der Zelle zu einem deutlichem im Vorteil hinsichtlich der Vergleichsspannung. Bei dem dritten Lastfall, der Torsion, die hier in grün dargestellt ist. Ist bei der 3 mm Zelle die höchsten Vergleichsspannung aufgetreten. Hier sinkt die Vergleichsspannung bis zur nächsten Zellgröße, danach folgt eine leichte Steigung bis zur 6,0 mm Zellgröße. Danach sinkt die Vergleichsspannung bis zu dem niedrigsten Wert der Vergleichsspannung bei der 18,0 mm großen Zelle.

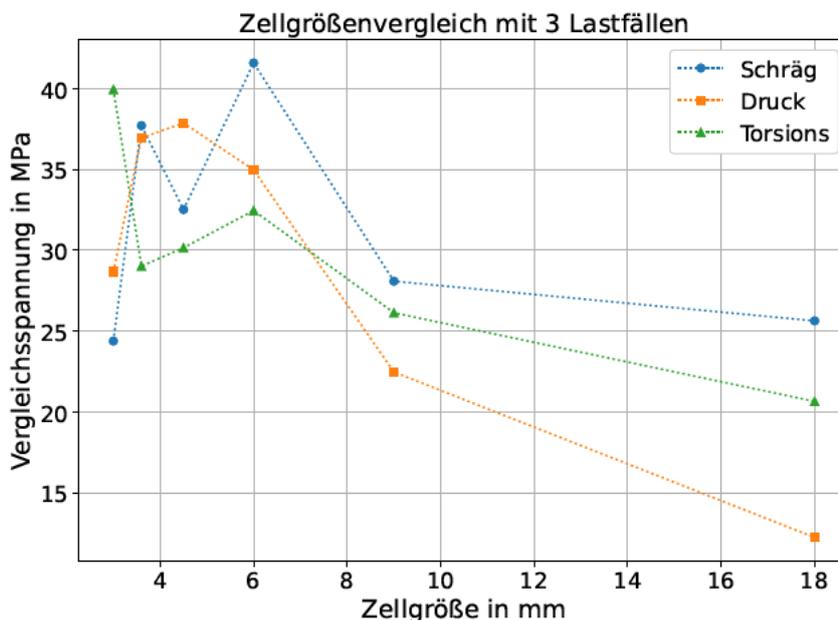


Abbildung 53: Zellgrößenvergleich 3 Lastfälle Diagramm

In der folgenden Abb. 54 ist der addierte Vergleichsspannungsverlauf der drei Lastfälle visualisiert. Auch hier dient die Linie nur der besseren Visualisierung und trifft keine Aussage über das Verhalten zwischen den verschiedenen Zellgrößen.

Bei der Summe der drei Vergleichsspannungen liegt der Ausgangspunkt bei kleinster Zellgröße (3,0 mm) bei einer Gesamtspannung von 92,99 MPa. Die Spannung steigt bei Erhöhung der Zellgröße leicht an, bis zu einem Maximum von 108,98 MPa bei einer Zellgröße von 6,0 mm. Ab dieser Zellgröße sinkt die Gesamtvergleichsspannung. Die niedrigste Gesamtvergleichsspannung wurde bei der größten Zellgröße von 18 mm erreicht.

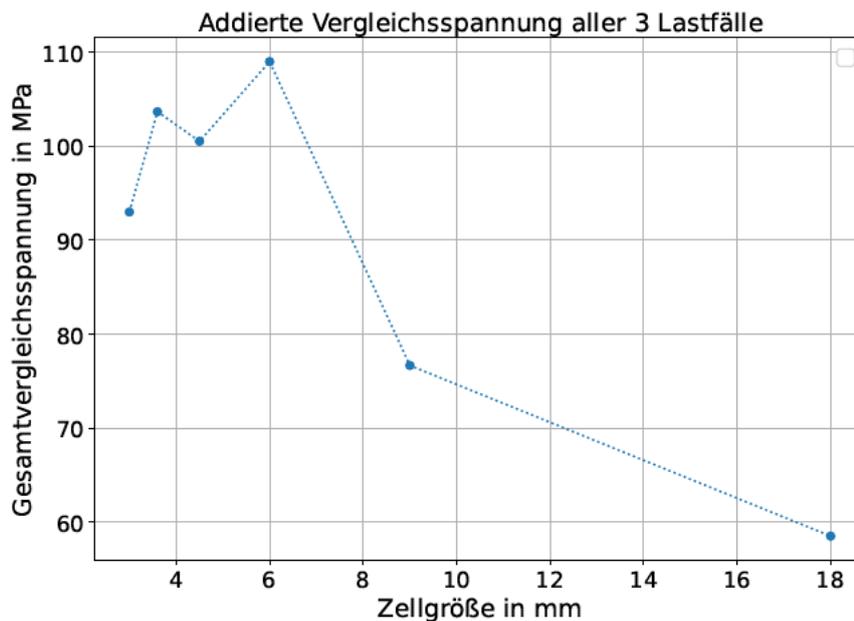


Abbildung 54: Zellgrößenvergleich addierte Vergleichsspannung

Resultierend aus den Simulationen, hinsichtlich der Zellgröße, kann gesagt werden, dass eine größere Zelle zu niedrigeren Vergleichsspannungen führt und daher zu bevorzugen ist.

Nur in dem Lastfall der schrägen Belastung wird die niedrigste Vergleichsspannung nicht bei der größten Zellgröße erreicht. Hier liegt die Vergleichsspannung bei der 3,0 mm Zellgröße knapp unter der Vergleichsspannung von der 18,0 mm Zellgröße.

Bei den anderen zwei Lastfällen hat eine Vergrößerung der Zellgröße zu einer Verbesserung der Performance geführt.

Generell scheinen mittlere Zellgrößen, in diesem Beispiel 4,5 - 6,0 mm zu einer schlechteren Performance gegenüber kleineren und größeren Zellgrößen zu führen.

Je nach additiven Fertigungsverfahren können die Zellen nicht beliebig klein gefertigt werden, da Mindeststärken eingehalten werden müssen. Daher kommen teilweise Zellgrößen kleiner 4,5 mm nicht in Frage. Somit bieten größere Zellgröße einen weiteren Vorteil aus Fertigungssicht.

Der Effekt, dass eine größere Zellgröße zu einer besseren Performance führt, wird sich ab einer bestimmten Zellgröße umkehren. Daher sollte auf eine sinnvolle Relation zur Bauteilgröße geachtet werden, damit die Lattice-Struktur eine positive Wirkung zum Bauteil beitragen kann.

Überhänge könnten ab einer bestimmten Größe auch zu einem Thema werden, hier sollten die Grenzen des jeweiligen additiven Fertigungsverfahrens mit einbezogen werden.

3.6 Fazit Infill Lattice-Strukturen

Der Versuch mit Hilfe der Topologieoptimierung eine Lattice-Struktur zu entwickeln, erwies sich als kontraproduktiv. Die Flächen die durch die Topologieoptimierung entstehen sind nicht dazu geeignet in einer Struktur mehrfach miteinander verbunden zu sein. Es entstehen Schwachpunkte an den Anbindungen und zusätzlich entstehen Löcher in den Oberflächen die Kerbwirkungen ermöglichen. Dieser Ansatz führte zu keinem Ergebnis.

Der Vergleich der Zellgrößen führte zu einem recht deutlichen Ergebnis. Es stellt sich heraus, dass ab einer Zellgröße von 9mm größere Zellen im Vorteil sind, hinsichtlich der Vergleichsspannung über die drei getesteten Lastfälle.

Es ist darauf zu achten, dass sich die Zellgröße in einem sinnvollen Verhältnis zur Bauteilgröße bewegt. Je nach Lattice-Struktur könnten auch mögliche Einschränkungen der Fertigung, die maximale Größe begrenzen. Die Überhänge die möglicherweise entstehen, könnten zu geschwächten Bauteilen führen.

In der FEM-Analyse der verschiedenen Lattice-Strukturen haben sich die Honeycomb-Strukturen generell als Vorteilhaft hinsichtlich der Vergleichsspannung unter verschiedenen Lastfällen ergeben. Die besten Vergleichsspannungswerte erreichte die Lattice-Struktur Square Honeycomb.

Aus der Untersuchung kann geschlossen werden, dass komplexere Lattice-Strukturen keine besseren Performance Werte aufweisen. Es scheint als wäre die Square Honeycomb Lattice-Struktur, trotz der geometrisch geringen Komplexität, nah an der optimalen Lattice-Struktur. Es ist nicht auszuschließen, dass eine Lattice-Struktur gefunden wird, die eine bessere Performance aufweist.

Zusammenfassend, auch mit dem Ausblick, dass die vielversprechenden komplexen Lattice-Strukturen und die Lattice-Struktur aus der Topologieoptimierung signifikant schlechtere Werte aufweisen, kann die Square Honeycomb Lattice-Struktur als die am besten geeignete Lattice-Struktur aus Sicht des Leichtbaus in der additiven Fertigung angesehen werden.

4 Konzeptionelle Entwicklung von Latticing-Gestaltungsweisen

Die additive Fertigung erlaubt ein hohes Maß an Freiheit hinsichtlich der Komplexität der Geometrie. Diesen Vorteil gilt es mit Hilfe von Lattice-Strukturen auszunutzen. In diesem Kapitel sollen einige Erkenntnisse aus dem Kap. 3, sowie allgemeine Erkenntnisse der Gestaltungsweise für Lattice-Strukturen einfließen.

4.1 Lattice-Struktur

In Kap. 3 werden die vorhandenen nTop Lattice-Strukturen hinsichtlich der vorhandenen Vergleichsspannung in drei verschiedenen Lastfällen überprüft.

Aus dieser Analyse ergab sich, dass Honeycomb Lattice-Strukturen eine gute Performance über alle Lastfälle aufweisen. So sind unter den sechs Lattice-Strukturen, mit der insgesamt geringsten Vergleichsspannung über die drei Lastfälle, fünf Honeycomb Lattice-Strukturen vorhanden. Auf Rang drei fand sich die TPMS Lattice-Struktur Neovius wieder.

Daher gilt die Empfehlung für ein möglichst leichtes und hoch belastbares Bauteil, eine Honeycomb Infill-Struktur zu nutzen. In dem Lattice-Vergleich hatte Square Honeycomb die niedrigsten Vergleichsspannungen erreicht.

Klassische Lattice-Strukturen die aus Streben bestehen sollten vermieden werden. An den Knotenpunkten können Spannungspitzen entstehen, die zu einem Versagen der Gesamtstruktur führen könnten. So hatte die beste Lattice-Struktur die aus Streben besteht eine Vergleichsspannung erreicht, die etwa 2,1 mal größer ist, als die der Square Honeycomb Lattice-Struktur.

4.2 Zellgröße

Eine weitere wichtige Einflussgröße ist die Zellgröße für die Lattice-Strukturen. Über die verschiedenen Lastfälle haben Zellgrößen größer gleich 9mm niedrigere Vergleichsspannungen erreicht, dies wurde bei der FEM-Berechnung verschiedener Zellgrößen in Kap. 3.5 festgestellt. Somit bietet sich hier der Grundsatz an, eine möglichst große Zellgröße zur Erstellung der Lattice-Strukturen zu wählen.

Die Zellgröße kann nicht beliebig groß ausfallen. Es gilt mehrere Punkte zu beachten. Im ersten Schritt muss die Zellgröße in einem sinnvollen Verhältnis zur Größe der Bauteilstruktur stehen. Beispielsweise eine Bauteilstrebe ist 5 mm groß, hier wäre es nicht Sinnvoll mit einer Zellgröße zu arbeiten, die größer als die Struktur ist.

Größere Zellgrößen führen zu größeren Hohlräumen innerhalb der Bauteile, dies wirkt sich unter anderem negativ auf das Beulen aus.

Große Zellgrößen können je nach Lattice-Struktur zu großen Überhängen führen, die je nach additiven Fertigungsverfahren zu Imperfektionen führen könnten. Die wiederum zu ge-

schwächten Bauteilen führen können.

Aufgrund der begrenzten Leistung der Hardware mit der diese Untersuchung durchgeführt wurde, konnten keine deutlich größeren Zellen berechnet werden. Für einen Vergleich mit noch größeren Zellen, hätte aufgrund der Vergleichbarkeit auch die kleine Zellgröße auf dem insgesamt deutlich größeren Volumen berechnet werden müssen. Dies führt schnell dazu, dass mehrerer Millionen Knoten berechnet werden müssten. Dies ist innerhalb der Möglichkeiten nicht zu leisten gewesen. Hieraus folgt, dass nicht nachgewiesen ist, dass eine noch größere Zelle zu noch besseren Vergleichsspannungswerten führt. Der Effekt könnte sich aber einer unbekanntem Zellgröße ins negative drehen.

4.3 Zell Arten

In nTop gibt es drei Varianten der Cell Map, diese sind in Abb. 19 in Kap. 2.5.2 zu sehen. Grundsätzlich gibt es noch die Möglichkeit eine Custom Cell Map an einen Körper anzupassen. Dies wird jedoch nicht näher betrachtet.

Die Empfehlung ist hier generell eine Rechteckige Cell Map zu nutzen. Zum einen sind die vorigen Tests der Lattice Struktur, die bereits in Kap. 4.1 der konzeptionellen Entwicklung von Lattice-Strukturen Erwähnung gefunden haben, mit rechteckigen Cell Maps gemacht worden. So kann für andere Cell Maps keine Aussage zur Performance der Lattice-Strukturen getroffen werden. Zum anderen entstehen durch die Verzerrung der Lattice-Strukturen Überhänge, die je nach Einschränkung des additiven Fertigungsverfahrens zu Imperfektionen im Bauteil führen können. Theoretisch wäre dann an einigen Stellen eine Stützgeometrie im Bauteil für die Lattice-Struktur notwendig.

4.4 Unterschiede in der additiven Fertigung

Die Einflüsse der verschiedenen additiven Fertigungsverfahren müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Ein wichtiger Parameter ist die Mindestmaterialdicke. Die additiven Fertigungsverfahren können nicht beliebig dünne Strukturen abbilden. Je nach Verfahren können diese Mindestmaterialdicken variieren, so muss vorher geprüft werden ob die Lattice-Struktur die Mindestmaterialdicke für das gewünschte additive Fertigungsverfahren erfüllt.

Verschiedene additive Fertigungsverfahren benötigen eine Öffnung des Bauteils um nicht verbundenes Material zu entfernen. Dies betrifft hauptsächlich additive Fertigungsverfahren, welche mit Pulver oder Resin arbeiten. Wäre die Bauteilstruktur verschlossen, würde sich Material im Bauteil befinden, dass lediglich das Gewicht erhöht und keinen Vorteil hinsichtlich der Stabilität bietet. Es muss in der Konstruktion und Optimierung berücksichtigt werden, dass es eine Öffnung gibt durch die das übrige Material entfernt werden kann.

Es ist darauf zu achten, dass Überhänge entstehen können.

5 Erstellung eines Demonstrators mit Hilfe der implizierten Feldtechnologie

Um die implizierte Feldtechnologie von nTop zu untersuchen wird ein Demonstratorbauteil optimiert und berechnet. Der Demonstrator soll zur Anschauung gefertigt werden. Aus Kostengründen wird das Demonstratorbauteil aus Kunststoff im FFF-Verfahren gefertigt. Der gefertigte Demonstrator dient nur der Anschauung.

Als Demonstratorbauteil dient das zu optimierende Bauteil der „GE jet engine bracket challenge“, das Bauteil ist in Abb. 55a abgebildet. Das Bauteil entstammt einer Design-Challenge[19] zur Topologieoptimierung aus dem Jahr 2013 und ist für eine Bewertung der implizierten Feldtechnologie gut geeignet.

Das Bauteil ist aus Ti-6Al-4V gefertigt. Genutzt wird das Bauteil als Halterung für eine Turbine in der Luftfahrt. Das original Bauteil hat ein Gewicht von 2033g, der Sieger der Design Challenge hat ein Gewicht von 327g erreichen können[20]. Das Gewinnerbauteil ist in Abb. 55b zu sehen.



Abbildung 55: 55a Bauteil GE jet engine bracket[19] | 55b Siegerbauteil Design Challenge [20]

Für die Design-Challenge sind 4 verschiedene Lastfälle angegeben. Diese werden zur Optimierung des Demonstrators genutzt. Die Lastfälle und strukturellen Abhängigkeiten sind in Abb. 56 zu sehen.

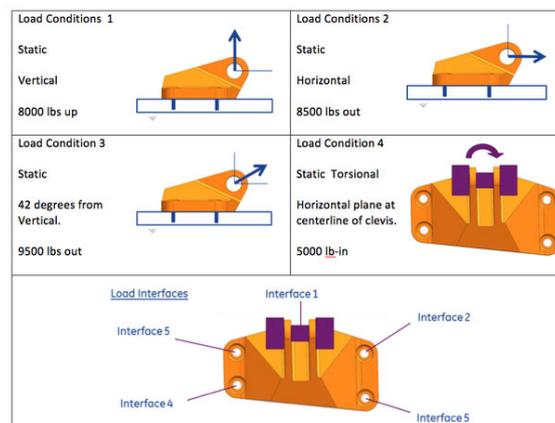


Abbildung 56: Lastfälle GE jet engine bracket[19]

5.1 Vorgehen zur Bewertung der Demonstratoren und der implizierten Feldtechnologie

Mit Hilfe des GE-Brackets soll eine Bewertung der implizierten Feldtechnologie erfolgen. Hierzu wird das Bracket auf verschiedenen Wegen optimiert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Das Zielgewicht der Optimierung orientiert sich dabei an dem Gewinner der damaligen Design-Challenge von 2013, dieses Bauteil erreichte ein Gewicht von 327g.

Die Optimierungen finden in nTop unter Einflussnahme aller Lastfälle statt. Für die ersten Erkenntnisse werden das Gewinnerbauteil der Design-Challenge, ein topologieoptimiertes Bauteil ohne Lattice-Strukturen, verschiedene Versionen die der Feldoptimierung entstammen, sowie eine topologieoptimierte Version, die ein kontinuierliches Lattice aufweist und eine Schalenstruktur.

Die verschiedenen Versionen werden mit Ansys unter der Berücksichtigung aller Lastfälle berechnet und verglichen. Es ist davon auszugehen, dass die feldoptimierte Variante die beste Performance aufweist. Es wird im Vergleich mehrere feldoptimierte Varianten geben. Dies resultiert hauptsächlich aus zwei Faktoren die einen Einfluss auf die Optimierung haben. Das Bauteil wird einer Topologieoptimierung unterzogen und danach wird die Feldoptimierung durchgeführt. In beiden Stufen wird das Gewicht des Bauteils reduziert, je nach Anteil der Gewichtsreduzierung pro Verfahren verändert sich die Form des Bauteils und damit auch die Performance.

Die erste FEM Analyse dient dem ersten Erkenntnis Gewinn über das Verfahren der implizierten Feldoptimierung. Es sollen die Abstufungen identifiziert werden, die einen positiven Einfluss auf die Performance des Bauteils haben. Hierzu genutzt werden auch die Erkenntnisse aus Kapitel 3. Für die Lattice Infill-Struktur wird Square Honeycomb benutzt und die Zellgröße liegt bei 10x10x10 mm, die Zellform ist rechteckig. Mit der Zellgröße kann eine gute Performance, sowie eine gute Fertigbarkeit realisiert werden. Würde die Zelle noch größer werden könnten die Überhänge innerhalb der gefertigten Bauteils zu groß werden. Sollte die Zellgröße zu groß gewählt werden, ist es möglich das innerhalb des Bauteils Imperfektionen entstehen, die das Bauteil schwächen.

Die FEM Analyse dieser Bauteile beschränkt sich auf die Von Mises Vergleichsspannung, diese gibt einen schnellen Überblick über die Performance der Bauteile.

Die Erkenntnisse aus der ersten Analyse werden dann genutzt um drei weitere Demonstratoren zu optimieren. Das Ziel der zweiten Optimierung ist es, die Demonstratoren vom Gewicht sehr nah an das Gewinnerbauteil zu bringen um hier eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Es wird ein Demonstrator erstellt welcher topologieoptimiert ist, einer der mit Hilfe der implizierten Feldoptimierung erstellt wurde und ein Demonstrator mit einem kontinuierlichen Lattice und kontinuierlicher Schalendicke. In dieser Untersuchung wird eine umfangreiche

re FEM Analyse erstellt. Untersucht werden hier die Van Mises Vergleichsspannungen, die maximalen Verformungen, das Beulen, sowie die Eigenfrequenzen. Die Berechnungen finden nicht linear statt, auch wenn keine großen Verformungen zu erwarten sind.

Die Ergebnisse werden dann zur Bewertung der implizierten Feldtechnologie im Vergleich zur Topologieoptimierung genutzt. Mit einem Vergleich zum Gewinnerbauteil aus dem Jahr 2013, kann eine Aussage über die Performancesteigerung durch die weiter Entwicklung von Software der letzten 11 Jahre getroffen werden. Wobei an dieser Stelle erwähnt werden muss, dass es sieben Bauteile in der Design-Challenge gab, welche an einem realen Prüfstand getestet wurden und die Belastungen ertragen haben. Da die Bauteile nicht bis zum Versagen getestet wurden, kann es sein das ein anderes Bauteil der Design-Challenge eine bessere Performance aufgewiesen hätte, als das Gewinnerbauteil [19]. Der Demonstrator mit dem kontinuierlichem Lattice soll ebenfalls die stärken der Feldoptimierung hervorheben.

5.2 Erste Optimierung des Demonstrators

Die Optimierung der Demonstratoren findet komplett in nTop statt. Die verschiedenen Versionen des Demonstrators werden in Fusion 360 nachbearbeitet. Da die Step-Datei, die aus nTop export wird, aus NURBS bestehen. Aufgrund der NURBS können die Randbedingungen in Ansys nicht passend ausgewählt werden, daher wird eine Nachbearbeitung der Funktionsflächen notwendig. Die Nachbearbeitung bezieht sich auf die Bohrungen des Bolzensitzes und für die Verschraubungen.

5.2.1 Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung des Demonstratorbauteils wurde bereits in Kap. 2.5.3 genutzt, um den Arbeitsablauf in nTop für die Topologieoptimierung darzustellen. Das Ziel ist es hier ein Demonstrator zu erhalten, welcher ungefähr dem Gewicht des Gewinnerbauteils entspricht und weitere die deutlich schwerer sind. Die schweren Demonstratoren werden für die weiteren Optimierungen genutzt. Die fünf Demonstratoren für die Feldoptimierung haben nach der Topologieoptimierung ein Gewicht von 536 g bis 725 g. Es hat sich gezeigt, dass schwere topologieoptimierte Versionen nach der Feldoptimierung auf das Zielgewicht offene Oberflächen haben und daher nicht nutzbar sind. In Abb. 57 sind die Ergebnisse von der leichtesten und schwersten Ausgangslage für die Feldoptimierung visualisiert.

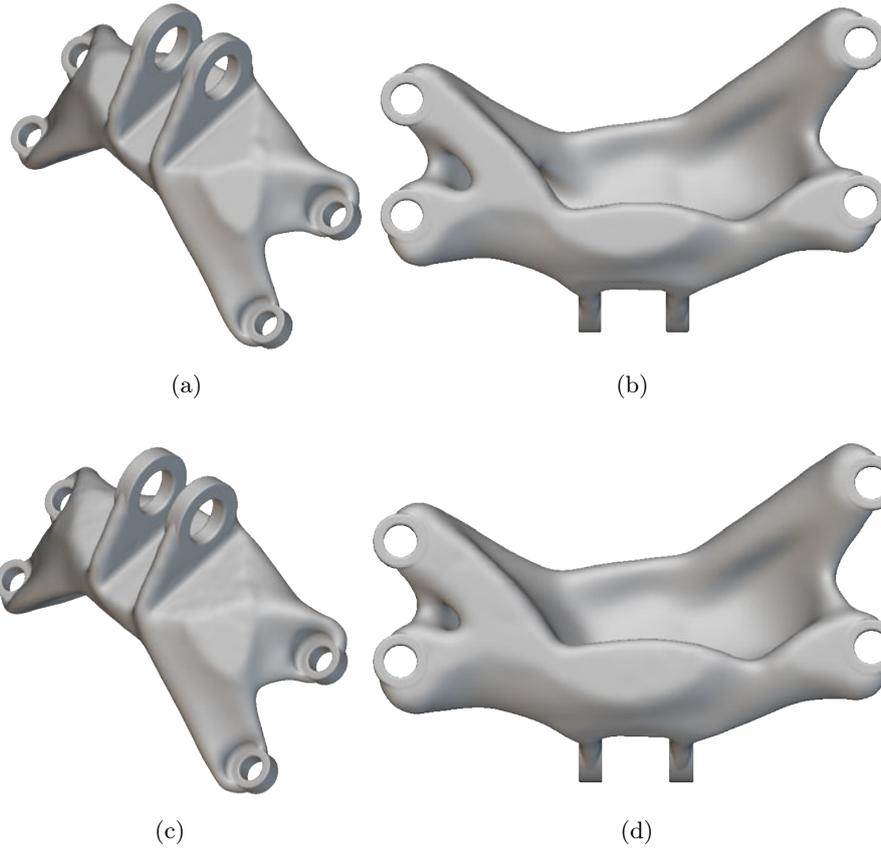


Abbildung 57: Ergebnisse nach Topologieoptimierung | 57a & 57b \Rightarrow 536 g | 57c & 57d \Rightarrow 725 g

Eine Version der Topologieoptimierung wird direkt auf das Zielgewicht optimiert und in den Vergleich einfließen. Diese Version ist in Abb. 58 zu sehen.

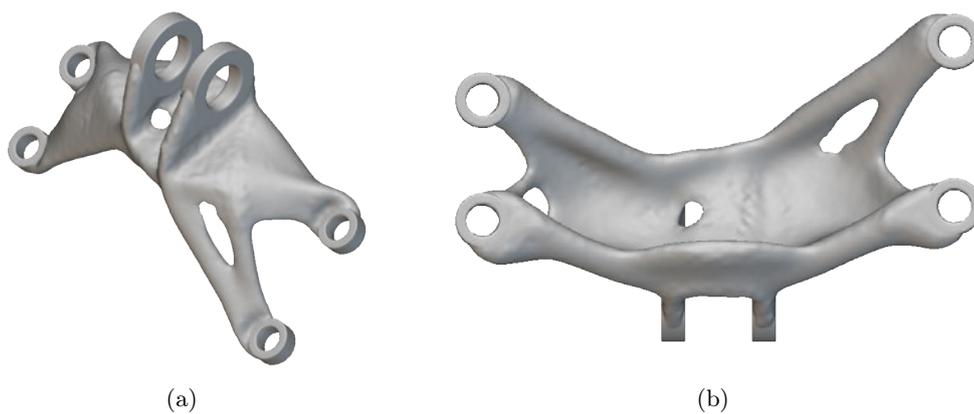


Abbildung 58: Ergebnis Topologieoptimierung auf Zielgewicht

Die Topologieoptimierung für die erste FEM-Analyse Runde ist damit abgeschlossen. Im nächsten Schritt werden die verschiedenen Demonstratoren weiter bearbeitet oder optimiert.

5.2.2 Shell und Shell/Infill

Um die Vorteile der variablen Schalen und Latticedicken hervor zu heben werden zwei Demonstratoren in diesem Kapitel nachbearbeitet. Eine Version wird eine kontinuierliche Schalendicke haben ohne Lattice-Struktur. Die zweite Version wird eine kontinuierliche Schalendicke mit einer kontinuierlichen Latticedicke haben.

Als Lattice-Struktur wird auch hier Square Honeycomb eingesetzt. Für die Version die eine Lattice-Struktur besitzt wird eine Latticedicke von 1 mm gewählt. Die Schalendicke wird bei beiden Versionen so gewählt, dass das Endgewicht angepasst ist.

In Abb. 59 ist der Block zu sehen mit dem die beiden Demonstratoren optimiert wurden. Die Version ohne Lattice-Struktur hat eine Schalendicke von 2,043 mm. Die Version mit Lattice-Struktur eine Schalendicke von 1,72 mm. Beide Versionen wiegen 336 g.

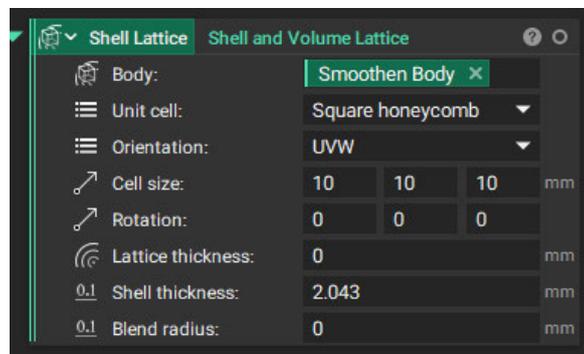


Abbildung 59: Shell and Volume Lattice Block

Damit sind die beiden Demonstratoren für die FEM-Analyse in nTop fertig nachbearbeitet. In Abb. 60 ist ein Schnitt von beiden Versionen visualisiert.

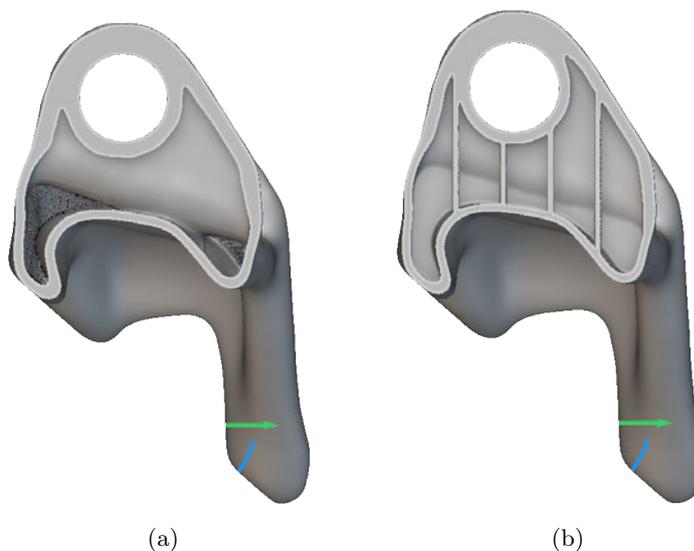


Abbildung 60: 60a Version ohne Lattice | 60b Version mit Lattice

5.2.3 Implizierte Feldoptimierung

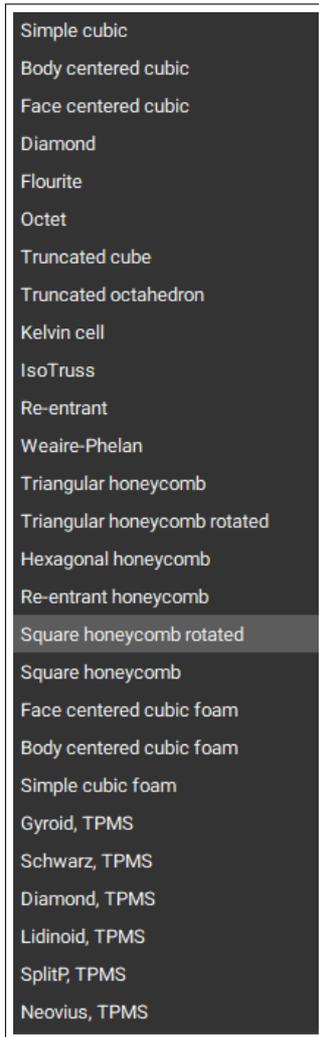


Abbildung 61: Drop Down Menü Lattice-Strukturen für implizierte Feldoptimierung

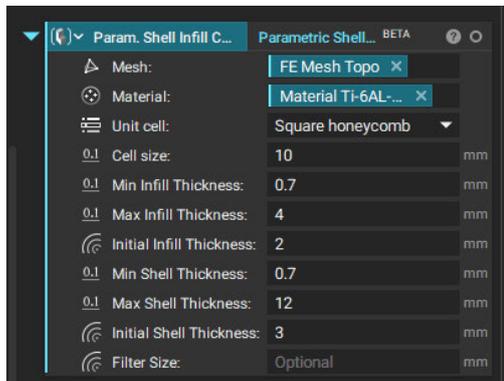
Im letzten Optimierungsschritt für die erste FEM-Analyse werden die implizierten Feldoptimierungen durchgeführt. Die insgesamt fünf verschiedenen Demonstratoren werden von unterschiedlichen Gewichten auf das selbe Zielgewichtsniveau hin optimiert.

Für die implizierte Feldoptimierung wird Square Honeycomb als Lattice-Struktur genutzt. Generell lässt nTop für die implizierte Feldoptimierung keine Custom Lattice-Strukturen zu, daher ist die Auswahl auf die Lattice-Struktur Auswahl in nTop beschränkt, diese sind in Kap. 2.3 abgebildet, das zugehörige Drop Down Menü der implizierten Feldoptimierung ist in Abb. 61 zu sehen. Es gibt aktuell keine Möglichkeit Custom Lattice-Strukturen für die implizierte Feldoptimierung zu nutzen. Dies Resultiert wahrscheinlich daraus, dass Custom Lattice-Strukturen in der Materialstärke nicht veränderbar sein können.

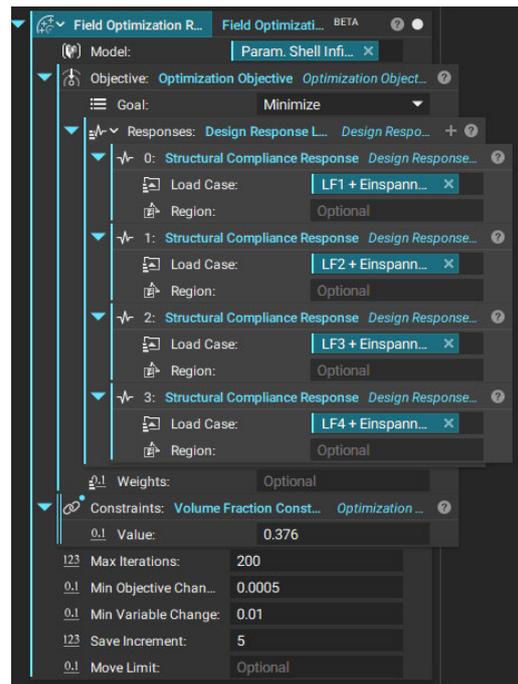
Die Abb. 62 zeigt die Blöcke die für die Feldoptimierung benötigt werden, diese sind auch im Kap. 31 zur Erklärung der Feldoptimierung zu sehen.

Für die Feldoptimierung wird im ersten Schritt der passende Parameter Block benötigt. In diesem Fall wird der Parametric Shell-Infill Block genutzt. In diesem Block werden die Grenzen der Parameter für die implizierte Feldoptimierung festgelegt. Das Netz des Ursprungsmodels wird eingefügt, in diesem Fall die verschiedenen Versionen der Topologieoptimierung. Als Werkstoff wurde Ti-6AL-4V gewählt, genau wie bei der Design-Challenge. Wie bereits erwähnt, ist die Zellgröße auf 10 mm festgelegt und als Lattice-Struktur wird Square Honeycomb verwendet. Die Grenzen der Latticestärke liegen bei 0,7 mm und 4,0 mm. Der Startwert der Latticestärke bei 2 mm. Die Grenzen der Schalenstärke liegen bei 0,7 mm bis 12,0 mm. Der Startwert liegt bei 3 mm. Die 0,7 mm wurden gewählt, damit eine Fertigbarkeit des Demonstrators gewährleistet bleibt.

Der Parametric Shell-Infill Block kann nun in den Feldoptimierungs Block eingefügt werden. Hier werden dann noch die vier Lastfälle hinzugefügt und das Optimierungsziel. In diesem Fall der Volume Fraction Constraint, also wie viel vom Volumen des Demonstrators nach der Optimierung noch bestehen soll.



(a)



(b)

Abbildung 62: 62a Parametric Shell-Infill Block | 62b Fieldoptimization Block

Die implizierten Feldoptimierungen wurden durchgeführt. In Tab. 11 sind die Ergebnisse der verschiedenen Gewichtsentwicklungen zu sehen. Als Zielgewicht wurden in etwa die 327 g vom Gewinnerbauteil angepeilt. Aufgrund der Nachbearbeitung schwankt das Gewicht etwas, da die Einspannungen und Bolzenaufnahme des Demonstrators aufgedickt werden. Aufgrund der langen Berechnungszeit wurde entschieden, dass eine Genauigkeit des Gewichts von $327 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ ausreichend ist, für die erste FEM-Analyse.

Feldoptimierung	Gewicht nach Topo in g	Gewicht nach Feldoptimierung in g
V1	536	333
V2	578	331
V3	618	327
V4	672	326
V5	725	333

Tabelle 11: Gewichtsverläufe implizierte Feldoptimierung

In Abb. 63 sind die Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Startgewichten vor der implizierten Feldoptimierung gut zu sehen. Die Schnittebene ist in beiden Fällen identisch. Die Feldoptimierung ist für alle fünf Demonstratoren beendet und diese können nun in Fusion 360 nachbearbeitet werden.



Abbildung 63: 63a Demonstrator 536 g vor Feldoptimierung | 63b Demonstrator 725 g vor Feldoptimierung

5.2.4 Nachbearbeitung in Fusion 360

Die Optimierung der Demonstratoren für die erste FEM-Analyse Runde ist abgeschlossen. Die verschiedenen Demonstratoren müssen nun noch nachbearbeitet werden. Die NURBS an den Einspannungen und Bolzenaufnahmen müssen zum Einbringen der Lasten und strukturellen Abhängigkeiten entfernt werden. In Abb. 64 wird ersichtlich, dass die Funktionsflächen im aktuellen Zustand nicht ausgewählt werden können.

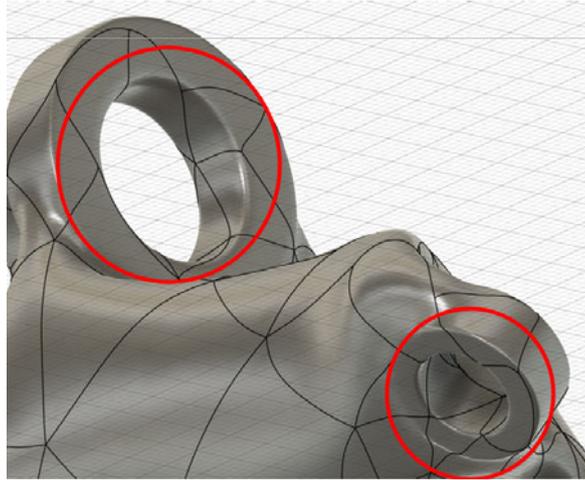


Abbildung 64: Fertig optimierter Demonstrator mit NURBS

In Fusion 360 wurde eine Vorlage zur Bearbeitung der Demonstratoren angefertigt, so ist gesichert, dass alle Demonstratoren exakt die gleiche Nachbearbeitung haben. In Abb. 65 sind die Skizzen zu sehen, sowie das Ergebnis nach der Nachbearbeitung. Die Bauteile sind damit bereit für die FEM-Analyse.

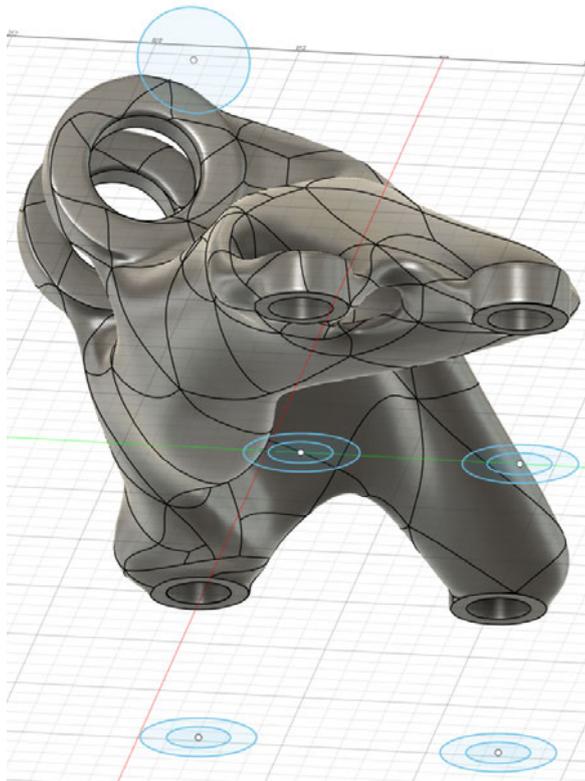


Abbildung 65: Skizzen zur Nachbearbeitung & nachbearbeiteter Demonstrator

5.3 FEM Analyse verschiedener Demonstrator Varianten

Die Demonstratoren der ersten Optimierungsrunde werden in Ansys simuliert. In dieser ersten FEM-Analyse geht es darum Erkenntnisse über das Verhalten der Demonstratoren zu sammeln. Hierzu wird die Von-Mises Vergleichsspannung genutzt, um die Demonstratoren zu bewerten. Die Berechnung der Demonstratoren erfolgt mit quadratischen Elementen. Als Netzgröße wurde 4 mm gewählt, damit sich die Berechnungsdauer in einem begrenzten Maß bewegt.

Es werden für jeden Demonstrator die vier vorhandenen Lastfälle betrachtet. Insgesamt werden so 9 Bauteile, inklusive des Gewinnerbauteils von 2013, berechnet. Insgesamt 36 FEM-Analysen. Während der FEM-Analyse stellte sich heraus, dass die Gewichtsangabe zu dem Gewinnerbauteil nicht korrekt war. Ansys zeigte ein Gewicht von 341,1 g an. In der finalen Designrunde werden die Vergleichsdemonstratoren an dieses Gewicht angepasst.

5.3.1 Lastfall 1

Der erste Lastfall ist eine statische Zugbelastung. Die Belastung ist in Abb. 66 abgebildet. Eine Belastung von 8000 lbs entspricht 35586 N. In Ansys wurde für die Belastung eine Bolzenlast angegeben, da dies auch der realen Anwendung entspricht.

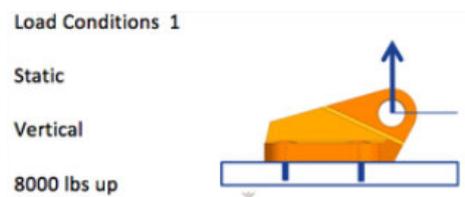


Abbildung 66: Lastfall 1 [19]

Die Ergebnisse sind der Tabelle 12 zu entnehmen. In Abb. 67 sind die Analysen der Versionen mit einer kontinuierlichen Schale ohne Lattice und mit Lattice visualisiert. Die Spannungen liegen bei diesem Lastfall bei 720,19 MPa für den Demonstrator mit Lattice-Struktur. Bei einem Verzicht auf die Lattice-Struktur und erhöhter Schalendicke ergibt sich eine Vergleichsspannung von 1219 MPa. Diese liegt damit etwa 500MPa höher, als bei der Version mit Lattice-Struktur. Hier ist der Mehrwert der Lattice-Struktur deutlich zu erkennen.

Demonstrator	Masse Topo	Endmasse	Vergleichsspannung
	in g		in MPa
Field V1	536	333	732,7
Field V2	578	331	781,81
Field V3	618	327	701,08
Field V4	672	336	706,87
Field V5	725	333	687,82
Shell Lattice	536	336	720,19
Shell	536	336	1219
Topology	325,6	325,6	723,34
Gewinner 2013	341,1	341,1	1028,2

Tabelle 12: Ergebnisse Lastfall 1

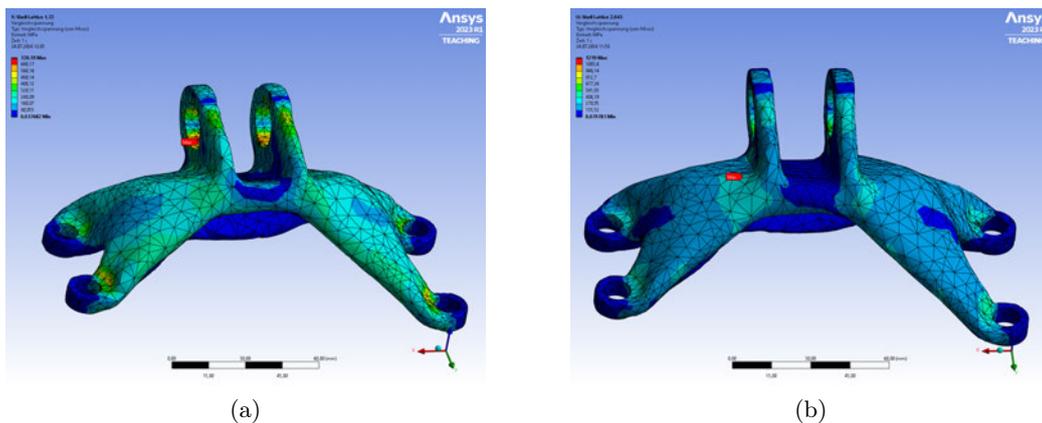


Abbildung 67: Lastfall 1 67a Shell + Lattice | 67b Shell

In Abb. 68 sind verschiedene Demonstratoren abgebildet. Im ersten Lastfall performte der Demonstrator Field V5 am besten, dieser ist in Abb. 68b visualisiert. Hier fällt auf, dass die maximale Spannung an der Bolzenaufnahme anliegt. Dabei handelt es sich um eine Struktur die vom original Bauteil stammt, an der kein Material entfernt wurde. Es liegt eine Spannung von 687,82 MPa an.

Die Version in Abb. 68a hat über alle vier Lastfälle am besten performt und wird daher bei jedem Lastfall mit abgebildet.

In Abb. 68c ist der Demonstrator zu sehen, der topologieoptimiert wurde. Dieser weist eine Spannung von 723,34 MPa auf, diese liegt aber nicht an der Bolzenaufnahme an.

In Abb. 68d ist das Gewinnerbauteil der Design-Challenge abgebildet. Hier wurde eine Spannung von 1028,2 MPa erreicht. Die Spannung liegt damit deutlich über den Spannungen der Demonstratoren mit Ausnahme der Version die nur eine Schale hat.

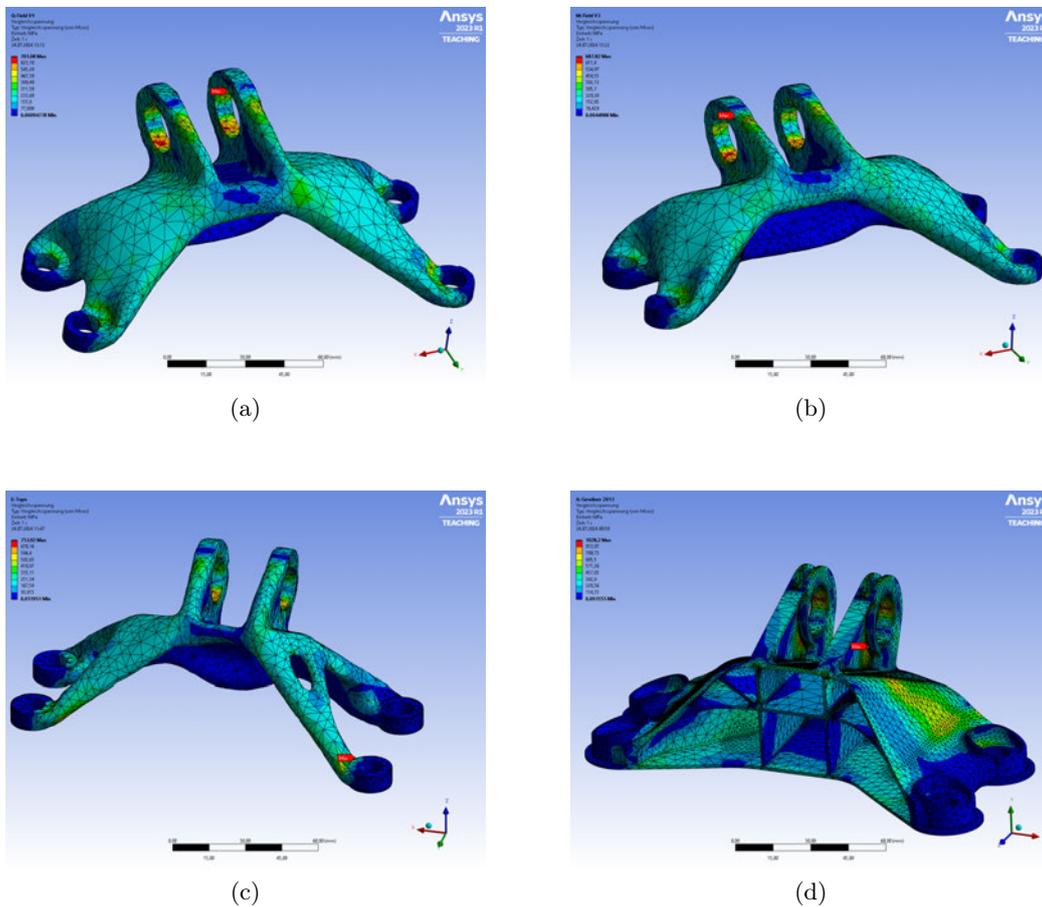


Abbildung 68: Lastfall 1 | 68a Field V3 | 68b Field V5 | 68c Topologieoptimiert | 68d Gewinnerbauteil

5.3.2 Lastfall 2

Bei dem zweiten Lastfall handelt es sich um eine statische Zugbelastung. Die Belastung ist in Abb. 69 abgebildet. Auch hier wird zur Einbringung der Last in Ansys eine Bolzenlast angegeben. Die Belastung von 8500 lbs entspricht 37810 N.

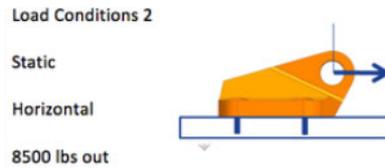


Abbildung 69: Lastfall 2 [19]

In Tab. 13 sind die Ergebnisse der FEM-Analyse für den zweiten Lastfall zu sehen. In Abb. 70 sind die beiden Demonstratoren mit kontinuierlicher Schalendicke mit und ohne Lattice-Struktur abgebildet. Zu sehen ist, dass die höchsten Spannungen an verschiedenen Stellen des Bauteils auftreten. In diesem Lastfall beträgt die Differenz zwischen den beiden Spannungen etwa 14 MPa. Dies lässt darauf schließen, dass für diesen Lastfall die Lattice-Struktur keinen signifikanten Einfluss auf die Performance hat.

Demonstrator	Masse Topo	Endmasse	Vergleichsspannung
	in g		in MPa
Field V1	536	333	843,5
Field V2	578	331	876,25
Field V3	618	327	886,55
Field V4	672	336	895,01
Field V5	725	333	892,47
Shell Lattice	536	336	1068,6
Shell	536	336	1082,4
Topology	325,6	325,6	1056,2
Gewinner 2013	341,1	341,1	932,37

Tabelle 13: Ergebnisse Lastfall 2

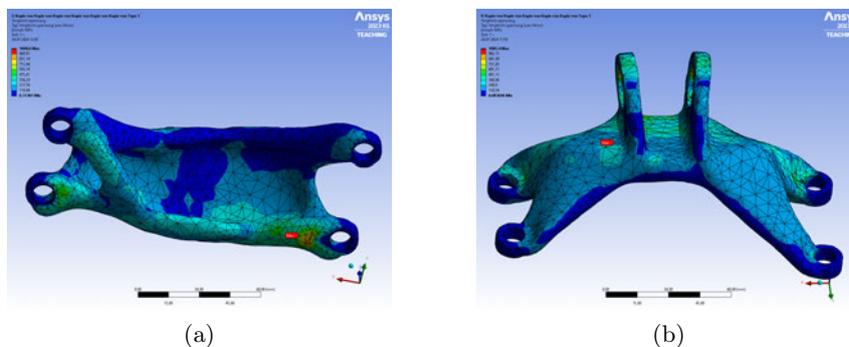


Abbildung 70: Lastfall 2 70a Shell + Lattice | 70b Shell

In Abb. 71 sind die einige FEM-Analysen zum zweiten Lastfall zu sehen. In Abb. 71b ist der Demonstrator mit der besten Performance zu sehen. Die Spannung beträgt 843,5 MPa. Hier muss wie im ersten Lastfall jedoch angemerkt werden, dass die maximale Spannung an einer nicht optimierten Funktionsfläche liegt. Dies gilt nicht für den Demonstrator, der über alle Lastfälle die niedrigsten Spannungen ergeben hat. In Abb. 71a ist der Demonstrator, der die niedrigste Spannungen aufweist, zu sehen, hier liegt die höchste Spannung mit 886,55 MPa auf der Unterseite nahe einer Einspannung an.

Der topologieoptimierte Demonstrator aus Abb. 71c hat hier eine recht hohe Spannung von 1056,2 MPa, hier ist die Feldoptimierung im klaren Vorteil.

Zur Referenz das Gewinnerbauteil, in Abb. 71d, hat eine Spannung von 932,37 MPa.

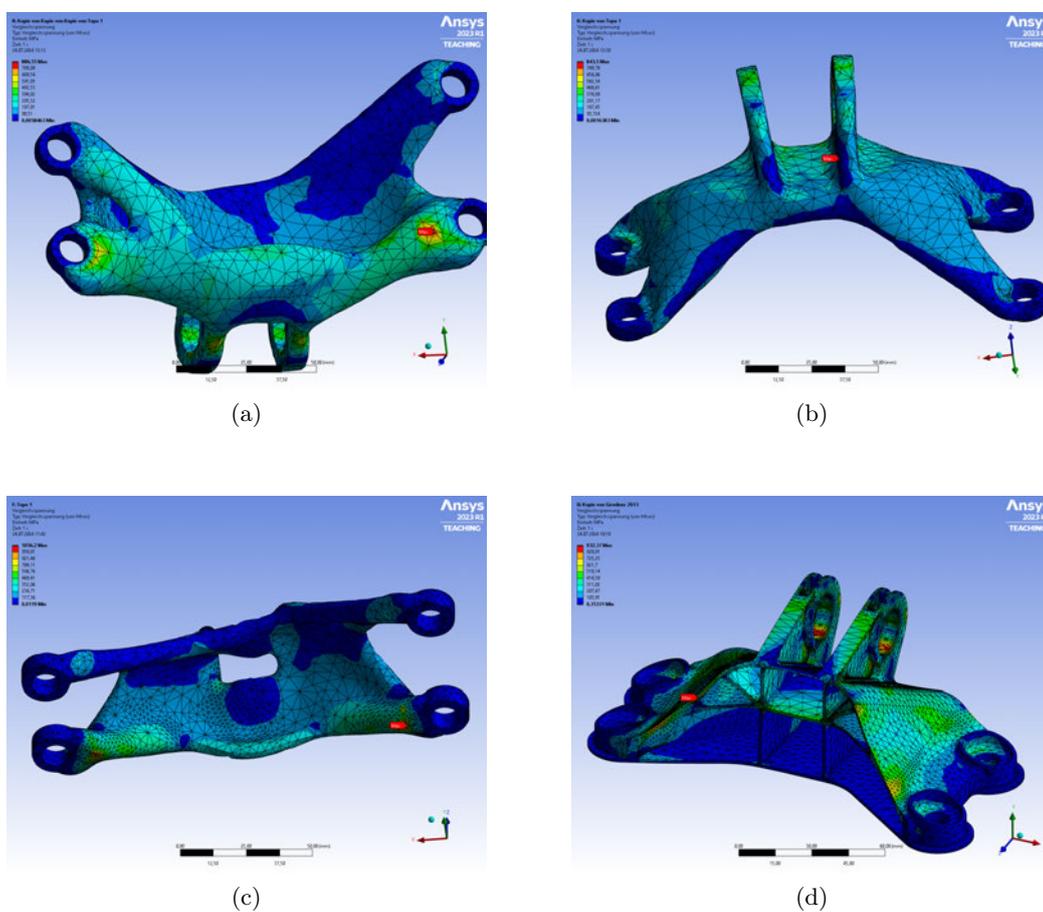


Abbildung 71: Lastfall 2 | 71a Field V3 | 71b Field V1 | 71c Topologieoptimiert | 71d Gewinnerbauteil

5.3.3 Lastfall 3

Der dritte Lastfall ist ebenfalls eine statische Zugbelastung. Die Belastung ist in Abb. 72 abgebildet. In diesem Fall wird ebenfalls eine Bolzenlast in Ansys eingebracht. Eine Last von 9500 lbs entspricht 42258 N.

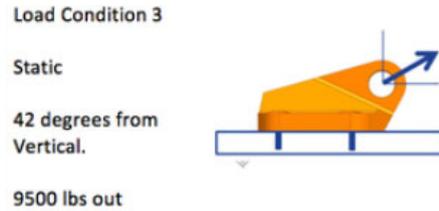


Abbildung 72: Lastfall 3 [19]

In Tab. 14 sind die Ergebnisse der FEM-Analyse für den dritten Lastfall zu sehen. In Abb. 73 sind die beiden Demonstratoren mit kontinuierlicher Schalendicke mit und ohne Lattice abgebildet. Bei diesem Lastfall, der die beiden Richtungen der Lastfälle 1 und 2 kombiniert, ist das Spannungsdelta wieder erhöht. Die Version mit Lattice hat mit 882,32 MPa eine etwa 222 MPa geringere Spannung, als der Demonstrator ohne Lattice.

Demonstrator	Masse Topo	Endmasse	Vergleichsspannung
	in g		in MPa
Field V1	536	333	808,09
Field V2	578	331	768,26
Field V3	618	327	690,79
Field V4	672	336	691,81
Field V5	725	333	783,79
Shell Lattice	536	336	882,32
Shell	536	336	1104,4
Topology	325,6	325,6	928,05
Gewinner 2013	341,1	341,1	729,32

Tabelle 14: Ergebnisse Lastfall 3

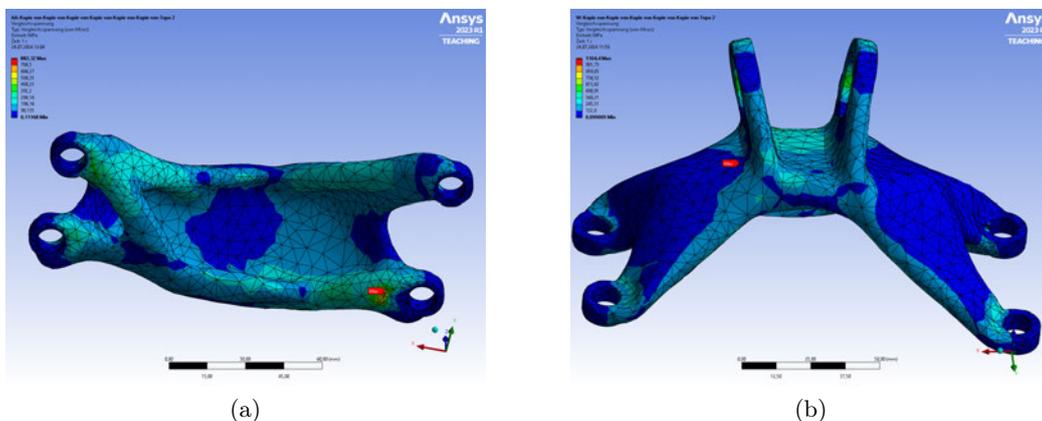
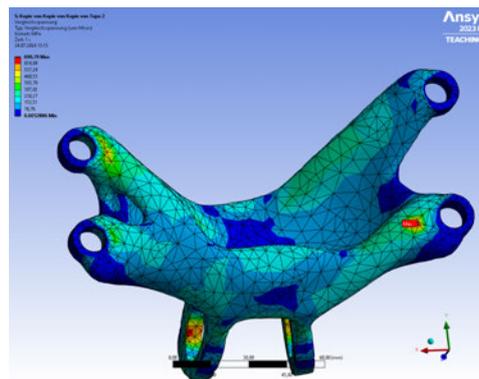


Abbildung 73: Lastfall 3 73a Shell + Lattice | 76b Shell

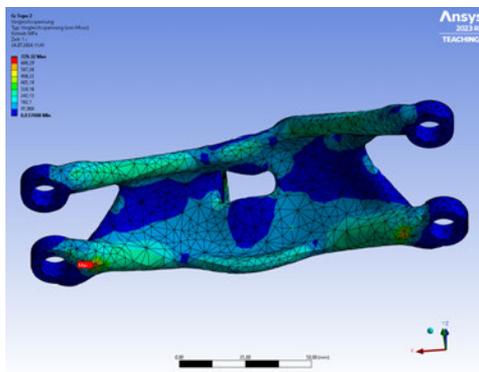
In Abb. 74 sind weitere Simulationen von Demonstratoren, für den dritten Lastfall, zu sehen. In Abb. 74a ist der Demonstrator Field V3 zu sehen, dieser hat eine Spannung von 690,79 MPa. Hierbei handelt es sich um den Demonstrator der über alle Lastfälle am besten abgeschnitten hat. In diesem Lastfall weist diese Version das beste Ergebnis auf. Daher sind für den dritten Lastfall nur drei Abbildungen vorhanden.

Die topologieoptimierte Version in Abb. 74b hat hier eine Spannung von 928,05 MPa und damit eine etwa 237 MPa höhere Spannung als der feldoptimierte Demonstrator.

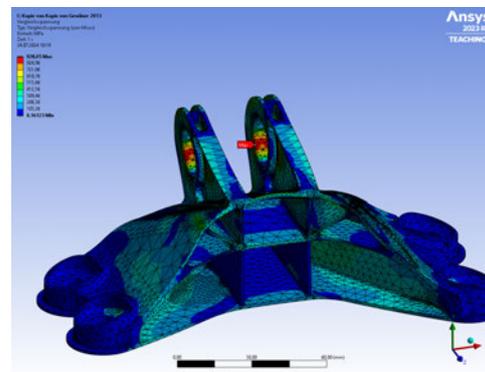
Das Gewinnerbauteil, in Abb. 74c, hat mit 729,32 MPa hier eine Performance die bis auf etwa 40 MPa an den feldoptimierten Demonstrator heran kommt.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 74: Lastfall 3 | 74a Field V3 | 74b Topologieoptimiert | 74c Gewinnerbauteil

5.3.4 Lastfall 4

Bei dem vierten Lastfall handelt es sich um ein statisches Moment. Die Belastung ist in Abb. 75 abgebildet. Eine Belastung von 5000 lb-in entspricht 565 Nm.



Abbildung 75: Lastfall 4 [19]

In Tab. 15 sind die Ergebnisse für die Simulation des vierten Lastfalls zu sehen. In Abb. 76 sind beiden Demonstratoren mit kontinuierlicher Schalendicke mit und ohne Lattice abgebildet. Bei diesem Lastfall handelt es sich um ein Moment, hier fallen die Unterschiede sehr deutlich aus. Der Demonstrator mit Lattice weist eine Spannung von 491,39 MPa auf. Die Version ohne Lattice-Struktur eine Spannung von 1121,8 MPa. Das Delta zwischen diesen beiden Spannungen liegt bei etwa 630 MPa. Dies ist damit ein deutlicher Beleg, dass Lattice-Strukturen die Performance positiv beeinflussen.

Demonstrator	Masse Topo	Endmasse	Vergleichsspannung
	in g		in MPa
Field V1	536	333	488,2
Field V2	578	331	587,92
Field V3	618	327	469,62
Field V4	672	336	511,23
Field V5	725	333	481,21
Shell Lattice	536	336	491,39
Shell	536	336	1121,8
Topology	325,6	325,6	783,75
Gewinner 2013	341,1	341,1	1101,1

Tabelle 15: Ergebnisse Lastfall 4

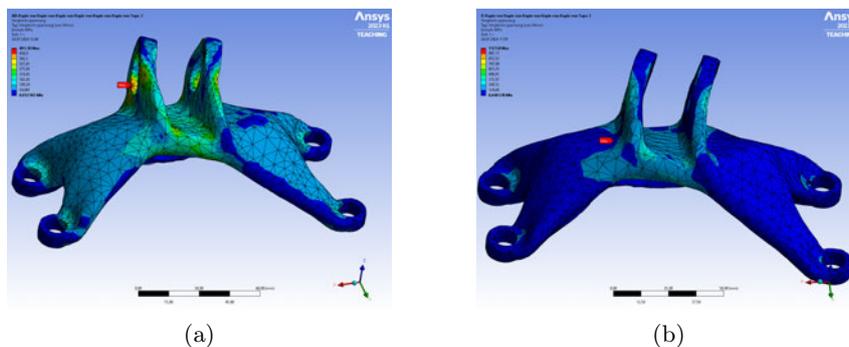
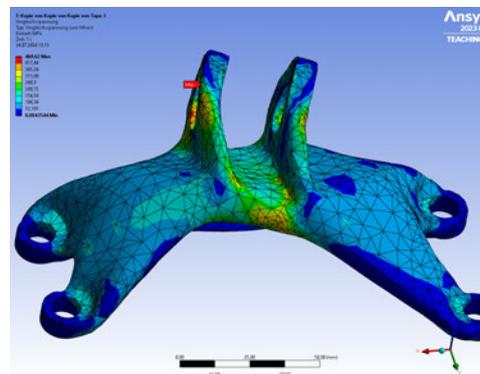


Abbildung 76: Lastfall 3 76a Shell + Lattice | ?? Shell

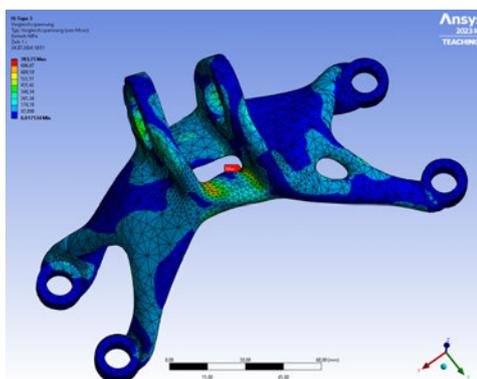
In Abb. 77 sind weitere FEM-Analysen der Demonstratoren abgebildet. Der Demonstrator Field V3, in Abb. 77a weist die niedrigste Spannung mit 469,62 MPa auf. Hierbei handelt es sich um den Demonstrator der über alle Lastfälle insgesamt die geringste Spannung aufweist. Auffallend ist, dass für diesen Lastfall der Abstand zwischen dem Demonstrator Feld V3 und dem mit kontinuierlicher Schalendicke mit Lattice bei etwa 22 MPa liegt. Aus diesem Grund gibt es in diesem Beispiel drei Abbildungen.

Die topologieoptimierte Version in Abb. 77b weist eine Spannung von 783,75 MPa auf. Diese Spannung resultiert aus der größeren Öffnung die sich oben am Demonstrator befindet.

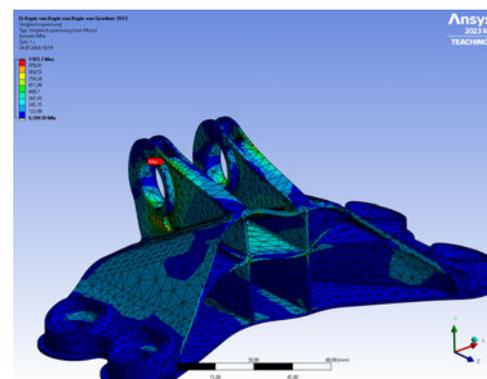
Das Gewinnerbauteil, in Abb. 77c visualisiert, hat eine Spannung von 1101,1 MPa. Die Spannung liegt etwa 631 MPa höher als die Spannung des feldoptimierten Demonstrators. Hieraus lässt sich schließen, dass die Feldoptimierung im Bereich von Momenten deutliche Vorteile bietet.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 77: Lastfall 4 | 77a Field V3 | 77b Topologieoptimiert | 77c Gewinnerbauteil

5.3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird die Performance der verschiedenen Demonstratoren über alle vier Lastfälle betrachtet. Hierzu werden die vier Vergleichsspannungen addiert. In Abb. 78 sind die addierten Vergleichsspannungen aller simulierten Bauteile visualisiert. Es ist zu beachten, dass das Diagramm erst bei 1500 MPa startet, daher scheinen die Abstände größer.

Für dieses erste Fazit werden die Belastungen wie im realen System verwendet. Da die maximalen Vergleichsspannungen teilweise an Strukturen auftreten die nicht der Optimierung unterlagen wird hier das Ergebnis des Vergleichs, der Verfahren, etwas verfälscht. Für die finale Simulation der Demonstratoren wird die Last in Ansys nicht als Bolzenlast angenommen. Die Lastfälle werden als Kraft angenommen. Dies führt dazu, dass die Last über die gesamte Fläche der Bolzenaufnahme wirkt. So soll eine Überlastung der Bolzenaufnahme verhindert werden und die Gesamtlast auf die Struktur ist ähnlich. Diese Annahme soll zu einer besseren Bewertung zwischen den Verfahren der Topologieoptimierung und der implizierten Feldoptimierung führen.

Zu erkennen ist, dass die fünf verschiedenen feldoptimierten Versionen die beste Performance aufweisen. Ein genauerer Blick auf die feldoptimierten Versionen folgt.

Die schlechteste Performance weist der Demonstrator auf, der nur eine Schale und keine Lattice-Struktur besitzt. Dieser hat eine Gesamtvergleichsspannung von 4500 MPa, diese liegt etwa 1800 MPa höher als die des besten Demonstrators. Die Version mit der kontinuierlichen Schale mit Lattice-Struktur weist eine Gesamtvergleichsspannung von etwa 3100 MPa auf. Hier besteht ein Vorsprung von 1400 MPa auf die Version ohne Lattice. Somit bietet eine Lattice-Struktur einen deutlich Mehrwert.

Der topologieoptimierte Demonstrator weist eine Gesamtvergleichsspannung von etwa 3300 MPa auf. Die Spannung liegt damit etwa 200 MPa über der von dem Bauteil mit einer kontinuierlichen Schale und kontinuierlichen Lattice. Hieraus könnte abgeleitet werden, dass es sich meistens lohnt das Bauteil mit einer Topologieoptimierung auf ein höheres Gewicht zu bringen und dann eine Lattice-Struktur einzufügen, um auf das Zielgewicht zu kommen. Dies ist jedoch im Einzelfall zu prüfen, da man aus einem Bauteil mit verschiedenen Lastfällen nicht auf alle weiteren Optionen schließen kann.

Das Gewinnerbauteil von 2013 schließt als vorletzter im diesem Vergleich ab. Die Gesamtvergleichsspannung liegt bei etwa 4000 MPa. Damit liegt diese etwa 1300 MPa über dem Demonstrator der am besten performt hat.

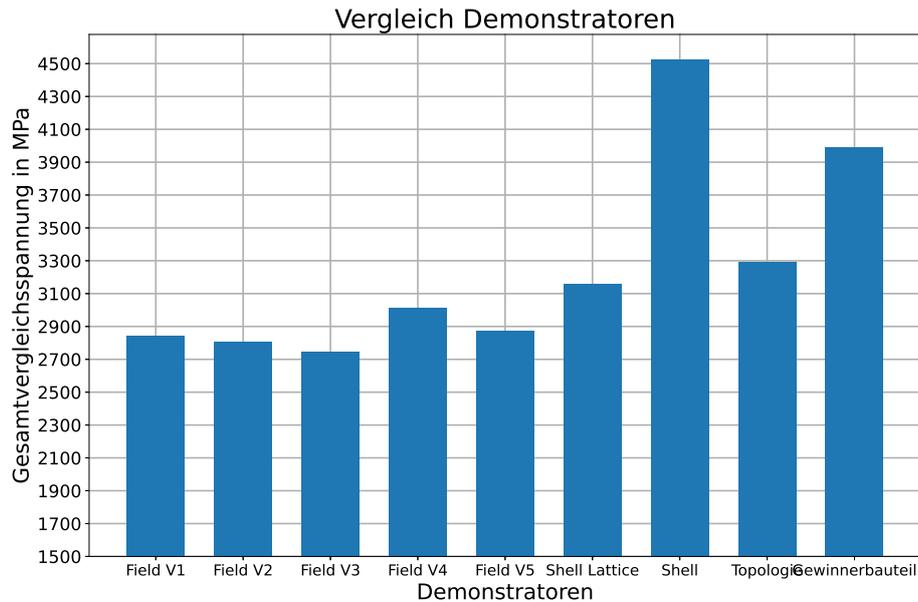


Abbildung 78: Balkendiagramm Gesamtvergleichsspannung alle Demonstratoren mit Gewinnerbauteil

Die Gewichtsreduzierung der Demonstratoren findet in zwei Stufen statt. Das Gewicht wird bei der Topologieoptimierung reduziert und im zweiten Schritt bei der Feldoptimierung auf das Zielgewicht.

Nun gilt es noch Herauszufinden, welche Stufen bei der Gewichtsreduzierung einen positiven Einfluss auf die Gesamtperformance haben. Die Erwartung war, dass ein möglichst schweres Bauteil aus der Topologieoptimierung die beste Performance aufweisen würde. In Abb. 79 wird jedoch ersichtlich, dass dies nicht der Fall ist.

Die Endgewichte der Demonstratoren bewegen sich zwischen 327 g und 336 g. Die insgesamt niedrigste Vergleichsspannung hat die Version Field V3. Der Demonstrator Field V3 ist mit 327 g, der leichteste Demonstrator im Feld. Hier wurde das Gewicht vom Original Bauteil bis zur Topologieoptimierung von 2085 g (Die original Gewichtsangabe aus der Quelle war abweichend, die 2085 g wurden in nTop ermittelt) auf 618 g reduziert. Dies entspricht etwa einer Gewichtsreduzierung von 70 % in der Topologieoptimierung.

Durch die Feldoptimierung wurde das Gewicht um etwa 14 % reduziert, ausgehend vom Gewicht des original Bauteils. Ausgehend vom topologieoptimierten Bauteil wurde die Masse um 47 % reduziert. Prozentual auf die Gewichtsreduzierung wurden 83,3 % der Gesamtgewichtsreduzierung durch die Topologieoptimierung erreicht. Weitere 16,7 % der Gesamtgewichtsreduzierung kamen aus der implizierten Feldoptimierung. Hier reichte die Spanne von 618 g zu 327 g.

Für die folgende finale Berechnungsrunde werden Gewichtsreduzierungen in diesem Bereich angenommen. Es stellte sich heraus, dass die Gewichtsangabe des Gewinnerbauteils falsch war. In der finalen Berechnung wird der neue Demonstrator vom Gewicht entsprechend angepasst.

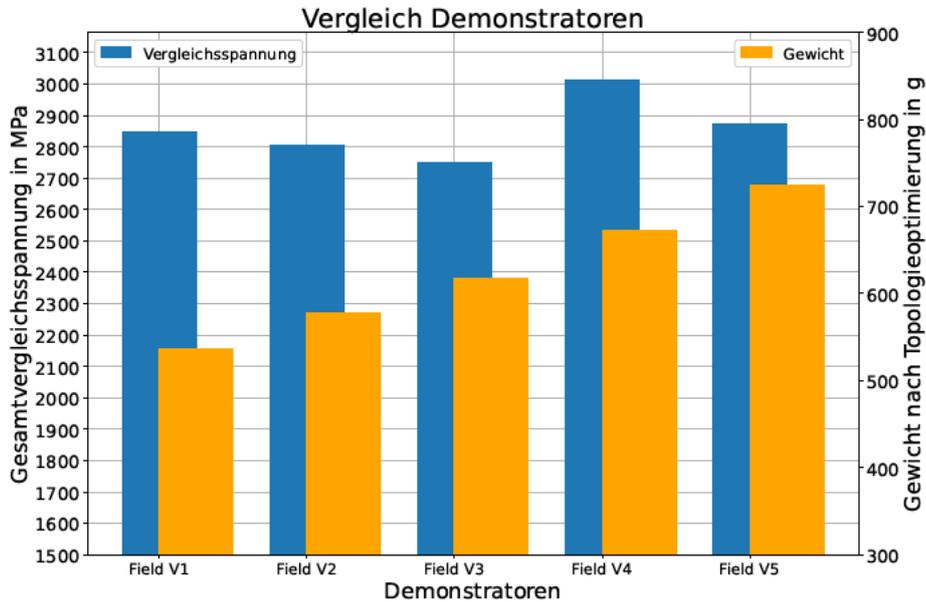


Abbildung 79: Balkendiagramm Gesamtvergleichsspannung Demonstratoren Feldoptimierung

5.4 Finale Optimierung des Demonstrators

Für die finale FEM-Analyse der Demonstratoren werden zwei optimierte Varianten gebraucht. Insgesamt werden 3 Bauteile berechnet. Das Gewinnerbauteil, ein topologieoptimierter Demonstrator und ein Demonstrator der mit der implizierten Feldtechnologie optimiert wurde. Die Zielgewichte orientieren sich am Gewinnerbauteil von 2013 mit 341,1 g.

5.4.1 Demonstrator Topologieoptimierung

Der Aufbau des finalen topologieoptimierten Demonstrators entspricht dem aus Kap. 2.5.3. Lediglich der Volume Fraction Constraint wurde so angepasst, dass nach der Nachbearbeitung in Fusion 360 das Zielgewicht von 341 g erreicht wird. In Abb. 80 ist der fertig bearbeitete Demonstrator gerendert.



Abbildung 80: Finaler Demonstrator Topologieoptimierung Rendering

5.4.2 Demonstrator Feldoptimierung

Der Aufbau des finalen feldoptimierten Demonstrators ist wie bereits in Kap. 5.2.3. Die Grundlage das topologieoptimierte Bauteil soll etwa 83,3 % des Gesamtgewichtsreduzierung erhalten. Die Gewichtsreduzierung in diesem Fall liegt bei 1744 g, ausgehend vom Originalbauteilgewicht mit 2085 g und einem Zielgewicht von 341 g. 83,3 % dieser Gewichtsreduzierung sollen aus der Topologieoptimierung kommen, hieraus ergibt sich, dass der topologieoptimierte Demonstrator etwa 632 g wiegen soll. Eine Genauigkeit von ± 3 g wird als ausreichend definiert. Das finale Gewicht der topologieoptimierten Version liegt bei 629,24 g. In Abb. 81 ist Version vor der Feldoptimierung zu sehen.



Abbildung 81: Finaler Demonstrator Feldoptimierung nach Topologieoptimierung

An dem Parametric Shell-Infill Block wurden keine Änderungen vorgenommen. Lediglich der Volume Fraction Constrain wurde iterativ so angepasst, dass das Endbauteil, nach der Nachebearbeitung in Fusion 360 341 g schwer ist. In Abb. 82 ist der Demonstrator im Schnitt

zu sehen.

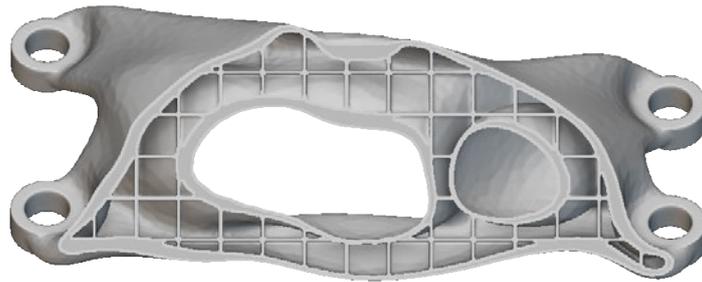


Abbildung 82: Finaler Demonstrator Feldoptimierung Schnitt

Der Demonstrator ist mit der implizierter Feldtechnologie optimiert worden. Es folgt die Nachbearbeitung in Fusion. Hier werden Funktionsflächen nachbearbeitet um eine FEM-Analyse zu ermöglichen. In Abb. 83 ist der finale Demonstrator zu sehen, welcher in Ansys berechnet wird.

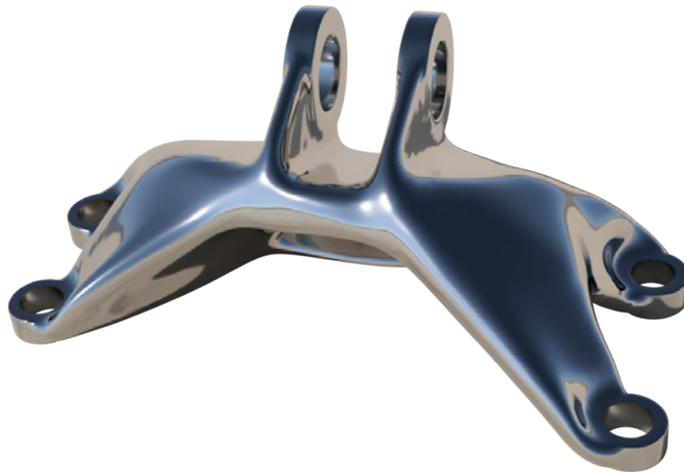


Abbildung 83: Finaler Demonstrator Feldoptimierung Rendering

5.4.3 Demonstrator Lattice-Struktur

Zum besseren Vergleich im Hinblick auf die variablen Dicken des feldoptimierten Demonstrators soll ein Demonstrator einfließen, der kontinuierliche Maße hat in der Latticedicke und Schalendicke. Der Demonstrator hat die gleiche Ausgangsgeometrie aus der Topologieoptimierung, wie der feldoptimierte Demonstrator. Die Lattice-Struktur hat eine Dicke von 0,7 mm und die Schalendicke liegt bei 1.62 mm. Auf eine Abbildung wird hier verzichtet, von außen ist der Demonstrator identisch mit dem feldoptimierten Demonstrator.

5.5 FEM Analyse zwischen feldoptimierten Demonstrator, topologieoptimierten Demonstrator, Lattice Demonstrator und Design-Challenge Gewinnerbauteil

In diesem Kapitel werden die finalen Demonstratoren untereinander verglichen, die Performanceunterschiede zum Gewinnerbauteil von 2013 werden ebenfalls beleuchtet. Es werden die Von-Mises Vergleichsspannungen, das Beulen der Demonstratoren, die maximalen Verformungen, sowie die Eigenfrequenz untersucht. Das Gewicht der drei Demonstratoren liegt bei $341\text{ g} \pm 1\text{ g}$

Nach einer Rücksprache mit den Betreuern dieser Thesis findet die finale Berechnung nicht linear statt. Dies gilt für die Vergleichsspannung, das Beulen, sowie die maximalen Verformungen.

Wie bereits in Kap. 5.3.5 erwähnt werden die strukturellen Lasten für die finale FEM-Simulation dahingehend verändert, dass statt einer Bolzenkraft eine normale Kraft eingefügt wird. Dies soll dazu führen, dass die Last auf dem Gesamtbauteil erhalten bleibt, ohne dass es zu einer Spannungsspitze an den Bolzenaufnahmen kommt.

Die Genauigkeit dieser FEM-Simulation soll im Vergleich zur ersten Simulation erhöht werden. Hierzu wird die Elementgröße bei der Vernetzung auf 1 mm reduziert, es werden quadratische Elemente genutzt. In Kombination mit der nicht linearen Berechnung für dies zu einem deutlich erhöhten Rechenaufwand. Die Vernetzung des feldoptimierten Demonstrators ist in Abb.84 zu sehen.

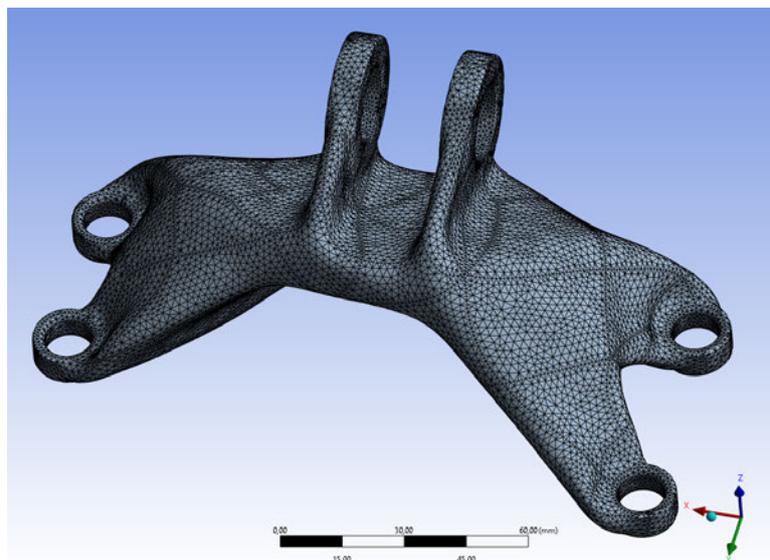


Abbildung 84: Beispiel Vernetzung finale FEM Berechnung

In Abb. 85 ist die Vernetzung innerhalb des feldoptimierten Demonstrators zu sehen. Die Anzahl der Knoten ist mit 533223 bei dem feldoptimierten Demonstrator deutlich höher als bei dem topologieoptimierten Demonstrator mit 146908.

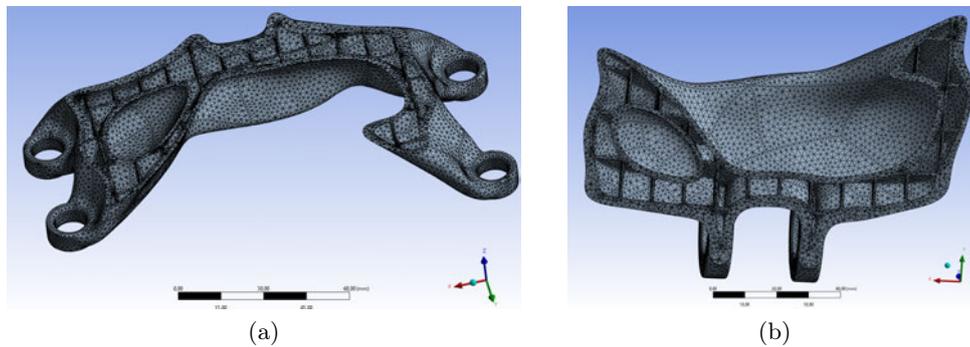


Abbildung 85: Ansicht des Netzes innerhalb des feldoptimierten Demonstrators

Die Demonstratoren wurden hinsichtlich der strukturellen Abhängigkeiten nochmals für die Simulation optimiert um Singularitäten bei der Berechnung zu entfernen. An den Einspannungen wurde ein Radius von 1,5 mm eingebracht. Dies führt dazu, dass die Singularitäten sich nicht mehr über das Bauteil ausbreiten können wie teilweise in der ersten Simulation. In Abb. 86 sind beispielhaft die Einbringung der Lasten und strukturellen Abhängigkeiten visualisiert.

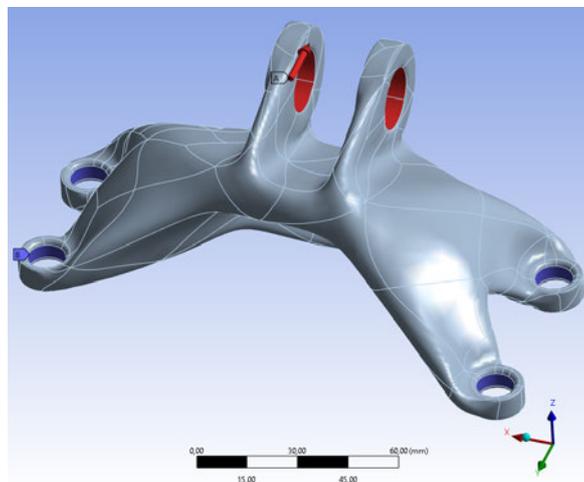


Abbildung 86: Randbedingungen finale FEM-Simulation

Für die nicht lineare Berechnung wurden Große Verformungen aktiviert und es sind mindestens 10 Substeps vorgesehen. Große Verformungen werden jedoch nicht erwartet. Die vier Lastfälle werden an dieser Stelle nicht noch einmal beschrieben, in Abb. 56 sind diese zu finden. Eine nähere Beschreibung der Lastfälle ist in Kap. 5.3.1 und folgende zu finden.

5.5.1 Vergleichsspannungen

Im ersten Schritt werden die Vergleichsspannungen betrachtet. Die Berechnung fand nicht linear statt. Innerhalb des Verlaufs wurden keine nennenswerten Ereignisse angezeigt, daher gibt es dazu in diesem Kapitel keine zusätzlichen Aussagen, die aus der nicht linearen Berechnung resultieren.

In Abb. 87 sind die Ergebnisse der finalen FEM Simulation zu sehen. In dem Diagramm wird die Wirkung der vier Lastfälle auf die drei Demonstratoren angezeigt.

Dieses Diagramm soll einen Überblick über die Vergleichsspannungen der verschiedenen Lastfälle geben. Die einzelnen Lastfälle werden im folgenden näher betrachtet.

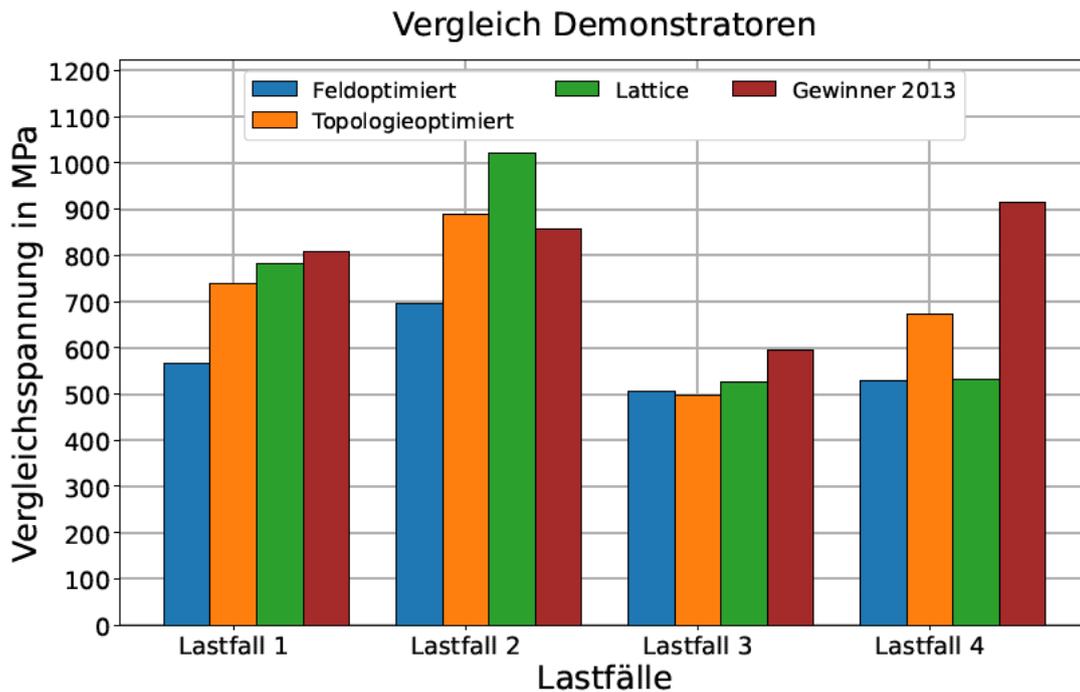


Abbildung 87: Ergebnisse Lastfälle 1 bis 4

In Abb. 88 sind die Ergebnisse der FEM-Simulation für den ersten Lastfall visualisiert. Die geringste Spannung weist hier der feldoptimierte Demonstrator auf, abgebildet in Abb. 88a. Mit einer Spannung von 566,73 MPa. Die maximale Spannung tritt in der Nähe einer Einspannung auf.

Der Ort der maximalen Spannung ist für den topologieoptimierten Demonstrator ähnlich. Dieser ist in Abb. 88b visualisiert Es tritt eine Spannung von 738,44 MPa auf.

Der Demonstrator mit kontinuierlichem Lattice weist eine Spannung von 781,57 MPa auf, dies ist in Abb. 88c zu sehen.

Bei dem Gewinnerbauteil aus 2013 (Abb. 88d) treten die maximalen Spannungen auf dem Blech auf der Oberfläche des Bauteils auf. Diese liegen bei bis zur 807,33 MPa.

Für diesen Lastfall hat die implizierte Feldoptimierung zu einer Spannungsreduzierung von etwa 23,2 % bezogen auf die Topologieoptimierung, 27,5 % auf den Lattice Demonstrator und 29,8 % bezogen auf das Gewinnerbauteil geführt.

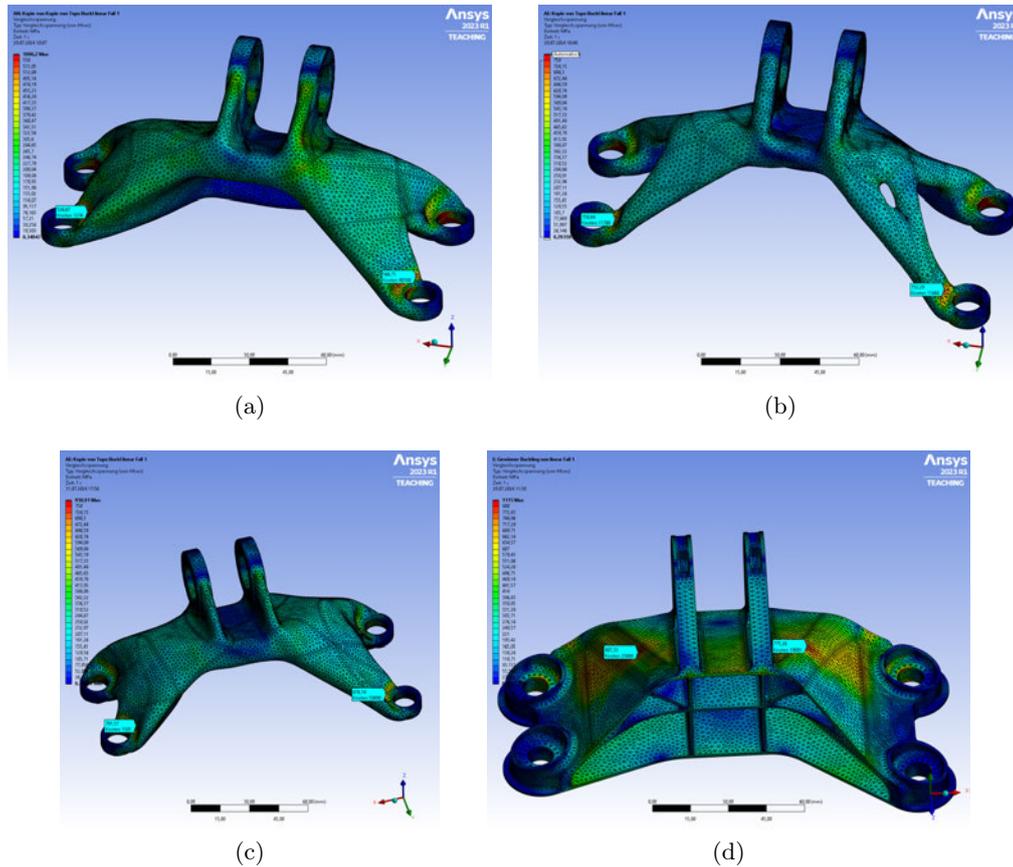


Abbildung 88: Lastfall 1 | 88a Feldoptimierter Demonstrator | 88b Topologieoptimierter Demonstrator | 88c Lattice Demonstrator | 88d Gewinnerbauteil 2013

In Abb. 89 sind die Simulationsergebnisse des zweiten Lastfalls visualisiert. Für diesen zweiten Lastfall weist der feldoptimierte Demonstrator die geringsten Vergleichsspannungen auf. In Abb. 89a ist die Berechnung des feldoptimierten Demonstrators zu sehen. Dieser erreicht nahe an der hinteren Einspannung eine Vergleichsspannung von 694,98 MPa.

Der topologieoptimierte Demonstrator aus Abb. 89b erreicht eine maximale Vergleichsspannung von 888,95 MPa.

Der Lattice Demonstrator (Abb. 89c) erreicht eine Vergleichsspannung von 1021,3 MPa, dies ist die höchste Spannung für diesen Lastfall.

Das Gewinnerbauteil erreicht eine Vergleichsspannung von 855,86 MPa. Die Spannung liegt hier auf der Vorderseite des Bauteils an. In Abb. 89d ist die Stelle zu erkennen.

Für den zweiten Lastfall führt die implizierte Feldtechnologie zu einer Spannungsreduzierung von 21,8 % im Vergleich zur Topologieoptimierung. Zum Lattice Demonstrator hat der feldoptimierte Demonstrator einen Spannungsvorteil von 32,0 %. Im Vergleich zum Gewinnerbauteil von 2013 konnte die Vergleichsspannung um 18,8 % reduziert werden.

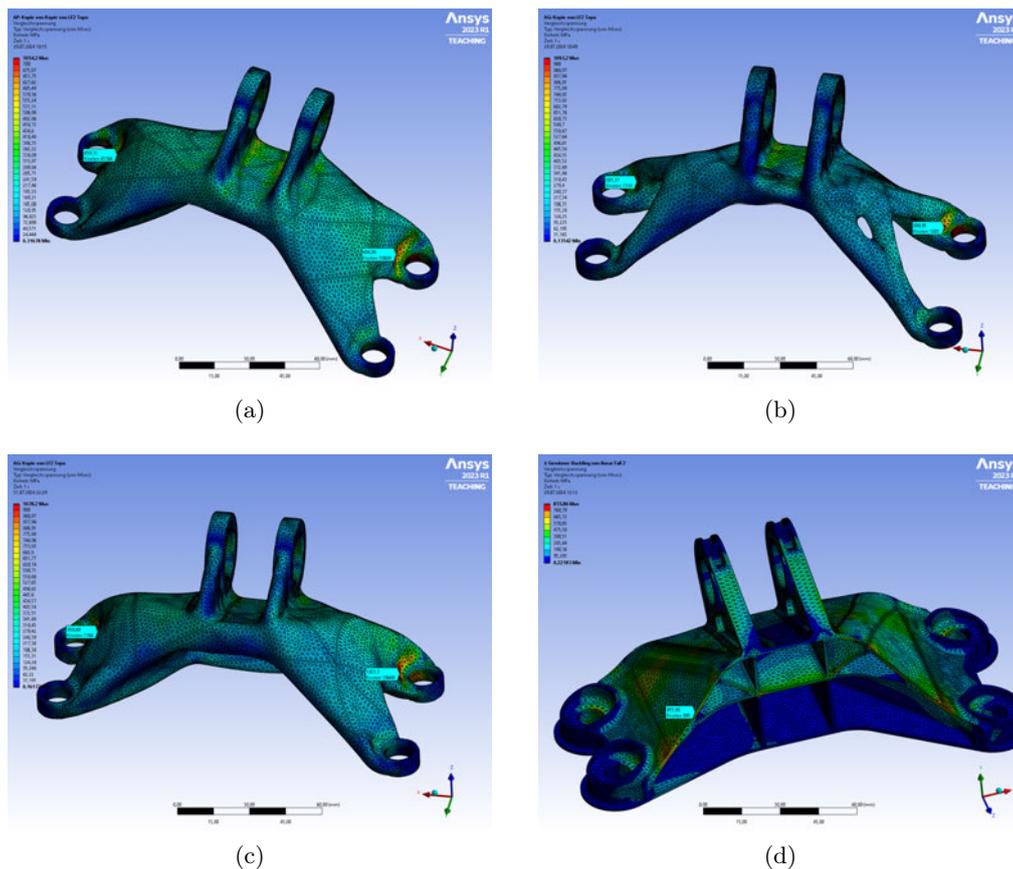


Abbildung 89: Lastfall 2 | 89a Feldoptimierter Demonstrator | 89b Topologieoptimierter Demonstrator | 89c Lattice Demonstrator | 89d Gewinnerbauteil 2013

Die Ergebnisse der Simulation für den dritten Lastfall ist in Abb. 90 zu sehen. In diesem Lastfall hat die feldoptimierte Variante (Abb. 90a) eine leicht höhere Spannung als der topologieoptimierte Demonstrator (Abb. 90b). Die höchste Spannung des feldoptimierten Demonstrators ist in diesem Lastfall innerhalb des Bauteils zu finden. Der feldoptimierte Demonstrator weist eine Spannung von 506,47 MPa auf. Die topologieoptimierte Variante eine Spannung von 498,46 MPa.

Der Lattice Demonstrator aus Abb. 90c erreicht eine maximale Vergleichsspannung von 526,66 MPa.

Das Gewinnerbauteil aus Abb. 90d hat eine maximale Vergleichsspannung von 595,34 MPa. Diese liegt in der Nähe der Bolzenaufnahmen an.

Für diesen Lastfall konnte die implizierte Feldoptimierung keinen Vorteil im Vergleich zur Topologieoptimierung erreichen. Die Feldoptimierung hat eine 1,6 % höhere Spannung erreicht im Vergleich zur Topologieoptimierung. Im Vergleich zum Lattice Demonstrator konnte die Feldoptimierung einen Vorteil von 3,8 % erreichen. Im Vergleich zum Gewinnerbauteil konnte die Feldoptimierung eine Spannungsreduzierung von 14,9 % erreichen.

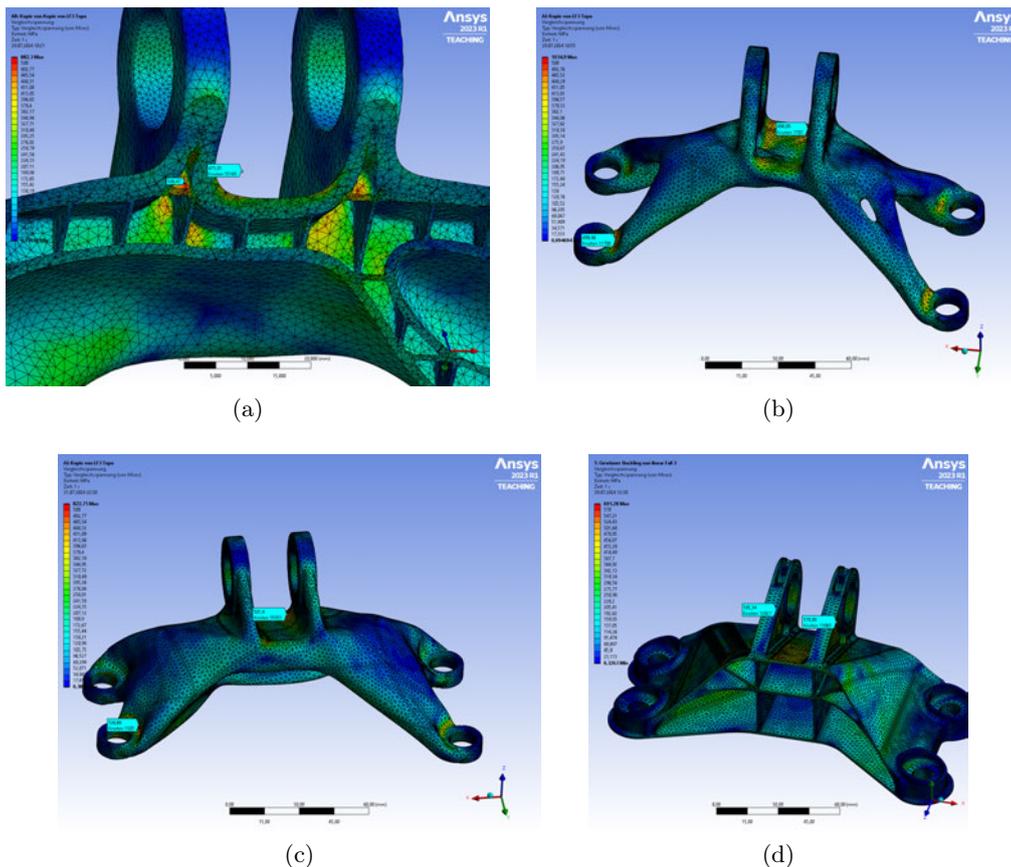


Abbildung 90: Lastfall 3 |90a Feldoptimierter Demonstrator |90b Topologieoptimierter Demonstrator |90c Lattice Demonstrator | 90d Gewinnerbauteil 2013

Die Simulationsergebnisse des vierten Lastfalls sind in Abb. 91 abgebildet. In diesem Lastfall wurde die niedrigste Vergleichsspannung vom feldoptimierten Demonstrator (Abb. 91a) erreicht. Anzumerken ist, dass die maximale Spannung an den nicht optimierten Bolzenaufnahmen anliegt. Das Potential des feldoptimierten Demonstrators wurde nicht ausgeschöpft und könnte weitere Performance Vorteile gegenüber den anderen Verfahren bringen. Es wurde eine Vergleichsspannung von 527,52 MPa erreicht.

Der topologieoptimierte Demonstrator (Abb. 91b) erreichte eine Vergleichsspannung von 673,83 MPa. Die Spannung liegt am Übergang zur den Bolzenaufnahmen an.

Bei dem Lattice-Demonstrator liegt bei dem vierten Lastfall eine Vergleichsspannung von 532,08 MPa vor. Dies zeigt, dass eine größere äußere Form mit Lattice bei Momenten eine bessere Performance aufweist.

Bei dem Gewinnerbauteil liegt die höchste Spannung an dem optimierten Bereich der Bolzenaufnahme an, zu sehen in Abb. 91d. Dies führt dazu, dass an dieser Stelle eine Vergleichsspannung von 915,83 MPa anliegt.

Für den vierten Lastfall konnte die Feldoptimierung einen Spannungsreduzierung von 21,7 % im Vergleich zur Topologieoptimierung erreichen. Im Vergleich zwischen dem Lattice Demonstrator konnte der feldoptimierte Demonstrator eine 0,9 % geringere Vergleichsspannung erzielen. Im Vergleich zum Gewinnerbauteil konnte die Vergleichsspannung mit Hilfe der implizierten Feldtechnologie um 42,4 % gesenkt werden.

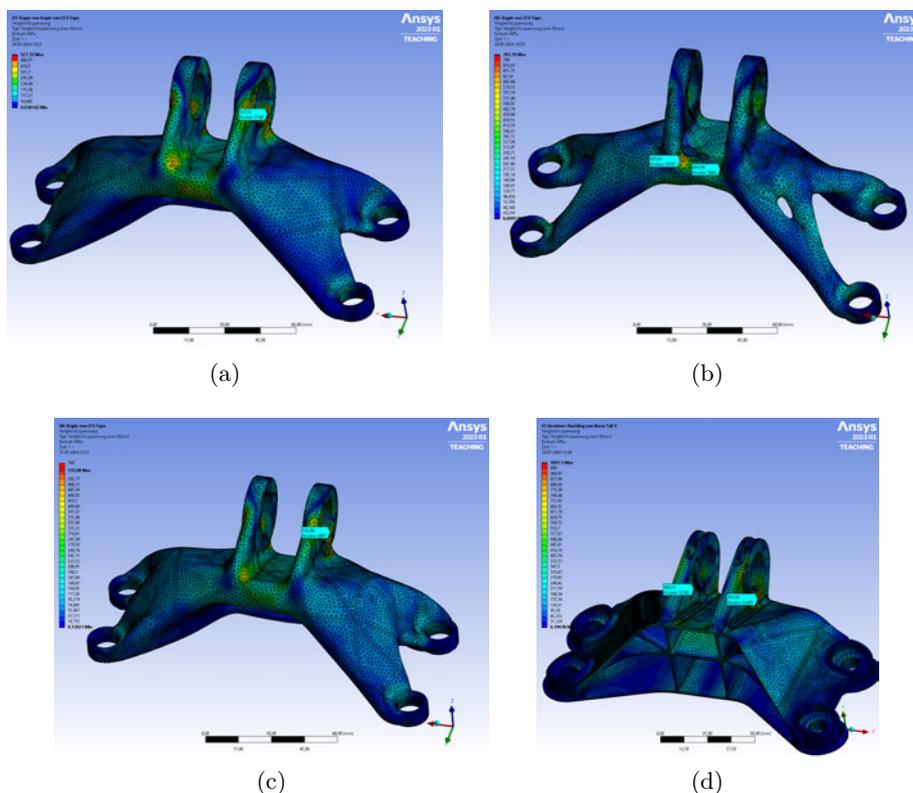


Abbildung 91: Lastfall 4 | 91a Feldoptimierter Demonstrator | 91b Topologieoptimierter Demonstrator | 91c Lattice Demonstrator | 91d Gewinnerbauteil 2013

In drei von vier Lastfällen hat der feldoptimierte Demonstrator deutliche Vorteile gegenüber dem topologieoptimierten Demonstrator. In einem Lastfall wurde ein Nachteil von 1,6 % erkannt. Gegenüber dem Gewinnerbauteil wurden im jedem Lastfall deutliche Vorteile festgestellt.

Für eine abschließende Übersicht über die Vergleichsspannungen, wurden die Vergleichsspannungen der vier Lastfälle addiert und in Abb. 92 visualisiert.

Hier ist deutlich zu sehen, dass die Feldoptimierung ihre Vorteile gegenüber der Topologieoptimierung, dem Lattice Demonstrator und des Gewinnerbauteils auspielen kann. Die implizierte Feldoptimierung konnte die Vergleichsspannung um 18,0 % senken im Vergleich zur Topologieoptimierung.

Im Vergleich zum Lattice-Demonstrator konnte die Feldoptimierung einen Spannungsvorteil von 19,8 % erreichen.

Der feldoptimierte Demonstrator konnte im Vergleich zum Gewinnerbauteil eine Spannungsreduzierung von 27,7 % erreichen.

Auf der ebene der Vergleichsspannung zeigt die implizierte Feldoptimierung klare Vorteile im Vergleich zur Topologieoptimierung.

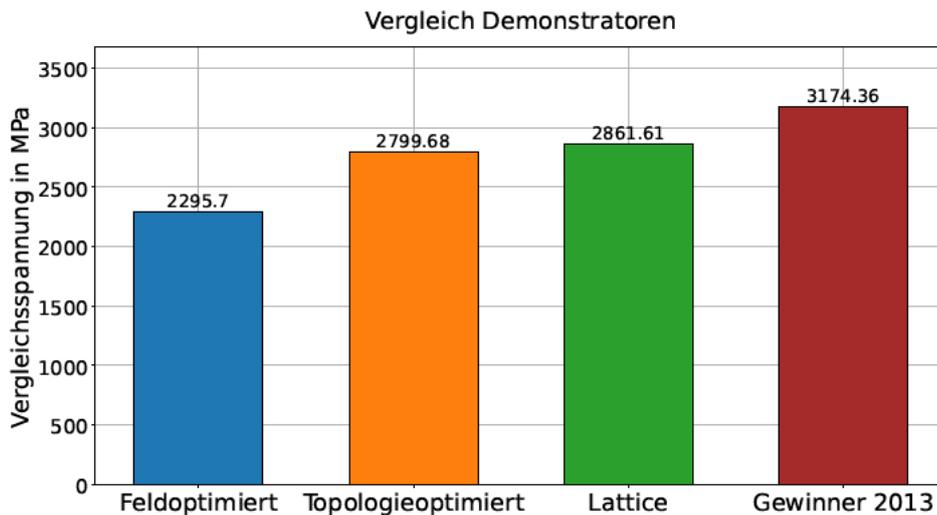


Abbildung 92: Ergebnis Gesamtvergleichsspannung

5.5.2 Verformungen

Der nächste Parameter, der analysiert werden soll, ist die maximale Verformung der Demonstratoren. Die maximale Verformung je Lastfall und Demonstrator ist in Abb. 93 visualisiert. Im Vergleich zwischen der implizierten Feldoptimierung und der Topologieoptimierung ist es recht ausgeglichen. In den ersten beiden Lastfällen hat der feldoptimierte Demonstrator die geringeren Verformungen. Bei Lastfall drei und vier hat der topologieoptimierte Demonstrator leicht geringere Verformungen.

Der Lattice-Demonstrator schneidet wechselnd ab. Im ersten, dritten und vierten Lastfall ist die Verformung in der Nähe von Feld- und Topologieoptimierung. Im zweiten schneidet der Lattice-Demonstrator am schlechtesten ab. Im Vergleich schneidet der Gewinner von 2013 in allen Lastfällen deutlich schlechter ab, als die Feld- und Topologieoptimierung.

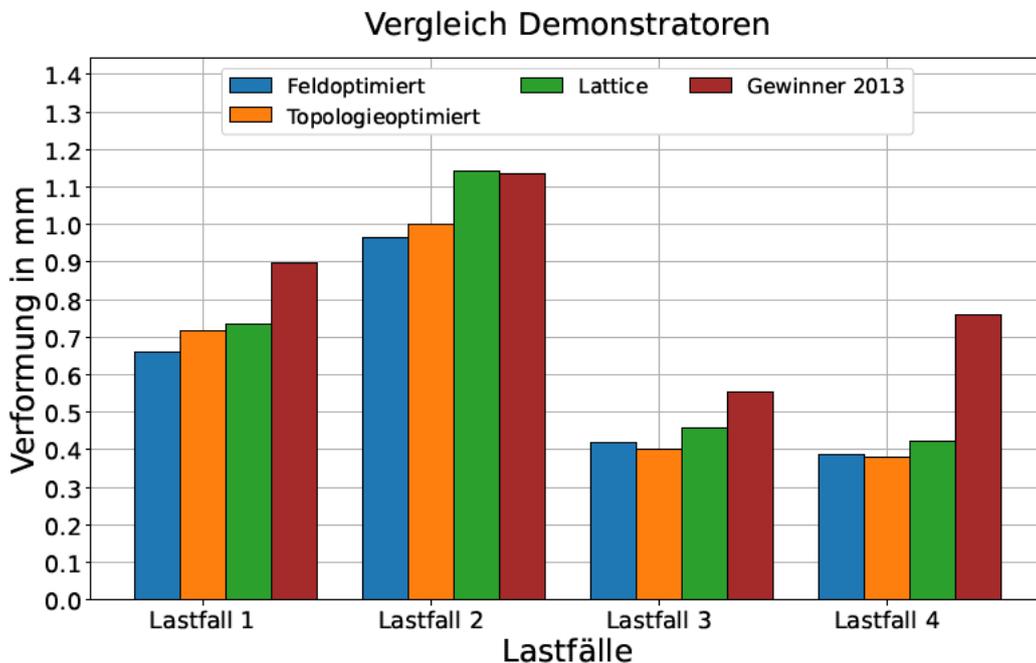


Abbildung 93: Ergebnis Verformungen je Lastfall

Zur Übersicht der Gesamtverformung über alle vier Lastfälle wurden diese in einem weiteren Plot addiert, dies ist in Abb. 94 zu sehen.

Hier ist sichtbar, dass die Gesamtverformung über alle Lastfälle bei dem feldoptimierten Demonstrator am geringsten ist. Dieser hat sich im Durchschnitt 2,55 % weniger verformt als die topologieoptimierte Variante. Der Unterschied ist hier insgesamt eher gering.

Der feldoptimierte Demonstrator hat sich im Durchschnitt 11,8 % weniger verformt als der Lattice Demonstrator.

Im Vergleich zum Gewinnerbauteil lag die Gesamtverformung bei dem feldoptimierten Demonstrator 27,25 % geringer. Der Vorteil der Feldoptimierung im Vergleich zur Topologieoptimierung ist bei diesem Parameter eher klein und wird in den meisten Fällen nicht ausschlaggebend sein.

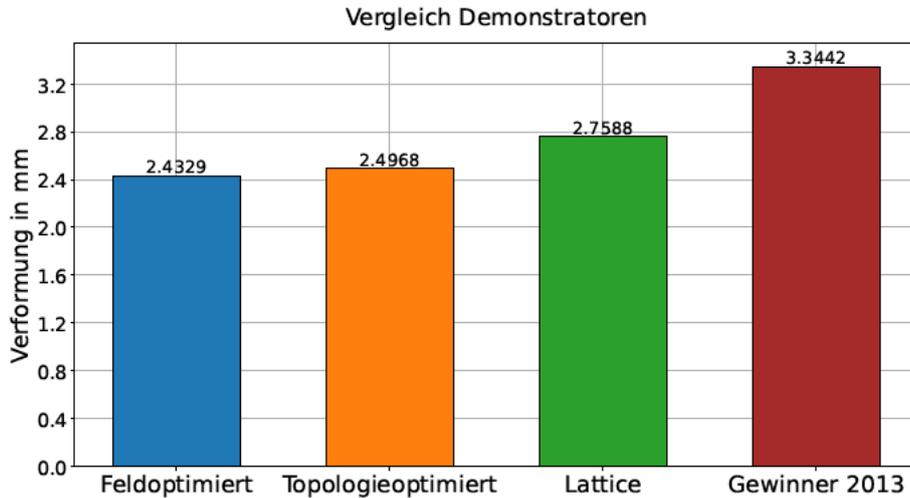


Abbildung 94: Ergebnis Gesamtverformung über vier Lastfälle

5.5.3 Beulen

Die Berechnung des Beulens der Demonstratoren wurde nicht linear durchgeführt. Aufgrund der hohen Lastmultiplikatoren des feld- und topologieoptimierten Demonstrators wurde auf eine Einbringung von Imperfektionen in die Berechnung verzichtet. Diese hätten die Lastmultiplikatoren zwar geringer ausfallen lassen, jedoch liegen diese trotzdem weit über den realistischen Szenarios.

In Abb. 95 sind die jeweiligen Lastmultiplikatoren bis zum ersten Beulen des Bauteils geplottet. Im Vergleich zwischen der Feldoptimierung und der Topologieoptimierung fällt hier auf, dass die Topologieoptimierung in jedem Lastfall besser abschneidet. Dies liegt daran, dass aufgrund der Feldoptimierung Hohlräume innerhalb des Demonstrators vorhanden sind. Hohlräume begünstigen hierbei die Möglichkeit des Beulens.

Tendenziell ist bei dem Beulen einer höherer Lastmultiplikator besser. Jedoch liegt hier der niedrigste Lastmultiplikator bei dem feldoptimierten Demonstrator bei etwa 30. Es müsste also die 30 Fache Last auf dem Bauteil wirken, bis es durch Beulen versagt. Es ist davon auszugehen, dass diese Last gar nicht auftreten kann, da der Demonstrator auf andere Weise deutlich früher versagt. Dies gilt für den feldoptimierten, sowie den topologieoptimierten Demonstrator. Hier ist ein Versagen durch Beulen quasi ausgeschlossen.

Die Lastmultiplikatoren des Lattice Demonstrator liegen bei mindestens 17,9 damit sollte ein Beulen in der Realität ebenfalls ausgeschlossen sein. Es ist ein Unterschied zum feldoptimier-

ten Demonstrator zu sehen, dieser Performte mit der gleichen Zellgröße der Lattice-Struktur besser.

Anders sieht es bei dem Gewinnerbauteil aus, hier liegt der niedrigste Lastmultiplikator bei 2,16 in Lastfall 2. Die Berechnung erfolgte ohne Imperfektionen. Es wäre also möglich, dass das Gewinnerbauteil mit Imperfektionen schon früher versagt. Hier wäre ein Versagen durch Beulen im Bereich des möglichen. Die Abbildungen auf denen die Art des Beulen zu erkennen ist, sind im Anhang Kap. 9 zu finden.

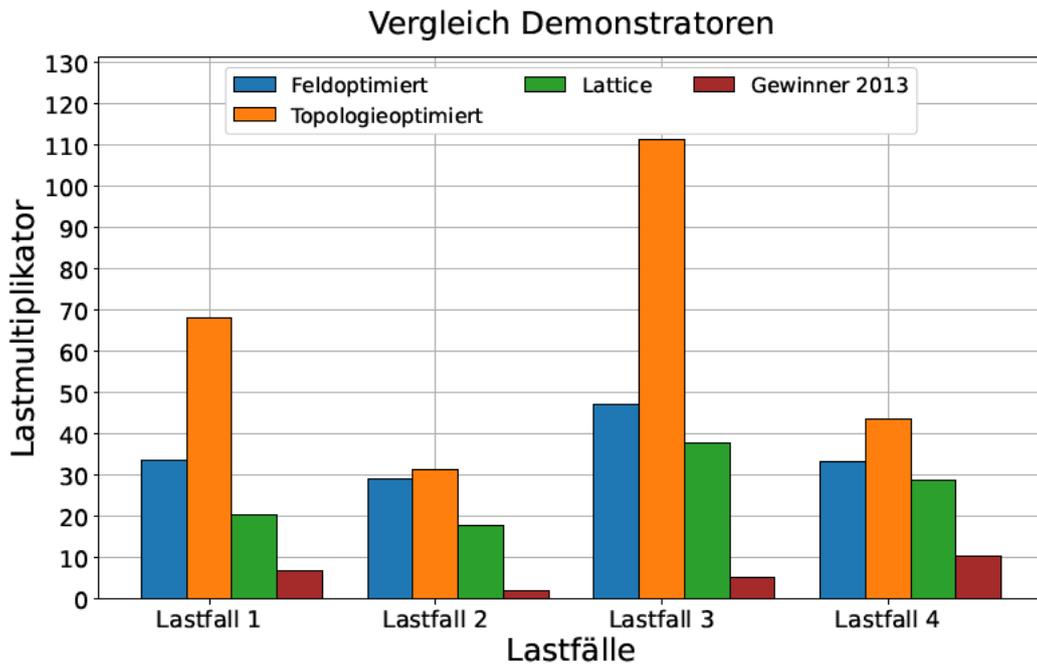


Abbildung 95: Ergebnis Beulen über vier Lastfälle

Wie bei den anderen Parametern gibt es final noch einen Überblick über die addierten Werte der vier Lastfälle, visualisiert in Abb. 96. Hier fällt das Ergebnis sehr deutlich aus. Zwischen dem feldoptimierten Demonstrator und dem Gewinnerbauteil liegt ein Faktor von circa 6. Zwischen der Topologieoptimierung und dem Gewinnerbauteil etwa der Faktor 10 des Lastmultiplikators.

In dieser Kategorie schneidet die Topologieoptimierung am besten ab, jedoch erfüllt die Feldoptimierung auch die Voraussetzungen, dass es in der Praxis nicht zum Beulen kommen kann. Bei dem Lattice Demonstrator sollte aufgrund des ausreichend hohen Lastmultiplikators ebenfalls nicht zum Beulen kommen. Die Situation beim Gewinnerbauteil sieht anders aus, in einem Lastfall ist ein sehr geringer Lastmultiplikator vorhanden.

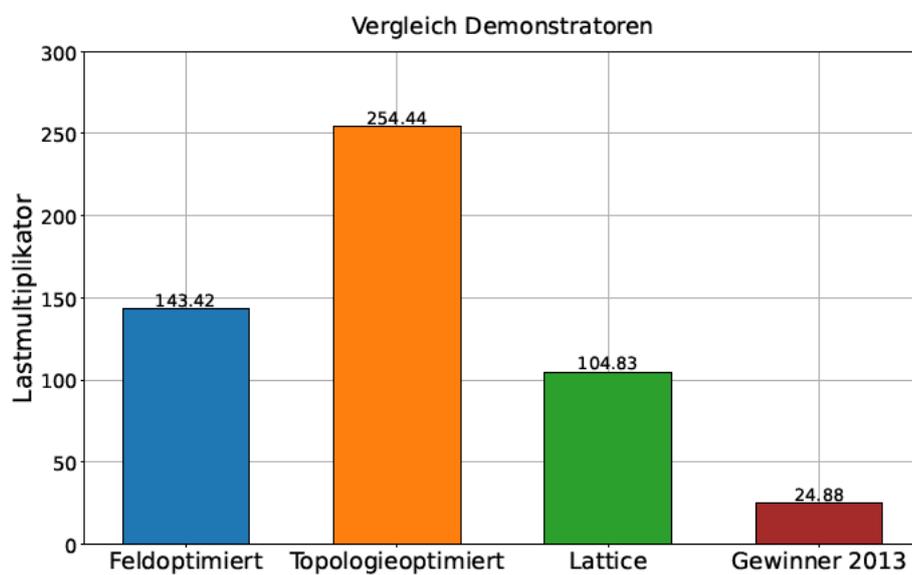


Abbildung 96: Ergebnis Beulen Gesamtlastmultiplikator

5.5.4 Modalanalyse

Der letzte Parameter der finalen FEM-Simulation, der untersucht werden soll, ist die Eigenfrequenz. Das Ergebnis der Modalanalyse ist in Abb. 97 zu sehen. Abgebildet sind hier die 1. und 2. Eigenfrequenz der jeweiligen Demonstratoren. Hier weist der feldoptimierte Demonstrator mit einer 1. Eigenfrequenz von 3267,3 Hz den besten Wert auf. Die 1. Eigenfrequenz des topologieoptimierten Demonstrators liegt von 3051,1 Hz. Der Lattice Demonstrator erreicht eine 1. Eigenfrequenz bei 3079,2 Hz. Das Gewinnerbauteil weist einen Eigenfrequenz von 2631,3 Hz auf.

Die Eigenfrequenz der implizierten Feldoptimierung liegt damit 216,2 Hz (7,1 %) höher als bei der Topologieoptimierung. Im Vergleich zum Lattice Demonstrator liegt die Eigenfrequenz 188,1 Hz (6,1 %) höher. Im Vergleich zum Gewinnerbauteil liegt die Eigenfrequenz 636,0 Hz (24,2 %) höher. Es kann gesagt werden, dass die implizierte Feldoptimierung zu einer besseren Eigenfrequenz führt.

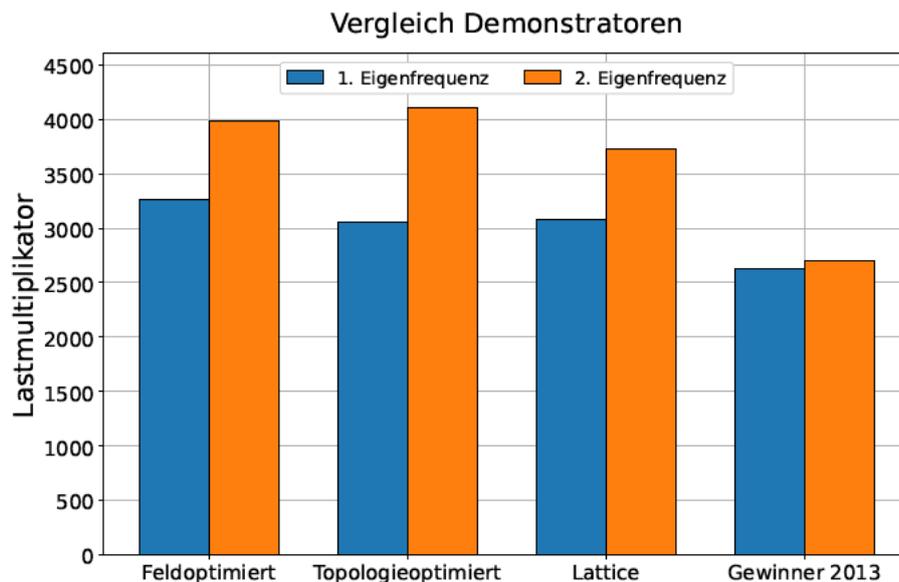


Abbildung 97: Ergebnisse Eigenfrequenz Analyse

5.6 Fertigung Demonstrator

Zur besseren Veranschaulichung der Bauteile werden diese additiv gefertigt. Die Bauteile werden aus Kosten- und Nutzensgründen nicht aus Titan gefertigt. Es gibt keine Möglichkeit die Bauteile an einem realen Triebwerk der Firma GE zu testen, daher wird auf die kostenintensive additive Fertigung aus Titan verzichtet.

Die Bauteile werden per FFF-Verfahren auf einem Bambu Lab P1S gefertigt. Aufgrund der mechanischen Möglichkeiten von FFF Materialien dienen die Demonstratoren rein zu der Verdeutlichung der Unterschiede der Verfahren.

In Abb. 98 ist der feldoptimierte Demonstrator im Druck zu sehen und der abgeschlossene Baujob auf der Druckplatte.



(a)



(b)

Abbildung 98: 98a Demonstrator im Druck | 98b Demonstrator fertig auf Bauplatte

In Abb. 99 sind die verschiedenen Demonstratoren die gefertigt wurden abgebildet. Hierbei handelt es sich um das Gewinnerbauteil, ein topologieoptimierter Demonstrator, ein feldoptimierter Demonstrator, der feldoptimierter Demonstrator im Schnitt und der Lattice Demonstrator im Schnitt. Der feldoptimierte und Lattice Demonstrator haben die gleiche äußere Form, im Schnitt wird der Unterschied ersichtlich.



Abbildung 99: Demonstratoren

5.7 Fazit Demonstrator

Es kann gesagt werden, dass die implizierte Feldoptimierung zu einer Steigerung der Performance der Bauteile führt. Der Aufwand einer Feldoptimierung ist überschaubar, wenn man vertraut ist mit nTop.

In dem untersuchten Fall des GE-Brackets konnte die implizierte Feldoptimierung im Vergleich zu einem topologieoptimierten Demonstrator die durchschnittliche Vergleichsspannung über vier Lastfälle um 18,0 % senken. Im Vergleich mit dem klassischen Lattice wurde ein Spannungsvorteil von 19,8 % erreicht. Gegenüber dem Gewinnerbauteil der Designchallenge aus 2013 war eine Reduzierung der Vergleichsspannung um 27,7 % möglich.

Die maximalen Verformungen der Feldoptimierung sind leicht besser als die maximalen Verformungen der Topologieoptimierung. Die Feldoptimierung konnte im Vergleich zum klassischen Lattice Demonstrator eine 11,8 % geringere Verformung erreichen. Im Vergleich zum Gewinnerbauteil sind die Verformungen im Durchschnitt 27,25 % geringer.

Beim möglichen Beulen der Demonstratoren hatte der topologieoptimierte Demonstrator eine bessere Performance abgelegt. Dies ist dadurch begründet, dass der feldoptimierte Demonstrator Hohlräume im Bauteil hat. Der niedrigste Lastmultiplikator bei der feldoptimierten Variante lag bei etwa 30, damit ist ein Versagen durch Beulen quasi ausgeschlossen, da der Demonstrator vorher auf eine andere Art versagen würde. Die Lastmultiplikatoren bei dem Lattice Demonstrator sind ebenfalls so hoch, dass es ein Versagen durch Beulen sehr unwahrscheinlich ist. Das Gewinnerbauteil hatte bei einem Lastfall einen Lastmultiplikator von 2,16 zum Beulen. Damit liegt etwa Faktor 14 zwischen dem Gewinnerbauteil und der Feld- und Topologieoptimierung, bei dem zweiten Lastfall. Hier sind beide Verfahren im Vorteil.

Bei der Modalanalyse konnte die höchste 1. Eigenfrequenz bei dem feldoptimierten Demonstrator festgestellt werden. Diese liegt 7,1 % höher als beim topologieoptimierten Demonstrator, 6,1 % höher als beim Lattice Demonstrator und 24,2 % höher als beim Gewinnerbauteil.

Zusammengefasst gibt es Vorteile in der Vergleichsspannung, einen kleinen Vorteil bei der maximalen Verformung, das Beulen ist kein Versagensgrund, sowie eine Steigerung der Performance aufgrund der höheren 1. Eigenfrequenz.

So kann insgesamt die Empfehlung abgegeben werden, für geeignete Bauteile die implizierte Feldoptimierung anzuwenden.

6 Bewertung von Wechselwirkungen im Hinblick auf die Gestaltungsweise von Infill Lattice-Strukturen und den Ergebnissen des Demonstrators

Durch die Ergebnisse des Vergleichs der Demonstratoren aus Kap. 5 können Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen der verschiedenen Optimierungswege mit und ohne Lattice-Strukturen geschlossen werden.

Die Erwartungen an die implizierte Feldtechnologie wurden erfüllt. Die Eigenschaften im Bereich von Vergleichsspannung, sowie der 1. Eigenfrequenz konnten signifikant gesteigert werden. Ein Versagen durch Beulen kann ausgeschlossen werden. Im Bereich der Verformungen konnte kein großer Vorteil gegenüber der Topologieoptimierung erreicht werden.

Um diesen Performance Vorteil zu erreichen, sollte die implizierte Feldtechnologie angewandt werden. Das reine Einbringen einer Infill Lattice-Struktur führt nicht unbedingt zu einem Vorteil.

Dies ist besonders im Vergleich zwischen dem topologieoptimierten Demonstrator und dem Lattice Demonstrator zu sehen. Der Gewichtsunterschied zwischen den Demonstratoren liegt bei unter einem Gramm. Hier lag die Vergleichsspannungsdifferenz bei bis zu 130 MPa bei einem Lastfall zu Gunsten des topologieoptimierten Demonstrators. In zwei weiteren Lastfällen ist die Topologieoptimierung ebenfalls im Vorteil, hier jedoch mit einem kleineren Unterschied. Im letzten Lastfall zeigt der Lattice-Demonstrator die bessere Performance, dieser weist eine 180 MPa geringere Vergleichsspannung auf, als der topologieoptimierte Demonstrator.

Bei den ersten drei Lastfällen handelt es sich um eine Kraft die auf den Demonstrator wirkt, in all diesen Fällen konnte sich der topologieoptimierte Demonstrator durchsetzen. Bei dem vierten Lastfall handelt es sich um ein Moment. In diesem Lastfall konnte der Lattice Demonstrator einen eindeutigen Vorteil erzielen.

Hieraus kann abgeleitet werden, dass für Bauteile bei denen hauptsächlich Kräfte wirken die Topologieoptimierung ohne Lattice-Struktur zu nutzen ist und bei Bauteilen in denen Momente die hauptsächlich Last ausmachen eine Topologieoptimierung auf ein höheres Gewicht mit anschließendem Lattice von Vorteil ist.

Durch die Topologieoptimierung auf ein höheres Gewicht mit anschließender Einbringung einer Lattice-Struktur erreicht dieser Demonstrator aufgrund der größeren äußeren Form des Bauteils ein höheres Flächenträgheitsmoment im Vergleich zum nur topologieoptimierten Demonstrator. Dies führt dazu, dass der Lattice-Demonstrator bei Momenten die bessere Performance aufweist.

In Wechselwirkung damit wird die Performance bei hauptsächlichlicher Kraftbelastung verrin-

gert. Das Problem liegt hier in der kontinuierlichen Schalendicke, so ist verhältnismäßig viel Schalengewicht an Strukturen an denen es nicht zur Performancesteigerung beiträgt und dementsprechend zu wenig Material an Stellen an denen der Kraftfluss erhöht ist.

Es ist zu beachten, dass die Stichprobe für diese Aussage klein ist, nichts desto trotz wird diese Erklärung als plausibel angesehen.

In dem Falle, dass es nur die Möglichkeit gibt eine kontinuierliche Schalenstärke mit einem kontinuierlichen Lattice einzubringen, gilt es abzuwägen welche Lasten hauptsächlich auf dem Bauteil wirken. Danach sollte entschieden werden ob mit oder ohne klassische Lattice-Strukturen gearbeitet wird.

Eben diese Wechselwirkung wird mit Hilfe der implizierten Feldtechnologie aufgehoben. Durch die Angabe der Lastfälle und strukturellen Abhängigkeiten ist nTop dazu in der Lage, die Schalenstärke, sowie Latticestärke variabel an die Gegebenheiten anzupassen. Dies führt dazu, dass das Bauteil durch die größere äußere Form, ein erhöhtes Flächenträgheitsmoment aufweisen kann. So können Biegebeanspruchungen besser aufgenommen werden. Gleichzeitig wird die Lattice- und Schalenstärke so angepasst, dass an Stellen mit erhöhten Kraftfluss sich ein erhöhtes Materialaufkommen befindet. So können Spannungspitzen die sich sonst ausgebildet hätten reduziert werden. Dies führt dann dazu, dass die implizierte Feldtechnologie im Hinblick auf die Topologieoptimierung im Durchschnitt die Vergleichsspannung um 18,0 % senken kann. Im Vergleich zum klassischen Latticing konnte die Vergleichsspannung um 19,8 % gesenkt werden. In Abb. 100 sind die Unterschiede in der Schalenstärke zwischen dem klassischen Latticing und der Feldoptimierung gut zu erkennen. Die Lattice-Struktur selbst bleibt in der Feldoptimierung nah an der unteren Grenze des Bereichs für die Lattice-Struktur.



Abbildung 100: Schnitt Demonstrator Lattice (Oben) + Feldoptimierung (Unten)

7 Herausforderungen & Ausblick

Generell zeigt die implizierte Feldtechnologie deutliche Vorteile. Eine Vergleichsspannungsreduzierung von 18,0 % gegenüber der Topologieoptimierung, 19,8 % gegenüber klassischem Latticing und 27,7 % gegenüber dem Referenzbauteil, dem Gewinner der Design-Challenge 2013, konnten erreicht werden. Eine deutlich Verbesserung konnte ebenfalls im Bereich der Eigenfrequenzen festgestellt werden. Hieraus kann der positive Effekt des Verfahrens auf den Leichtbau schnell erkannt werden.

Eine Herausforderung ist, die Bauteile auszuwählen, die für die implizierte Feldtechnologie in Frage kommen. Bei Bauteilen die durch die vorangehende Topologieoptimierung aus dünnen Strukturen bestehen, kann ein sinnvoller Einsatz der implizierten Feldtechnologie erschwert werden. Es gilt hier im Einzelfall zu prüfen, ob das gewählte additive Fertigungsverfahren die filigranen Strukturen abbilden kann. Je nach Verfahren könnte auch beispielsweise eine Entpulverung notwendig sein. Dies ist bei filigranen Strukturen schwerer zu realisieren.

Eine weitere Herausforderung stellt der Daten export aus nTop dar. Hier gibt es die Möglichkeit das optimierte Bauteil als Stepdatei zu exportieren, dies führt aufgrund der Lattice-Strukturen häufig zu großen Datensätzen, bis zum Gigabyte Bereich. Dies erhöht die Ladezeiten von Simulationenprogrammen und Slicern deutlich. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Bauteil Fehler hat, welche ein Vernetzen oder das Slicen verhindern ist recht hoch. Die Fehler im Modell entstehen, wenn nTop die implicit Modelle in CAD Modelle mit NURBS umwandelt um sie zu exportieren. Eine Veränderung der erlaubten Toleranz bei der Umwandlung führte nach teilweise mehreren Versuchen zu einem Erfolg, sodass die Datei weiter verarbeitet werden kann. Mittlerweile gibt es für ausgewählte Software die Möglichkeit implicit Modelle zu importieren. Dies adressiert sowohl die Verarbeitungsgeschwindigkeit, wie auch die Fehleranfälligkeit.

Des Weiteren kann die Vernetzung der Ausgangsbauteile in nTop eine anspruchsvolle Aufgabe darstellen. Für die Vernetzung zu einem FE Netz, dass für eine Optimierung gebraucht wird werden mehrere Verfeinerungsschritte gebraucht. Die Vernetzung in nTop ist suboptimal. Es kommt häufig zu einer Selbstschneidung des Netzes, wodurch dieses für weitere Schritte unbrauchbar wird. Als Lösungsstrategie kann die Wahl desselben Werts für die Toleranz zur Netzerstellung (1. Block) und die Netzgröße (2. und 3. Block) empfohlen werden. Teilweise sind mehrere Iterationen erforderlich. Zudem ist sicherzustellen, dass das Bauteil an kritischen Stellen korrekt abgebildet wird.

Unter Berücksichtigung der deutlichen Vorteile, die durch die implizierte Feldtechnologie erreicht werden können, sind die genannten Herausforderungen kein Hindernis.

Die implizierte Feldtechnologie weist eine Reihe von Vorteilen auf, sodass davon auszugehen

ist, dass sie in Zukunft an Popularität gewinnen wird. Aufgrund der, je nach additiven Fertigungsverfahren, niedrigen Aufbauraten sind die Stückkosten der additive gefertigten Bauteile in einem höheren Bereich. Der Einsatz der implizierten Feldtechnologie resultiert in einer Reduktion der Bauteilmasse, was zu einer Verringerung der erforderlichen Maschinenstunden und des benötigten Materials führt. Dies hat eine Senkung der Stückkosten zur Folge. In Wechselwirkung zu den gesunkenen Kosten, haben die Bauteile einen höheren Wert in der Nutzung, da hier Gewicht eingespart werden konnte. In der Konsequenz führt dies zu einer Win-Win-Situation, in der zum einen die Kosten für die additive Fertigung der Bauteile sinken, während zum anderen deren Nutzungswert steigt.

Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse lässt sich eine Empfehlung für die Nutzung der implizierten Feldtechnologie von nTop in der additiven Fertigung aussprechen. Aktuell ist nTop der einzige Anbieter einer solchen Funktionalität und dem damit möglichen Optimierungsgrad. Es ist davon auszugehen, dass Mitbewerber aufschließen werden.

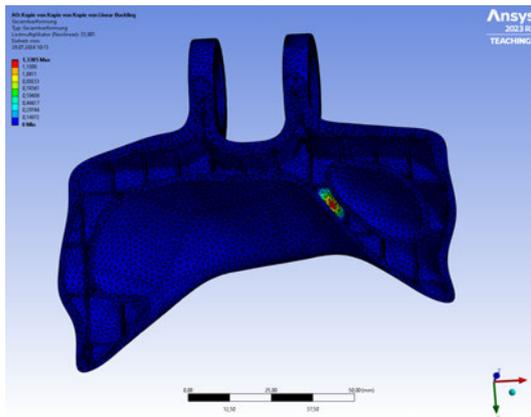
8 Literaturverzeichnis

Literatur

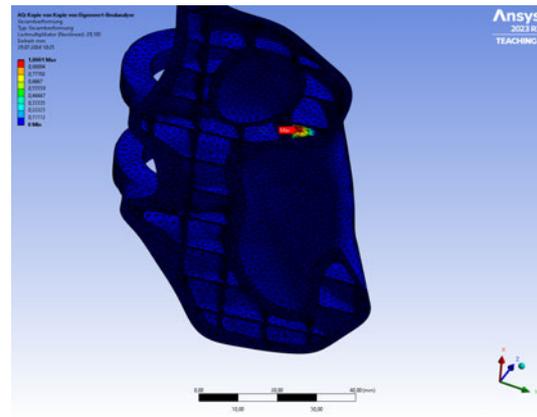
- [1] *Optimizing the mass and natural frequency of the NASA EXCITE bracket with Field Optimization*. [Online; Stand 08. März 2024]. URL: <https://www.ntop.com/resources/blog/optimizing-the-mass-and-natural-frequency-of-the-nasa-excite-bracket-with-field-optimization-or-ntop/>.
- [2] Dr.-Ing. Robin Day. *Additive Fertigung - Hinzufügen statt Abtragen*. [Online; Stand 04. Juli 2024]. URL: <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/technologien/additive-fertigung.html#:~:text=Die%20additive%20Fertigung%2C%20auch%20bekannt,mit%20dem%20bereits%20vorhandenen%20Werkstoff..>
- [3] *AM FIELD Guide Formnext*. [Online; Stand 08. August 2024]. URL: <https://formnext.mesago.com/frankfurt/en/industry-insights/am-field-guide/downloads.html>.
- [4] *How 3D Printed Lattice Structures Improve Mechanical Properties*. [Online; Stand 18. Juli 2024]. URL: <https://3dprinting.com/tips-tricks/3d-printed-lattice-structures/>.
- [5] *What equations are used to create the TPMS types?* [Online; Stand 03. August 2024]. URL: <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/360053267814-What-equations-are-used-to-create-the-TPMS-types>.
- [6] J. Noronha J. Dash J. Rogers M. Leary M. Brandt und M. Qian. *Titanium Multi-Topology Metamaterials with Exceptional Strength*. [Adv. Mater. 2024, 2308715, DOI = 10.1002/adma.202308715].
- [7] *Spherene*. [Online; Stand 08. August 2024]. URL: <https://spherene.ch/>.
- [8] *nTop capabilities*. [Online; Stand 04. April 2024]. URL: <https://www.ntop.com/software/capabilities/>.
- [9] *Einmaleins der Topologieoptimierung: Algorithmische Modelle als Mittel zur Entwicklung von Leichtbaudesigns*. [Online; Stand 17. Juli 2024]. URL: <https://formlabs.com/de/blog/topologie-optimierung/>.
- [10] Prof. Dr.-Ing. Jens Telgkamp. *Skript TDAF WiSe23 05 Strukturoptimierung und generatives Design*. [Seite 46-52].
- [11] Ajay Prasad. *How to run field optimization*. [Online; Stand 18. Juli 2024]. URL: <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/15022831283475-How-to-run-field-optimization>.
- [12] *Lattice Structures*. [Online; Stand 05. August 2024]. URL: <https://altair.com/lattice-structures>.

- [13] *Types of Lattices for Additive Manufacturing – Terms Engineers Need to Know*. [Online; Stand 05. August 2024]. URL: <https://altair.com/blog/articles/types-of-lattices-for-additive-manufacturing-terms-engineers-need-to-know>.
- [14] *Volumetric Latticing Fusion Page 11-17*. [Online; Stand 06. August 2024]. URL: https://static.au-uw2-prd.autodesk.com/Class_Handout_CP502032_ClassHandout-CP502032-Lichtman-AU2022_v05.pdf.
- [15] *Carbon Design Engine*. [Online; Stand 06. August 2024]. URL: <https://www.carbon3d.com/products/carbon-design-engine>.
- [16] *Design for additive manufacturing*. [Online; Stand 07. August 2024]. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/>.
- [17] *Ultrasim HyDesign*. [Online; Stand 08. August 2024]. URL: <https://forward-am.com/service-portfolio/ultrasim-3d-software/hydesign/>.
- [18] *Aluminium Werte*. [Online; Stand 02. Juli 2024]. URL: <https://www.maschinenbauwissen.de/skript3/werkstofftechnik/aluminium/8-aluminium>.
- [19] *GE jet engine challenge*. [Online; Stand 02. Juli 2024]. URL: <https://grabcad.com/challenges/ge-jet-engine-bracket-challenge>.
- [20] *M Kurniawan GE Jet Engine Bracket Version 1.2*. [Online; Stand 03. Juli 2024]. URL: <https://grabcad.com/library/m-kurniawan-ge-jet-engine-bracket-version-1-2-1>.

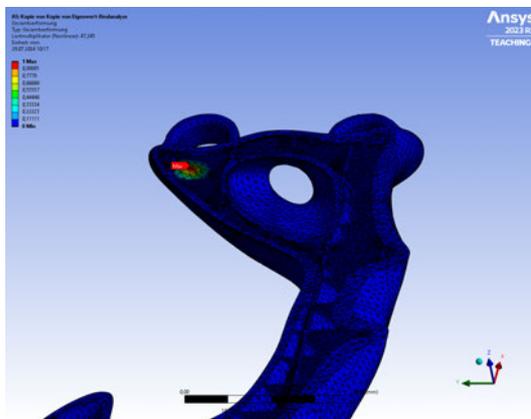
9 Anhang



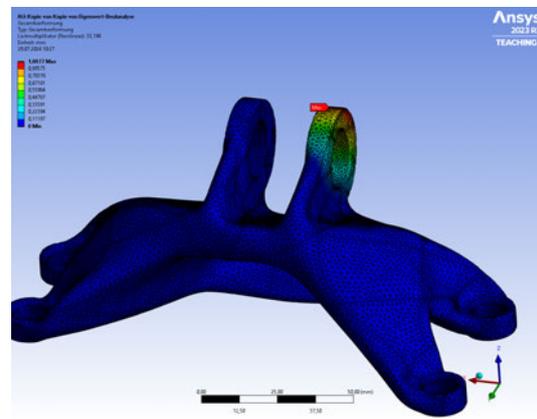
(a)



(b)

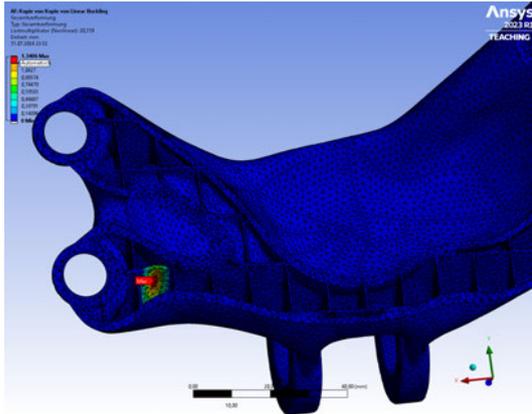


(c)

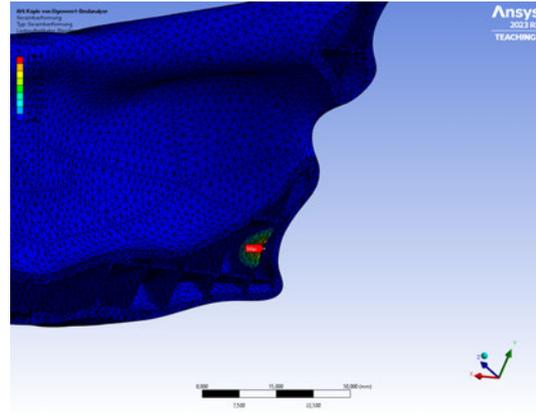


(d)

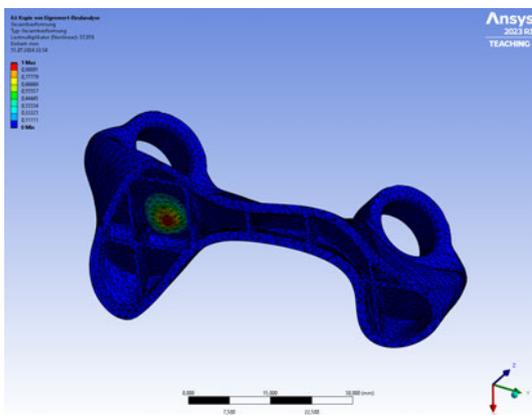
Abbildung 101: Feldoptimierter Demonstrator Versagenfälle Buckling | 101a LF1 | 101b LF2
| 101c LF3 | 101d LF4



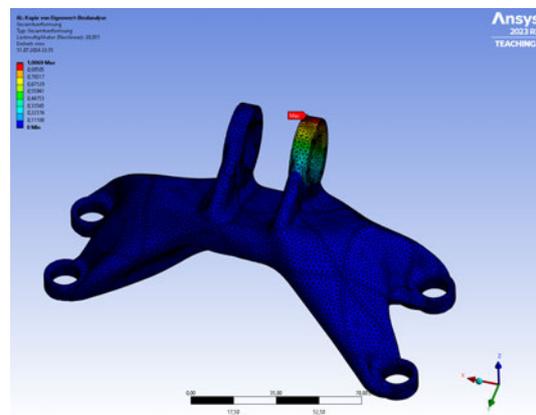
(a)



(b)

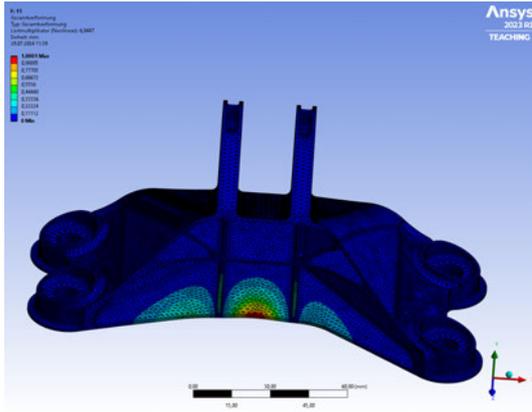


(c)

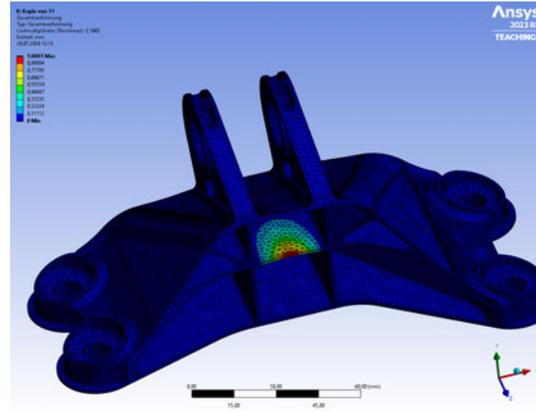


(d)

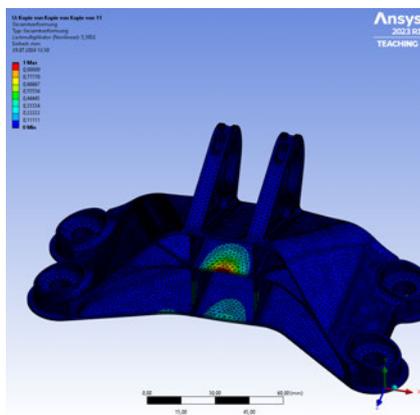
Abbildung 103: Lattice Demonstrator Versagenfälle Buckling | 103a LF1 | 103b LF2 | 103c LF3 | 103d LF4



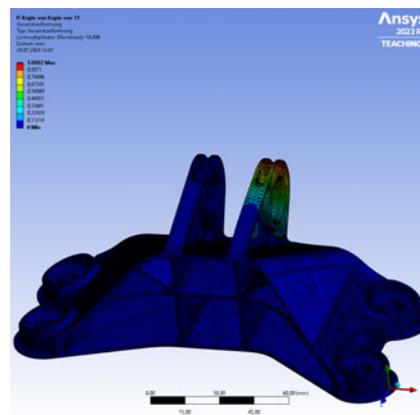
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 104: Lattice Demonstrator Versagenfälle Buckling | 104a LF1 | 104b LF2 | 104c LF3 | 104d LF4



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Duus

Vorname: Fynn-Henrik

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konzeptentwicklung zur Integration von mechanisch hoch belastbaren Infill Lattice-Strukturen in der Bauteiloptimierung unter Anwendung von nTops Impliziterter Feldtechnologie für additive Fertiaunasverfahren

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

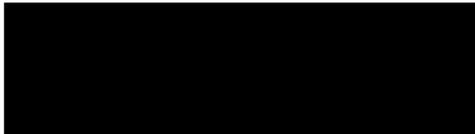
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Tornesch

Ort

10.08.2024

Datum


Unterschrift im Original