



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Daniel Bogantes Lenz

Vergleich von Strukturoptimierungs- Sovern in einer Low-Code Programmierungsumgebung unter Berücksichtigung von Fertigungsbeschränkungen additiver und konventioneller Fertigungsverfahren

Daniel Bogantes Lenz

**Vergleich von Strukturoptimierungs-
Solvern in einer Low-Code
Programmierungsumgebung unter
Berücksichtigung von
Fertigungsbeschränkungen additiver
und konventioneller Fertigungsverfahren**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

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

Erstprüfer/in: Professor Dr. Jens Telgkamp
Zweitprüfer/in : M.Sc. Jaco Beckmann

Abgabedatum: 27.09.2024

Zusammenfassung

Daniel Bogantes Lenz

Thema der Bachelorthesis

Vergleich von Strukturoptimierungs-Solvern in einer Low-Code Programmierumgebung unter Berücksichtigung von Fertigungsbeschränkungen additiver und konventioneller Fertigungsverfahren

Stichworte

Topologieoptimierung, Low Code Programmierumgebung, Strukturoptimierung, Heuristische und Mathematische Methoden,

Kurzzusammenfassung

In dieser Masterarbeit werden die Topologieoptimierungs-Solver Hexagon Emendate und Altair OptiStruct innerhalb der Low-Code-Umgebung Synera verglichen, wobei letzterer als besonders leistungsfähig gilt. Synera integriert verschiedene Funktionen und ermöglicht die parametrische Konstruktion von Bauteilen ohne aufwendige 3D-Modellierung. Beide Solver werden unter Berücksichtigung konventioneller und additiver Fertigungsverfahren anhand verschiedener Anwendungsfälle getestet.

Daniel Bogantes Lenz

Title of the paper

Comparison of structural optimisation solvers in a low-code programming environment, taking into account manufacturing constraints of additive and conventional manufacturing processes

Keywords

Topology optimisation, low code programming environment, structural optimisation, heuristic and mathematical methods

Abstract

This master's thesis compares the topology optimisation solvers Hexagon Emendate and Altair OptiStruct within the low-code environment Synera, whereby the latter is considered to be particularly powerful. Synera integrates various functions and enables the parametric design of components without complex 3D modelling. Both solvers are tested using various use cases, taking into account conventional and additive manufacturing processes

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Motivation	12
3	Softwaregrundlagen	13
3.1	Low-Code Programmierung.....	13
3.2	Topologie Optimierung	16
3.2.1	Mathematische Optimierungs-Methoden RAMP und SIMP	19
3.2.2	ESO/BESO/Hard-Kill Methode	24
4	Konventionelle Fertigungsverfahren	27
4.1	Fräsen	27
4.2	Gießen	30
4.3	MIM (Metallpulver-Spritzguss/ Metal Injection Molding).....	33
5	Additive Fertigung	35
5.1	Grundlagen der additiven Fertigung	36
5.2	Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen	39
5.3	Materialextusion	41
6	Automatisierungsplattform Synera	43
6.1.1	Funktionsweise und Aufbau	44
6.1.2	Aufbau einer Topologie Optimierung in Synera	45
6.1.3	Hexagon Emendate Solver	46
6.1.4	Altair OptiStruct Solver	52
7	Untersuchungen der Solver und Ergebnisse.....	59
7.1	Anwendungsfälle.....	60
7.2	Workflows.....	64
7.2.1	Einstiegsbeispiel Fahrrad-Kurbel	66
7.3	Strukturen und Analyse	71
7.3.1	Gabelkrone	73
7.3.2	Rohr-Konstruktion	97
7.3.3	Schadensfallanalyse	106

8	Fertigungsanalyse.....	109
8.1	Fertigungsanalyse Synera.....	114
8.2	Fertigungsanalyse 3D-Spark	118
9	Diskussion	122
10	Fazit	126
11	Ausblick	127
12	Literaturverzeichnis.....	128
13	Anhang	130
13.1	Node Bibliothek	130
13.2	Parametrisierungs-Tabellen.....	133

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
CAD	Computer Aided Design
BESO	Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
ESO	Evolutionary Structural Optimization
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
RAMP	Rational Approximation of Material Properties
3D	Dreidimensional
DS	Design Space
NDS	Non Design Space
ADT	Additive Design Toolkit
AESO	Algorithm for Addition
AM	Additive Manufacturing

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1 Low Code Anwendungsablauf</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 2 Synera Beispiel.....</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 3 Topologieoptimierung-Ablauf</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 4 Fahrradkurbel DS/NDS.....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 5 Fahrradkurbel FEA</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 6 Ablauf einer mathematischen Optimierung (Sauer, 2018)</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 7 Auswirkungen Änderung der Designvariable A und B (Harzheim, 2014)</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 8 Beispiel Synera OptiStruct Optimierung.....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 9 Checkerboards (Lange & Emmelmann, 2021).....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 10 Mesh Dependence (Lange & Emmelmann, 2021)</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 11 Local Minima (Lange & Emmelmann, 2021).....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 12 Fräsen Schema https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-cnc-machining/ besucht am 04.08.24.....</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 13 Frästeil Beispiel https://www.3dnatives.com/de/interview-amendate-080920181/ besucht am 24.04.2024</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 14 Guss Prozesskette</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 15 MIM Prozesskette https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-MIM-process-45_fig1_278414405 Besucht am 04.08.24.....</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 16 Topologisch optimiertes Bauteil https://www.3dbavaria.com/3d-druck-nachhaltigkeit-bauteile/ besucht am 10.09.24.....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 17 Überhangsschema https://www.raise3d.com/academy/when-and-how-to-use-3d-printed-support-structures/ besucht am 04.08.24</i>	<i>37</i>

<i>Abbildung 18 3D Druck Design Dreieck (Gebhardt, et al., 2019)</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 19 LPBF Prozess 20https://www.teilefabrik.de/technologien/lpbf-technologie besucht am 21.07.2024</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 21 MEX Prozess https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-material-extrusion-additive-manufacturing_fig1_366627654 besucht am 25.06.2024</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 22 CAD Inventor Bsp. https://3d-print-solutions.de/cad/ besucht am 13.04.2024</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 23 Synera Workflow</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 24 Solid Part Node (HxGN) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan ..</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 25 Synera Interface Node (HxGN) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 26 Synera Construct Model Node (HxGN) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan.....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 27 Synera Topology Optimization Node (HxGN) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 28 Synera AM Node und Casting Node (HxGN) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 29 Synera Beispiel Workflow, eigene Darstellung</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 30 Synera Solid Mesh Node (HM) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 31 Synera Solid Part Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 32 Synera Construct Model Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>53</i>

<i>Abbildung 33 Synera OptiStruct FEA Solver Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan.....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 34 Synera Solid Topology Variable Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan.....</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 35 Synera OptiStruct Optimizer Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 36 Syner Result Isomesh Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 37 Synera FEA Objective Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 38 Synera FEA Constraint Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 39 Gabelkrone/Zeichnung</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 40 Gabelkrone Lasten</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 41 Gabelkrone FEA.....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 42 Rohrflansch Zeichnung und Lasten</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 43 Vereinfachter Workflow Altair OptiStruct.....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 44 Vereinfachter Workflow Hexagon Emendate</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 45 Fahrradkurbel Zeichnung und Lasten</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 46 Altair OptiStruct eigenes Beispiel</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 47 Altair OptiStruct Orientierung variiert, eigenes Beispiel</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 48 Gabelkrone DS und FEA.....</i>	<i>73</i>
<i>Abbildung 49 OptiStruct Optimierungsbeispiel Y Orientierung</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 50 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit 1</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 51 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit 2</i>	<i>75</i>

<i>Abbildung 52 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit Volumen 0,12..</i>	76
<i>Abbildung 53 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit Volumen 0,08..</i>	77
<i>Abbildung 54 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit SIMP Ergebnis</i>	78
<i>Abbildung 55 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit SIMP Ergebnis Member Size Anpassung</i>	79
<i>Abbildung 56 OptiStruct Optimierung RAMP</i>	79
<i>Abbildung 57 OptiStruct Optimierung SIMP Steifigkeitsoptimiert.....</i>	81
<i>Abbildung 58 Nachbearbeitungsdurchlauf</i>	82
<i>Abbildung 59 AM Hexagon Emendate Y Orientierung.....</i>	83
<i>Abbildung 60 Hexagon Emendate Z-Orientierung High</i>	85
<i>Abbildung 61 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 1.....</i>	85
<i>Abbildung 62 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 2.....</i>	85
<i>Abbildung 63 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 3.....</i>	86
<i>Abbildung 64 Hexagon Emendate AM Optimierung</i>	87
<i>Abbildung 65 OptiStruct Guss</i>	88
<i>Abbildung 66 Guss Schema</i>	89
<i>Abbildung 67 OptiStruct Guss "no holes" off.....</i>	89
<i>Abbildung 68 SIMP Volumen Guss</i>	90
<i>Abbildung 70 SIMP Steifigkeit Guss</i>	91
<i>Abbildung 70 OptiStruct Guss_no holes.....</i>	91
<i>Abbildung 71 Guss Schema Hexagon Emendate</i>	92

<i>Abbildung 72 Optimierungs Prozess Hexagon Emendate.....</i>	<i>92</i>
<i>Abbildung 73 Gabelkrone Casting; Max Disp 0,158mm (neu), 0,0867mm (alt); Masse 0,74 Kg</i>	<i>94</i>
<i>Abbildung 74 Rohrflansch FEA</i>	<i>97</i>
<i>Abbildung 75 OptiStruct Rohrflansch Beispiel Optimierung AM</i>	<i>98</i>
<i>Abbildung 76 OptiStruct AM Optimierung</i>	<i>100</i>
<i>Abbildung 77 Hexagon Emendate Auflösungsfehler</i>	<i>100</i>
<i>Abbildung 78 Hexagon Emendate FEA.....</i>	<i>101</i>
<i>Abbildung 79 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 1.....</i>	<i>102</i>
<i>Abbildung 80 Hexagon Emendate, Optimierungsfehler 2.....</i>	<i>103</i>
<i>Abbildung 81 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 4.....</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 82 Hexagon Emendate Optimierungsfehlerkette.....</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 83 Schadensanalyse Hexagon Emendate</i>	<i>106</i>
<i>Abbildung 84 Schadensanalyse Altair OptiStruct</i>	<i>107</i>
<i>Abbildung 85 Hexagon Emendate AM, Support red. Medium</i>	<i>112</i>
<i>Abbildung 86 OptiStruct Penalty Medium SIMP</i>	<i>112</i>
<i>Abbildung 87 Fertigungsanalyse Tools Syner, Screenshot Synera, Version Judicious Juracan</i>	<i>113</i>
<i>Abbildung 88 ADT Nodes Synera, Screenshot Judicious Juracan</i>	<i>114</i>
<i>Abbildung 89 Emendate AM Stützstrukturen/Voxel Volumen.....</i>	<i>115</i>
<i>Abbildung 90 OptiStruct AM Stützstrukturen/Voxel Volumen</i>	<i>116</i>

<i>Abbildung 91 Emendate AM Mesh Angle</i>	<i>116</i>
<i>Abbildung 92 Altair OptiStruct Mesh Angle</i>	<i>117</i>
<i>Abbildung 94 Emendate AM Feature Thickness.....</i>	<i>117</i>
<i>Abbildung 94 Altair OptiStruct Feature Thickness</i>	<i>117</i>
<i>Abbildung 96 OptStruct Feature Distance.....</i>	<i>118</i>
<i>Abbildung 96 Emendate AM Feature Distance/ Distanz Analyse</i>	<i>118</i>
<i>Abbildung 97 Gabelkrone 3D Spark Altair OptiStruct.....</i>	<i>120</i>
<i>Abbildung 98 Gabelkrone 3D Spark Hexagon Emendate</i>	<i>120</i>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Werkstoffeigenschaften Gabelkrone	61
Tabelle 2 Werkstoffeigenschaften Rohrflansch.....	63
Tabelle 3 Constraints und Objectives Fahrradkurbel	69
Tabelle 4 Gabelkrone Ergebnisse additive Fertigung.....	95
Tabelle 5 Gabelkrone Ergebnisse Guss	95
Tabelle 6 Gabelkrone Schadensanalyse neue FEA Werte.....	108
Tabelle 7 Ergebniszusammenfassung Gabelkrone.....	109
Tabelle 8 Ergebniszusammenfassung Rohrflansch	111
Tabelle 9 Gabelkrone Fertigungsanalyse	121

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich die Topologieoptimierung zu einem immer wichtiger werdenden Werkzeug im Ingenieurwesen entwickelt. Beim Design von Bauteilen hilft sie, die Geometrien und Strukturen effizienter und leistungsfähiger zu gestalten und damit den Materialeinsatz zu minimieren, ohne dabei die strukturelle Integrität zu beeinträchtigen. Durch den Einsatz komplexer Algorithmen und fortschrittlicher Simulationsmethoden können Ingenieure Bauteile entwerfen, die nicht nur leichter und kostengünstiger, sondern auch funktional optimiert sind. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird in einer Low-Code-Programmierungsumgebung ein umfassender Vergleich zwischen den zwei Topologieoptimierungs-Solvern von Hexagon Emendate und Altair OptiStruct vorgenommen. Synera, eine Low-Code-Programmierungsumgebung, ist ein neuer Ansatz im Ingenieurwesen, der Zyklus- und Konstruktionszeiten in der Entwicklung reduzieren soll. Der Knackpunkt von Synera ist die Zusammenführung verschiedener Funktionen diverser Softwarehersteller. Das Besondere ist, dass nicht mehr, wie üblich, über aufwendige 3D-Modellierung ein Bauteil konstruiert wird, sondern eine Art Wurzelstruktur mit einer Parametrisierung aufgebaut wird, die alle relevanten Eigenschaften des Zielbauteils beinhaltet. Diese Eigenschaften schaffen die Rahmenbedingungen für ein automatisch generiertes Bauteil, welches normale Konstruktionsprojekte in Zeit- und Arbeitsaufwand unterbieten soll. Die beiden Mechanismen, die hier genauer betrachtet werden sollen, kommen aus dem Hause Hexagon und Altair und arbeiten mit sowohl üblichen als auch neueren Ansätzen. Diese Ansätze ermöglichen es, Bauteile leichter, stabiler und ggf. nachhaltiger zu gestalten. Beide Solver sollen dabei unter Berücksichtigung verschiedener konventioneller Fertigungsverfahren, aber auch hinsichtlich der additiven Fertigung getestet und anhand von drei verschiedenen Use Cases auf die Probe gestellt werden. Im Laufe dieser Masterarbeit werden zunächst die Fachgebiete mit den theoretischen Hintergründen geklärt. Es werden die Fertigungstechnologien Fräsen, Gießen, MIM und besonders die additive Fertigung besprochen und auf die Fertigungsrestriktionen der jeweiligen Verfahren eingegangen. So soll schließlich eine Diskussion über die jeweiligen Ergebnisse ermöglicht und ein Ausblick über zukünftige Möglichkeiten und Potenziale gegeben werden.

2 Motivation

Diese Arbeit zielt darauf ab, Wissen zu erweitern, Innovation zu fördern und die Bauteilentwicklung zu verbessern. Synera bietet dabei einen Ansatz, der im Maschinenbaustudium so nicht gelehrt wird. Mithilfe der Low-Code-Umgebung entsteht ein Workflow (in Synera als Parametrisierung bezeichnet), der viele traditionelle Konstruktionsschritte überflüssig macht. In herkömmlichen Projekten beginnt die Bauteilentwicklung in der Regel mit einem Entwurf per Hand, der anschließend aufwendig in eine CAD-Software übertragen und mit allen wichtigen Details versehen wird. Um das Modell zu testen, muss es in eine dafür geeignete Finite-Elemente-Analyse (FEA)-Software übertragen werden. Oft stellt sich jedoch heraus, dass das Bauteil den Anforderungen nicht standhält, woraufhin das CAD-Modell angepasst und der gesamte Prozess erneut durchlaufen werden muss. Dieser iterative Ansatz ist Ingenieuren und Studierenden wohlbekannt und erfordert nicht nur viel Zeit, sondern auch Geduld. Nicht selten entstehen dabei die allseits bekannten und humorvoll benannten Versionsdateien wie „BauteilV1“, „BauteilV2“, „BauteilV3.3_final“ bis hin zu „BauteilV55.5_FinalFinal_endgültig“. Dieser hohe Zeit- und Arbeitsaufwand, kombiniert mit dem notwendigen Fachwissen, macht die Bauteilentwicklung kostenintensiv. Hier kann Synera eine wesentliche Reduzierung dieses Aufwands ermöglichen. Durch automatisierte Abläufe (Workflows) lassen sich viele der einzelnen Prozessschritte effizient übernehmen. Kleinste Anpassungen in den Randbedingungen oder der Geometrie können unmittelbar auf das gesamte Modell übertragen werden, ohne dass Verknüpfungen zerstört oder Fehlermeldungen generiert werden. Dieses Werkzeug ermöglicht es Ingenieuren, ihre Kreativität und ihr Wissen für die erfolgreiche und effiziente Entwicklung von Bauteilen einzusetzen.

3 Softwaregrundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dargestellt, die für das Verständnis dieser Masterarbeit von zentraler Bedeutung sind. Das Ziel besteht darin, die relevanten Konzepte, Definitionen und Fachbegriffe – insbesondere im Zusammenhang mit der Topologieoptimierung, konventioneller und der additiven Fertigung – zu erläutern und so eine fundierte Basis für die folgenden Ausführungen zu schaffen. Dies soll gewährleisten, dass auch Leserinnen und Leser, die mit dem Thema nicht im Detail vertraut sind, die nachfolgenden Kapitel nachvollziehen können.

3.1 Low-Code Programmierung

Um ein Verständnis für die verwendete Software zu entwickeln, wird in diesem Abschnitt der Begriff der Low-Code-Programmierungsumgebungen sowie deren spezifische Vorteile für Ingenieure in der Konstruktionstechnik erläutert. Im weiteren Verlauf wird zur Vereinfachung die Abkürzung "LCAP" (engl. *Low-Code Application Platform*) verwendet.

Bei LCAPs handelt es sich um einen Ansatz zur Vereinfachung des traditionellen Programmierens. Statt eines zeitintensiven, zeilenbasierten Codes, der in der Regel aus ein paar wenigen bis Millionen Zeilen bestehen kann, wird hier ein visueller Block-Ansatz verfolgt. Dabei werden sogenannte Nodes von den Anbietern aufwendig programmiert und mit speziellen Funktionen versehen. Der Begriff Nodes, zu Deutsch Knoten, beschreibt die Eigenschaften der Blöcke. Sie werden mit Threads, also Fäden verbunden und bilden so ein funktionierendes, zusammenarbeitendes Netzwerk, ab, ähnlich dem neuronalen Netzwerk von Neuronen und Synapsen im Gehirn der Menschen. Diese Nodes weisen unterschiedlichste Eigenschaften auf. Sie sind so programmiert, dass sie bestimmte Aufgaben erfüllen und mit bestimmten anderen Nodes zusammen arbeiten oder kommunizieren können, um Ergebnisse zu liefern. Man könnte es mit einem Puzzle gleichsetzen. Nicht jeder Node funktioniert mit jedem Node, sondern hat vorgegebene Partner. Diese liefern Daten, die für die weitere

Verarbeitung notwendig sind. In der folgenden Abbildung ist ein vereinfachtes Beispiel aufgeführt, um die Funktionsweise von Nodes und Workflows zu visualisieren.

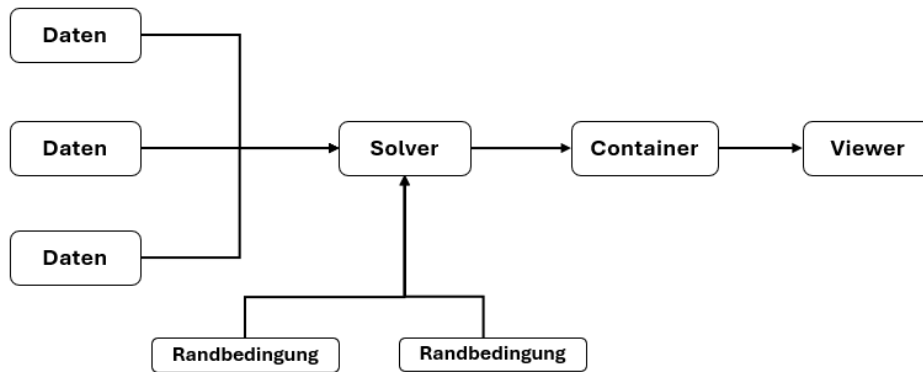


Abbildung 1 Low Code Anwendungsablauf

Die Grundlage für den Workflow liefern hier die Daten. Diese Daten können alle möglichen Informationen enthalten. Im Ingenieurbereich wären dies zum Beispiel Materialeigenschaften, Geometrien, Toleranzen, Lastfälle oder Ähnliches. Zusätzlich zu den benötigten Daten müssen noch Randbedingungen, oft in Fachliteratur auch auf Englisch als „Constraints“ beschrieben, eingebracht werden. Solche Randbedingungen sind Restriktionen und Zielvorgaben, die das Ergebnis erfüllen muss. Die Daten und Randbedingungen werden in einem „Solver“ zusammengeführt und verarbeitet. Die verarbeiteten Daten und Randbedingungen werden von dem Solver dann als Ergebnis weitergegeben, an einen Container. Der Container dient dazu die Daten in einem vorgegebenen Format für die Weiterverarbeitung zu speichern. Zuletzt folgt, zumindest im Fall von Synera noch ein Viewer. Dieser dient lediglich der Visualisierung der Zwischen- oder Endergebnisse. Das kann besonders sinnvoll für Optimierungsabläufe sein. Anhand der Visualisierung kann gut beurteilt werden, ob die Ergebnisse in den

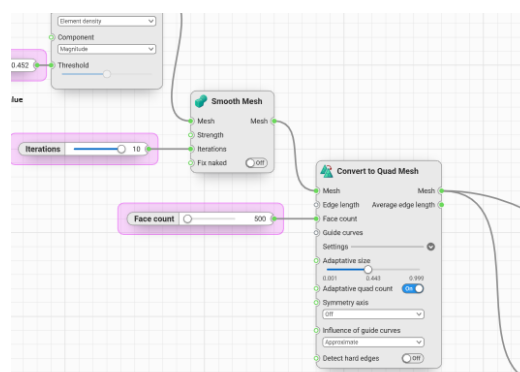


Abbildung 2 Synera Beispiel

Zwischenschritten sinnig sind oder die Parameter angepasst werden müssen. Wie ein Workflow in der Praxis aussieht, ist sehr abhängig von der verwendeten Software. Manche sind aufgebaut wie Puzzle, die ineinander „gesteckt“ werden, oder auch wie in Synera mit frei liegenden Knotenpunkten, verbunden durch sogenannte „threads“, zu Deutsch Fäden, welche abhängig von der Komplexität schnell unübersichtlich wirken können.

Der Vorteil eines solchen Ansatzes ist auf den ersten Blick nicht so leicht erkennbar, da es erst so wirkt als müsse man diese Workflows immer wieder neu aufbauen, für jedes einzelne Teil. Daher hier ein kurzes Beispiel aus dem klassischen Maschinenbaustudium.

Jeder Maschinenbaustudent wird im Laufe des Studiums irgendwann eine Parametrisierung vornehmen müssen, um ein Bauteil mit Abhängigkeiten und Parametern zu versehen. Diese Parametrisierung ermöglicht es, einzelne Maße anzupassen, ohne dabei befürchten zu müssen, dass die Software Fehlermeldungen ausgibt, weil die Abhängigkeiten der eingebrachten Geometrien nicht mehr funktionieren.

Angenommen, man möchte die Länge einer extrudierten Fläche anpassen – auf den ersten Blick eine einfache Änderung. Doch diese Änderung kann dazu führen, dass abhängige Geometrien, wie Bohrungen oder Aussparungen, die ursprünglich auf dieser Fläche platziert wurden, nicht mehr an den richtigen Stellen liegen oder ihre Abstände nicht mehr den Vorgaben entsprechen. Die Software gibt in solchen Fällen oft Fehlermeldungen aus, da die ursprünglich festgelegten Abhängigkeiten zwischen den Geometrien nicht mehr gültig sind. Das Bauteil wird dadurch unbrauchbar und "ergibt plötzlich keinen Sinn" mehr, da die ursprüngliche Konstruktionslogik durch die Änderung zerstört wurde.

Man kann sich also LCAPs für die Konstruktion vorstellen als Parametrisierung mit einer deutlich höheren Flexibilität und Sicherheit für den weiteren Prozess. Einfache Teile wie Schrauben werden über die Workflows von Anfang an so parametrisiert, dass sich Änderungen der Geometrien oder gar der Position in Abhängigkeit des restlichen Bauteils leichter vornehmen lassen und alles darauf folgende direkt angepasst wird, ohne ein Eingreifen zu erfordern. Anhand des Beispiels einer Topologie Optimierung ist dies nochmal deutlicher. Der Workflow für eben jene ist, einmal aufgebaut, anwendbar auf fast alle CAD Modelle die am Beginn des Workflows eingespeist werden. Lediglich Position und Dimensionierung der Lasten oder auch Materialeigenschaften können mit ein paar einfachen Klicks angepasst werden und

das neue Bauteil optimiert werden. Damit spart man sich den immer wiederkehrenden Prozess Bauteile komplett neu definieren zu müssen und die damit auch verbundenen Aufwände.

3.2 Topologie Optimierung

Bevor spezifischer auf die Topologieoptimierung, die dazugehörigen Strategien und Methoden eingegangen wird, wird im Folgenden zunächst erklärt, wofür die Topologieoptimierung sinnvoll ist, wie sie in ihrem Ablauf aussieht und was Topologieoptimierung überhaupt ist. Angefangen mit der Frage:

Was bedeutet Topologie? Nach Sauer (Sauer, 2018), ist die Topologie wie folgt beschrieben, „Topologie ist die Lehre von der Lage und der Anordnung geometrischer Gebilde im Raum.“

Bezogen auf die Konstruktion von Bauteilen bedeutet dies, dass Topologie die Lehre davon ist, auf welche Art und Weise Strukturen bzw. Geometrien innerhalb jenes Bauteils angeordnet und und/oder dimensioniert sind. Das Ziel der Topologieoptimierung ist damit die Optimierung der Lage und Anordnung vorhandenen Materials in einem bestimmten vorgegebenen Raum. Die grundlegenden Prinzipien der Topologie aus der Mathematik bieten hier die Basis.

Die Topologieoptimierung dient der bewussten Beeinflussung der Geometrie und Struktur eines Bauteils, um eben jene für festgelegte Rahmenbedingungen zu optimieren und so am Ende ein ggf. leistungsfähigeres, gar leichteres und effizienteres Bauteil zu erhalten. Genauer wird hierbei die Materialverteilung in einem vorgegebenen Bauteil auf bestimmte Zielfunktionen hin optimiert. Betrachtet man die Natur, so finden sich selten Strukturen, die, wie es im Leben schon lange Alltag ist, aus einem Vollmaterial bestehen bzw. massiv sind. Ein Beispiel ist der menschliche Knochen. Dieser ist trotz seiner hohlen inneren Struktur über Jahrzehnte hinweg extrem belastbar und deutlich leichter als eine vergleichbare Struktur mit Vollmaterial. Diese Art der Ausbildung von massiven Strukturen ist oft höchst ineffizient und würde in der Natur kaum einen Sinn machen, sie würde schlichtweg alles zu schwer machen. Daher scheint diese Disziplin auch für die Anwendung im Ingenieurwesen von großer Bedeutung.

Um das Potential zu verdeutlichen, folgt ein kleines Rechenbeispiel aus dem Buch „Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen“, welches für diese Arbeit interessant ist.

„...Schafft man es durch Optimierung beispielsweise das Gewicht von Verbrennungsmotor-Fahrzeugen zu senken, sodass der Kraftstoffverbrauch um 1% sinkt, so hat man allein in Deutschland bei 60 Millionen Fahrzeugen mit einer Laufleistung von jeweils 20.000 km pro Jahr und einem durchschnittlichen Verbrauch von 6 Litern auf 100 km eine Ersparnis von 720.000.000 Liter pro Jahr; das sind mindestens 24.000 Tanklastwagenfahrten weniger“ (Schumacher, 2020). Nimmt man für dieses Beispiel eine Faustformel von etwa 0,3 Liter Benzin pro eingesparten 100 Kilogramm an, müssten lediglich 20 Kilogramm an Masse eingespart werden, um den Verbrauch um 1% zu senken. Anhand dieses Beispiels wird das enorme Potential der Topologie Optimierung für das Ingenieurwesen, aber auch für den Alltag deutlich

Wie genau ein Optimierung abläuft, hängt stark von dem verwendeten Verfahren ab. Diese Verfahren werden nach einer kurzen Einführung in den Ablauf, aus Sicht des Anwenders, im Folgenden, erläutert. In Abbildung 1 ist eine grobe Übersicht zu sehen.

Zunächst muss eine Geometrie definiert werden, die als Start-Modell dient. Diese wird unterteilt, in einen Design- und einen Nicht-Design-Bereich. Die Bereiche dienen dazu, genau vorzugeben, welche der Geometrien von den verwendeten Algorithmen angepasst werden dürfen und welche nicht verändert werden dürfen. Nicht-Design-Bereiche (siehe Abbildung 3) in grau) können zum Beispiel Kontaktflächen, Bohrungen oder ähnliches sein. Sprich, funktionskritische Geometrien. Design-Bereiche (siehe Abbildung 4 in blau) sind in der Regel Geometrien, die „nicht kritisch“ für die Funktionalität sind, sondern zum Beispiel Lasten weiterleiten an die Lagerungspunkte, die meist auch die höchsten Spannungen aufnehmen müssen.

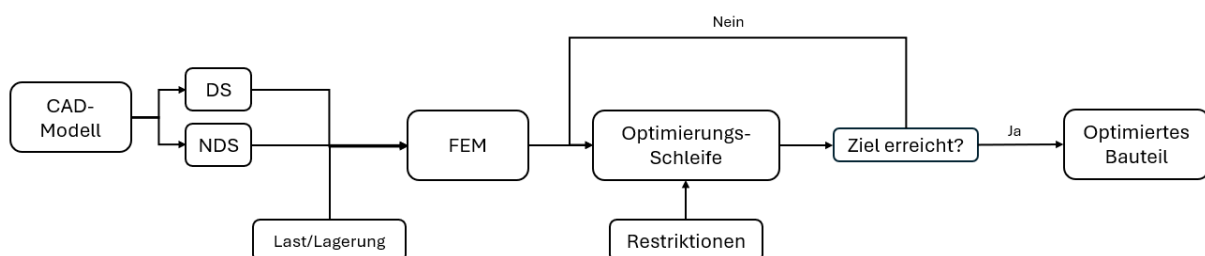


Abbildung 3 Topologieoptimierung-Ablauf

Zur Vereinfachung wird im folgenden Nicht-Design-Bereich als NDS (engl. Non-Design-Space) und Design-Bereich als DS (engl. Design-Space) bezeichnet.

Nachdem der NDS und DS definiert wurden, müssen Randbedingungen wie Lasten, Lager, Materialeigenschaften oder auch Einsatztemperatur definiert werden. Diese beeinflussen maßgeblich den weiteren Verlauf der Optimierung, da sie durch ihre Art, Lage und Größe einen

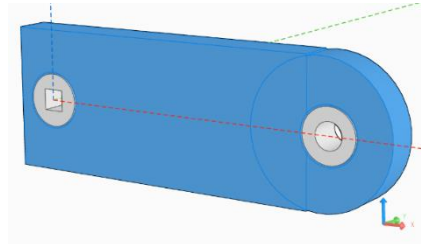


Abbildung 4 Fahrradkurbel DS/NDS

direkten Einfluss auf die Spannungsverläufe innerhalb des Bauteils haben und damit auch direkt auf die Ausbildung der späteren Strukturen durch die Optimierung. Nach der Festlegung der Randbedingungen erfolgt eine FEM-Analyse. Diese ist von entscheidender Bedeutung und dient als Hauptwerkzeug der Strukturoptimierung. Sie zeigt auf, in welchen Bereichen des Bauteils die mechanischen Spannungen in welcher Intensität verlaufen und welche Materialbereiche lediglich ornamental und somit funktional nicht notwendig sind. Wichtig, damit ist der DS gemeint und nicht der NDS, der als funktionskritisch betrachtet wird.

In der FEM-Analyse wird das Bauteil in eine endliche Menge von finiten Elementen unterteilt, die dann einzeln berechnet werden müssen. Je nach Größe und Form der Elemente, Größe und Komplexität des Bauteils, bedeutet dies zigtausende bis Millionen einzelne Berechnungen. Die Spannungsverteilungen in den einzelnen Abschnitten des Bauteils können hier nicht mehr analytisch berechnet werden (Sauer, 2018). Sie wären schlichtweg zu komplex. Ein Beispiel eines in FEM Bauteils, mit der typischen Element-Aufteilung und den eingefärbten Spannungsverläufen ist in Abbildung 5 zu sehen.

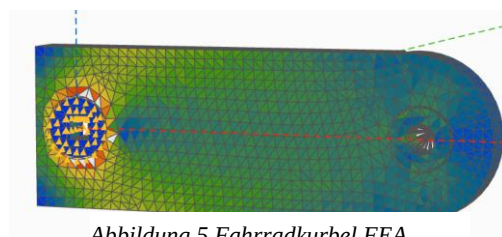


Abbildung 5 Fahrradkurbel FEA

3.2.1 Mathematische Optimierungs-Methoden RAMP und SIMP

Die mathematischen Methoden der Optimierung werden nochmal unterteilt in den Homogenisierung-Ansatz, den SIMP-Ansatz (Solid Isotropic Material with Penalization), den RAMP Ansatz (Rational Approximation of Material Properties) welcher eine Weiterentwicklung des Homogenisierungs-Ansatzes ist und weitere. Relevant für diese Arbeit sind der SIMP-Ansatz und der RAMP Ansatz, der eine alternative Formulierung des SIMP-Ansatzes darstellt. Beide können in einem der hier verwendeten Optimierungssolver eingesetzt werden. Wobei der ursprüngliche SIMP Ansatz die weiter verbreitete Optimierungsmethode ist. Der Homogenisierungs-Ansatz ist eher für heterogene Materialeigenschaften geeignet, da er komplexer ist. SIMP gilt in der Regel als einfacher und effizienter. Der Ablauf einer

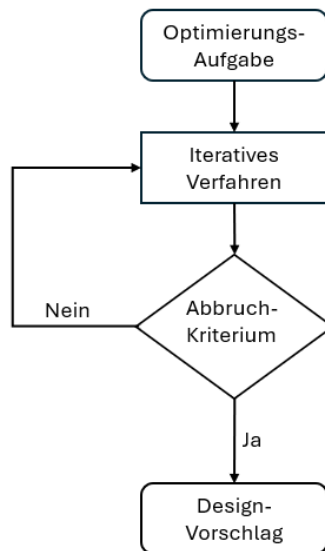


Abbildung 6 Ablauf einer mathematischen Optimierung (Sauer, 2018)

mathematischen Optimierung, in Abbildung 4 (Sauer, 2018), hier mit Altair OptiStruct, läuft, wie auch im Homogenisierungs-Ansatz, iterativ. Sprich die Geometrie wird in mehreren Schritten bzw. Iterationen angepasst, bis hin zum theoretischen Optimum, bzw. bis hin zur festgelegten Zahl der Iterationen.

In der hier verwendeten Software werden in der Regel sechzig bis achtzig Iterationsschritte für ein gutes Ergebnis genutzt. Das ist aber natürlich vom Anwender und dem Anwendungsfall abhängig.

Für diese Gruppe der Optimierungen wird eine Zielfunktion formuliert, die unter Berücksichtigung von zuvor definierten Restriktionen minimiert werden soll (Harzheim, 2014). Solche Restriktionen können das Materialvolumen, die maximal zulässige Spannung für das Material oder auch Fertigungsrestriktionen sein. Ein Beispiel hierfür ist der minimale Winkel von 45° der ausgebildeten Strukturen für die Fertigung im 3D Druck entlang der Druckrichtung. Dies ist der kleinste Winkel, der theoretisch noch zulässt, dass keine Stützstrukturen beim Druck verwendet werden müssen. Dazu mehr im Kapitel 5 Additive Fertigung.

Das Bauteil wird, wie zuvor bereits beschrieben, durch Diskretisieren in eine endliche Menge von finiten Elementen i unterteilt. Das E-Modul eines jeden Elements wird hier über die auf 1 genormte Dichte ρ gesteuert.

Die variierbare Dichte bewegt sich bei diesem Ansatz zwischen 0 und 1. Wobei 0, bzw. nahe Null den minimalsten Wert des E-Moduls darstellen, also dort, wo kein Material sein soll und 1 den maximalen Wert des E-Moduls. Sprich der Bereich an dem Vollmaterial vorhanden sein soll.

Dabei gibt es im isotropen Materialfall eine und im orthotropen (Eine Form der Anisotropie mit drei orthogonalen Hauptachsen) Materialfall mehrere Designvariablen. Im spezifischen Anwendungsfall der SIMP- und RAMP-Methode, wird die Dichte als Designvariable verwendet.

Für den Anwendungsfall von Altair OptiStruct, das als einer der Solver von Synera verwendet wird, wurde die mittlere Nachgiebigkeit C unter einer Füllgradrestriktion minimiert:

$\min C,$

sodass

$$v \leq v^U$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U ; \quad i \in I_E$$

Das bedeutet, der Füllgrad v des Material bewegt sich unterhalb des maximalen Wertes v^U , dem Vollmaterial. Der Füllgrad wird vor der Optimierung festgelegt und bestimmt wie viel des Design Bereiches mit Material befüllt werden soll. Hier kann ausgetestet werden wie viel Füllgrad Sinn macht. In der Regel wird zwischen 30 und 50 Prozent begonnen und der Wert

dann iterativ verändert. Die Designvariable x_i ist hier zum Beispiel die Dichte. I_E repräsentiert die Menge aller Elemente, genauer die zuvor erläuterten finiten Elemente, die sich in dem Design Bereich, also dem variierbarem Bereich befinden (Harzheim, 2014).

Für den Zusammenhang zwischen Dichte und E-Modul können, wie zuvor beschrieben, zwei Ansätze verwendet werden. Beim mathematischen Ansatz wird ein als isotrop, die Werkstoffeigenschaften sind in alle Richtungen gleich, betrachtetes Material als Grundlage und ein empirischer Ansatz verwendet. Ein Isotropes Material besitzt mechanische Eigenschaften, die in allen Richtungen gleich sind. Zur Klarstellung, SIMP und RAMP sind mathematische Methoden, bedienen sich jedoch auch des empirischen Charakters, da die Designvariablen mit Hilfe von Erfahrungswerten und heuristischen Annahmen justiert werden, um bessere Strukturen zu erzeugen. Der empirische SKO Ansatz hingegen, simuliert biologische Wachstumsregeln und basiert auf Iterationen und biologisch inspirierten Regeln.

Der Zusammenhang zwischen E-Modul und Dichte ergibt sich aus folgendem Potenzsatz:

$$x_i = \frac{\rho_i}{\rho_i^0}$$

$$\frac{E_i}{E_i^0} = x_i^p; \quad p > 1$$

Hierbei sind E_i^0 und ρ_i^0 das E-Modul und die Dichte des massiven Materials, x_i die Designvariable und p der Exponent. In der unteren Abbildung 7 A erkennt man, dass mit steigendem Exponenten, die Änderung der durch x_i herbeigeführten Steifigkeit in den Zwischenwerten von 0 bis 1 nur minimal ist und erst bei einem Wert von x_i Nahe 1 die Steifigkeit wieder stärker zunimmt.

Harzheim hat es passend ausgedrückt. „Man bekommt anschaulich gesprochen wenig Steifigkeit für sein Geld.“ (Harzheim, 2014). Betrachtet man nun den Bereich B, so lässt sich leicht erkennen, dass hier bereits kleine Änderungen der Designvariable zu deutlicheren Änderungen der Steifigkeit führen. Andersherum, in Bereich A, führt dies nur zu geringen Änderungen in der Steifigkeit.

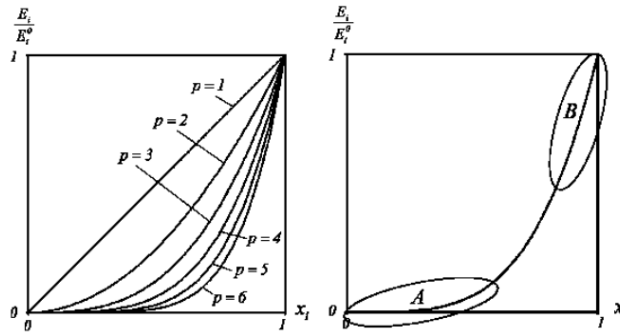


Abbildung 7 Auswirkungen Änderung der Designvariable A und B (Harzheim, 2014)

Der Potenzsatz drückt dadurch aus, dass Dichten nahe 0 und nahe 1 vorteilhafter sind und Dichten in den mittleren Bereichen eher vermieden werden sollten, da diese kaum Änderungen in der Steifigkeit bewirken.

Sprich eine Dichte im Bereich von, zum Beispiel $0,5 * x_i^U$, würde, je nach p -Wert, kaum einen Einfluss haben. Harzheim spricht von einem sogenannten „0-1 Design“. Sprich der Wert bewegt sich entweder nahe 0 oder nahe 1 und nicht dazwischen.

Als Alternative zu SIMP gibt es, wie oben bereits erwähnt, noch die RAMP Methode. Eine Art der Weiterentwicklung von SIMP. Diese nutzt statt einer Potenzfunktion, eine rationale Funktion um die Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Dichte zu modellieren (Lange & Emmelmann, 2021).

$$E(p_{des}) = E_{\min} + \frac{p_{des}}{1+n*p_{des}} * (E - E_{\min})$$

$E(p_{des})$ ist das effektive Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Design-Materialdichte p_{des} . E_o beschreibt das Elastizitätsmodul des festen Materials bei einer Dichte von $p = 1$. Während $E_{\min}$ der minimale Wert des Elastizitätsmoduls ist, der verhindert, dass leere Bereiche also Bereiche mit einer Dichte von $p = 0$ vollständig steif werden. Der Parameter n steuert wie die Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Dichte p modifiziert wird. Dabei führt ein kleinerer n -Wert zu einem weichen Übergang, bei dem die Materialeigenschaften

allmählich abnimmt, während die Dichte reduziert wird. Ein größerer Wert macht den Übergang schärfer, was bedeutet, dass das Material schneller von fest zu leer wechselt.

Zusammengefasst bedeutet dies für das Design, dass Bereiche mit mittlerer Dichte, die nur eine geringe Steifigkeitssteigerung bieten, für ein robustes Design weniger interessant sind. Solche Strukturen wären oft zu filigran und zu anspruchsvoll in der Herstellung. Daher sind, besonders beim SIMP-Verfahren (Solid Isotropic Material with Penalization), hauptsächlich die Dichtebereiche 0 und 1 von größerem Interesse, da hier klar entschieden wird, ob volles Material an der Stelle eines finiten Elements i vorhanden sein soll oder nicht. Diese klare Abgrenzung führt zu den charakteristischen Löchern in den Strukturen. Ausgehend von einem finiten Element i , bilden sich immer mehr Löcher an Stellen, wo kaum oder keine Spannungen vorhanden sind, und diese Löcher „vereinen“ sich zu größeren Hohlräumen. Nachdem ein Hohlraum entstanden ist, wird die Spannung in der neuen Struktur noch einmal überprüft und die Struktur ggf. angepasst. Dies geschieht solange, bis schließlich eine optimal angepasste Struktur entsteht, die den vorher definierten Lasten und Randbedingungen entspricht.

Im Gegensatz dazu ermöglicht die RAMP-Methode eine gleichmäßigere Anpassung der Steifigkeit über den gesamten Dichtebereich, was zu einer gleichmäßigeren Materialverteilung führt und die Konvexität des Lösungsraums verbessert. Dies kann zu stabileren und effizienteren Ergebnissen führen. Der Vorteil dieser Methodik gegenüber SIMP liegt in der Fähigkeit besonders komplexe Restriktionen wie für den 3D Druck die 45° besser einhalten zu können (Lange & Emmelmann, 2021).

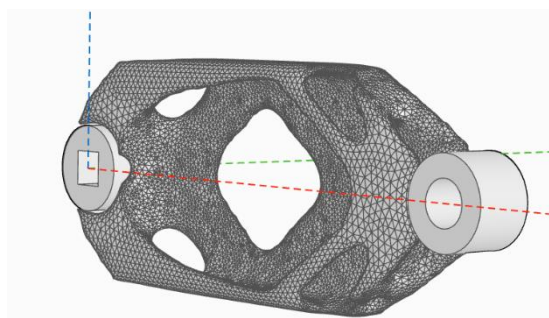


Abbildung 8 Beispiel Synera OptiStruct Optimierung

3.2.2 ESO/BESO/Hard-Kill Methode

Mit der ESO/BESO Methodik hat Hexagon mit dem Emendate-Solver einen weiteren, eher unüblichen und neueren Ansatz ausgewählt. Laut Hexagon selbst ähnelt der Algorithmus einem Hard-Kill Algorithmus. Um diese Methode zu verstehen wird im Folgenden die Funktionsweise für die ESO/BESO Methoden (Evolutionary Structural Optimization/Bi-Directional Structural Optimization) beschrieben. ESO und BESO sind evolutionäre empirische Methoden. ESO entfernt iterativ Material während BESO auch wieder Material hinzufügen kann. Da die ESO/BESO Methoden sich gewissen Hard-Kill Elementen bedienen, wird der Hard-Kill hier auch nicht separat beschrieben, sondern integriert in die Ausführung.

Wie schon bei der SIMP Methode wird bei ESO/BESO der Weg hin zum Optimum verfolgt, indem zunächst die einzelnen Finiten Elemente berechnet werden, welche die Spannungsverläufe aufzeigen. Diese Spannungsverläufe sind Indikatoren dafür, wo gegebenenfalls Material zu viel ist, bzw. ineffizient ist und wo es unbedingt benötigt wird. (Gonçalves, 2018). Als Maßstab dafür, ob mechanische Spannung innerhalb eines Elementes zu hoch oder zu niedrig ist, wird die zuvor festgelegte Referenzspannung verwendet. Für das Beispiel einer Aluminium Legierung nehmen wir hier eine maximale Spannung von $500 \frac{N}{mm^2}$ an. Die Spannung hängt immer von der verwendeten Legierung und der Art der Belastung ab. Diese Spannung würde dann auf die zu berechnende Elemente angewendet werden. Bezogen auf ESO gilt, dass die Spannungsbereiche, die dieser Referenzspannung nahekommen oder sogar überschreiten, als wichtig definiert werden und erhalten bleiben. Bereiche mit einer geringeren Spannung werden entfernt und können auch nicht wieder, wie bei SKO, mit einem geringeren E-Modul angenommen, als weich definiert, später wieder hinzugefügt werden. Die Dichte wird hier also nur mit den Werten 0, als nicht existent oder 1, als vorhanden angenommen. Daher ist die ESO Methode hinsichtlich des Charakters des „harten Entfernens“ auch als Hard Kill Methode bekannt (Lange & Emmelmann, 2021). Wurde Material entfernt, muss der Solver das Bauteil erneut durchrechnen, um die, sich neu ergebenden, Spannungsverläufe zu bestimmen. Nun ergibt sich mit ESO alleine Probleme, die in der Literatur als „starke Netzabhängigkeit der Lösungen und der Neigung zur Konvergenz zu lokalen Minima in Form von Schachbrettfehlern“ (Lange & Emmelmann, 2021) beschrieben wird. Die Probleme mit ESO werden in folgende drei Kategorien unterteilt.

1. Checkerboards

Das Problem der Schachbrettmuster tritt auf, wenn innerhalb der zu optimierenden Strukturen die einzelnen finiten Elemente, periodisch als effizient oder ineffizient bzw. als fest und leer durch den Algorithmus definiert werden. Dadurch entstehen Schachbrettartige Muster. Diese führen dazu, dass, in der Fertigung, kaum realisierbare Strukturen entstehen und das Design damit unbrauchbar wird.

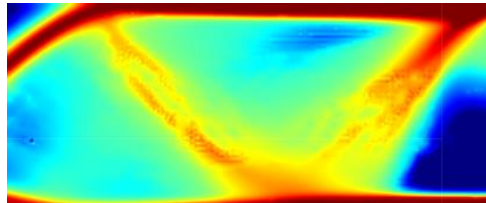


Abbildung 9 Checkerboards (Lange & Emmelmann, 2021)

2. Mesh Dependence

Lösungen mit ESO sind von der „Feinheit“ der Netze durch die Finiten Elemente abhängig. Das heißt, dass Optimierungen mit einem groben Feinheitsgrad in der Regel schlechtere Ergebnisse hervorbringen. Je feiner die Auflösung der Elemente, desto feiner wird auch die Optimierung. Dies bedeutet allerdings auch, dass die Optimierung länger und aufwändiger ist. Diese Netzabhängigkeit (siehe Abbildung 10) hat zur Folge, dass eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse schwieriger ist. Um saubere und nicht zu aufwendige Ergebnisse zu erzielen, muss also immer ein Kompromiss für die Auflösung gefunden werden.

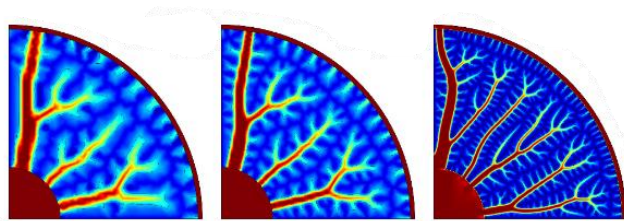


Abbildung 10 Mesh Dependence (Lange & Emmelmann, 2021)

3. Local minima

Der Algorithmus sucht innerhalb von bestimmten Suchfeldern, nach dem Optimum für eben dieses Suchfeld. Das Problem hier ist, dass für dieses Suchfeld das Optimum zwar stimmen mag, es allerdings in der globalen Betrachtung auf das gesamte Bauteil, nicht das Optimum der gesuchten Struktur ist. Man kann das mit dem sogenannten Tunnelblick gleichsetzen. Der Algorithmus versucht in diesem einen Suchfeld das Optimum zu finden und betrachtet dabei in diesem Moment gar nicht andere Bereiche die ggf. eine bessere Lösung für das Bauteil bieten würden. Als Beispiel betrachte man Abbildung 11 Links ist zu sehen wie der Algorithmus

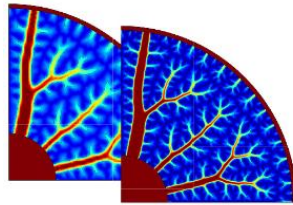


Abbildung 11 Local Minima (Lange & Emmelmann, 2021)

zunächst gröbere Optima betrachtet hat und dann mit jedem Optimum immer mehr in die Tiefe ging. Durch diese Vorgehensweise sind eben jene Lokale Minima entstanden (rechts), die zwar in ihrem Feld das Optimum darstellen, aber in globaler Betrachtung nicht das Optimum waren.

Ein weiteres Problem, ist das endgültige Löschen der Elemente. Zwar soll diese Vorgehensweise dafür sorgen, dass klar abgegrenzte Strukturen mit einer gleichmäßigen Spannungsverteilung erzielt werden. Doch ist gerade dies ein zweischneidiges Schwert. Eine Struktur, die zwar in einem bestimmten Suchfeld als ineffizient betrachtet und gelöscht wurde, hätte in globaler Betrachtung womöglich zu einem besserem Optimum führen können. Das hat zur Folge, dass unter Umständen Optimierungen nicht ganz das rechnerische Optimum erreichen können und Fehler entstehen.

Um diesem Problemen entgegen zu wirken und bessere Ergebnisse zu erreichen wurde die ESO Methode weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung ist bekannt als die BESO-Methode. Diese kombiniert ESO mit der AESO (Algorithm for Addition) und ist durch die Einführung von Filterschemas, aus der Bildbearbeitung, fähig die Netzabhängigkeit und Schachbrettfehler im Vorfeld zu verhindern. Durch den Zusatz von AESO, ist die BESO Methode in der Lage auch neues Material wieder hinzuzufügen. Dies ermöglicht es Strukturen, die ggf. nicht ausreichend stark für die vorhandene Last sind, mit neuem Material zu verstärken und die Spannungen innerhalb eben jener Struktur besser zu verteilen.

Der Zyklus wird solange durchlaufen bis die Spannungen in den angepassten Strukturen gleichmäßig verteilt sind und die vorgegebenen Restriktionen eingehalten werden (Sauer, 2018). In der Regel benötigt es zwischen 20-30 Iterationen für ein ausreichend scharfes Ergebnis. Das hängt jedoch von dem Anwendungsfall und der Komplexität der Lasten ab. Der Ansatz hat diverse Vorteile gegenüber den klassischen wie SIMP. Es entstehen besonders klare und eindeutig interpretierbare Strukturen mit einer guten Materialverteilung und es gibt keine „losen Enden“ wie man sie aus der SIMP Methode kennt.

Zusammengefasst, bedeutet es, dass zwar anfangs bei ESO/BESO ziemlich viel Material entfernt wird, jedoch dann auch überlastetes Material durch eine Verstärkung mit neuen Elementen um die belasteten Elemente herum entlastet wird. Durch das rigorose entfernen von ineffizientem Material ist es möglich besonders eindeutige und klar interpretierbare Strukturen zu erreichen die, durch die verwendeten Methoden zur Erweiterung von ESO, es ermöglichen optimierte Bauteile auch fertigbar zu gestalten.

4 Konventionelle Fertigungsverfahren

Im Folgenden werden verschiedene konventionelle Fertigungsverfahren, genauer das Fräsen, Gießen und MIM vorgestellt. Nach einer kurzen Beschreibung der einzelnen Verfahren werden die jeweiligen Fertigungsrestriktionen erörtert. Dieses Verständnis ist grundlegend, um die Optimierungen so zu gestalten, dass sie mit den jeweiligen Verfahren realisierbar sind.

4.1 Fräsen

In dem Buch „Fertigungstechnik“ (Fritz, 2012) wird das Fräsen wie folgt definiert: „Fräsen ist ein spanendes Fertigungsverfahren, das mit meist mehrzahnigen Werkzeugen bei kreisförmiger Schnittbewegung und senkrecht oder auch schräg zur Drehachse gerichteter Vorschubbewegung, nahezu beliebige geformte Werkstückflächen zu erzeugen vermag.“

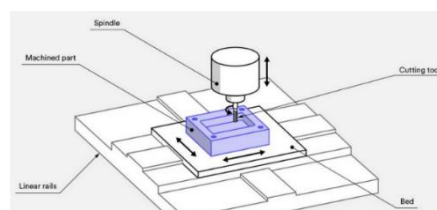


Abbildung 12 Fräsen Schema

<https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-cnc-machining/> besucht am 04.08.24

(Fritz, 2012). Das Fräsen (siehe Abbildung 13) ist somit ein abtragendes Verfahren, bei dem mithilfe verschiedener Werkzeuggeometrien das Ausgangsmaterial zu nahezu beliebigen Formen bearbeitet werden kann. Üblicherweise wird hierfür ein vorbereitetes 3D-Modell in ein maschinenkompatibles Format übertragen. Die CNC-Fräsmaschine berechnet daraufhin die Verfahrswege und schneidet das Bauteil aus einem Block aus Vollmaterial heraus. Dank der technologischen Entwicklung, über Jahrzehnte hinweg, ist es mittlerweile möglich, auch topologisch optimierte Bauteile präzise und kosteneffizient bis zu einem bestimmten Komplexitätsgrad zu fertigen. Besonders filigrane Strukturen lassen sich, in Abhängigkeit, von der Maschinenoptimierung und dem verwendeten Werkzeug mit hoher Präzision herstellen.

Trotz der Vielseitigkeit und Präzision des Fräsverfahrens gibt es auch signifikante Nachteile. Insbesondere hochkomplexe Geometrien erfordern große, mehrachsige Fräsmaschinen, die in der Anschaffung und im Betrieb sehr kostenintensiv sind. Sie benötigen geschultes Personal,



Abbildung 13 Frästeil Beispiel

<https://www.3dnatives.com/de/interview-amendate-080920181/>

besucht am 24.04.2024

das sich bestens mit diesen Maschinen auskennen und nur schwer zu ersetzen sind. Darüber hinaus ist das Verfahren materialintensiv, da das Bauteil aus einem Vollmaterialblock herausgearbeitet wird, was oft zu einem erheblichen Materialabfall führt. Will man beispielsweise ein Bauteil wie in Abbildung 13 fräsen, so müsste ein Block Vollmaterial mit dem gleichen Volumen genutzt werden um dieses Teil zu erreichen. Damit würde ein Großteil des Materials verschwendet werden.

Wie bei vielen anderen Fertigungsverfahren, unterliegt auch das Fräsen verschiedenen Beschränkungen, die die Herstellbarkeit von Bauteilen beeinflussen. Insbesondere im Kontext der Topologieoptimierung, stellt die Geometrie eine zentrale Einschränkung dar.

Die wichtigsten Fertigungsrestriktionen für das Fräsen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. **Hinterschnitte**

Hinterschnitte stellen beim Fräsen eine erhebliche Herausforderung dar, da sie oft vom Fräswerkzeug schwer oder gar nicht erreicht werden können. Dies liegt an den geometrischen Einschränkungen herkömmlicher Fräswerkzeuge, die meist geradlinig und rotationssymmetrisch arbeiten. Materialien, die von anderen Bereichen der Geometrie blockiert werden, können somit nicht entfernt werden, was die Fertigung komplexer Geometrien einschränkt.

2. **Wanddicken**

Aufgrund der hohen Kräfte, die während des Fräsvorgangs durch die Rotation des Werkzeugs entstehen, ist es schwierig, sehr dünne oder filigrane Strukturen präzise zu fräsen. Zwar ist die Herstellung dünner Wände prinzipiell möglich, jedoch besteht ein erhöhtes Risiko von Brüchen oder Verformungen. Um dem entgegenzuwirken, sollten bei der topologischen Optimierung Mindestwanddicken eingehalten werden. Empfohlene Wanddicken liegen in der Regel bei mindestens 0,5 bis 1 mm, abhängig vom Material und der spezifischen Anwendung. Theoretisch sind auch dünnere Wandstärken möglich, jedoch erfordert dies besonderes Knowhow und spezialisiertere Maschinen, was die Fertigungskosten in die Höhe treiben würde.

3. **Symmetrische Konturen**

Symmetrische Geometrien sind für das Fräsen besonders vorteilhaft, da sie die Komplexität der Verfahrswege reduzieren. Dies führt zu einem gleichmäßigen Materialabtrag, geringeren Maßtoleranzen und insgesamt kürzeren Bearbeitungszeiten, da die Maschine schneller und präziser arbeiten kann. Bei asymmetrischen oder stark organischen Strukturen erhöht sich hingegen die Komplexität des Fräsprozesses erheblich und damit auch die Bearbeitungsdauer.

4. **Schleifbare Querschnitte**

Um die erforderliche Oberflächenqualität von Bauteilen zu gewährleisten, ist oft eine Nachbearbeitung durch Schleifen notwendig. Bereiche, die schwer zugänglich sind, erschweren jedoch diesen Prozess erheblich. Analog zu den Einschränkungen bei

Hinterschnitten sollten Geometrien so gestaltet sein, dass sie auch für die Nachbearbeitung gut zugänglich sind, um eine gleichmäßige Oberflächenqualität zu gewährleisten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Fertigung topologisch optimierter Bauteile durch Fräsen darauf geachtet werden muss, dass die Geometrie den Bearbeitungsprozess nicht unnötig erschwert. Wie mit einer einfachen Suche im Internet nach topologisch optimierten Bauteilen zu sehen ist, erinnern die inneren Strukturen häufig an verzweigte, baumartige Formen, die nur schwer oder gar nicht ohne spezielle Werkzeuge fertigbar sind. Um eine effiziente Fertigung zu ermöglichen, sollten die Parameter entsprechend so gewählt werden, dass die resultierenden Strukturen einerseits eine ausreichende Mindestdicke aufweisen und andererseits genügend Abstand zu benachbarten Strukturen haben, um sowohl mit Fräs- als auch mit Schleifwerkzeugen bearbeitet werden zu können.

4.2 Gießen

Das Gießen ist ein altbewährtes Verfahren, dass nach wie vor in vielen Industrien zahlreiche Anwendungsgebiete findet. Es wurde seit seiner Einführung vor knapp siebentausend Jahren nahezu perfektioniert und stellt eines der Hauptfertigungsverfahren der heutigen Industrie dar. Der Prozess (siehe Abbildung 14) des Gießens beginnt mit der Vorbereitung einer Hälfte des Modells, das die Form des späteren Gussstücks repräsentiert. Dieses Modell wird in eine formbare Substanz wie Sand eingebettet, um die äußere Form zu gestalten. Anschließend wird ein Gießrahmen, auch Flasche genannt, über das erste Modell platziert, um die Form zu stabilisieren und den Gießprozess zu erleichtern. Dies bildet eine der beiden Hälften der Gussform, die als Oberkasten bezeichnet wird. Als nächstes wird die zweite Hälfte des Modells vorbereitet, um die vollständige Form des Gussstücks zu schaffen. Auch hier wird ein Gießrahmen über das zweite Modell gesetzt, wodurch die zweite Hälfte der Gussform entsteht, der sogenannte Unterkasten. Sobald beide Formhälften fertiggestellt sind, werden sie zusammengefügt, wodurch eine vollständige Gussform entsteht. Diese Gussform enthält den Hohlraum, der später mit flüssigem Metall gefüllt wird.

Das flüssige Metall wird durch ein Gießsystem in die vorbereitete Form gegossen. Es fließt durch speziell angelegte Kanäle und füllt den Hohlraum der Form vollständig aus. Nachdem

Das Metall erstarrt ist, entsteht das festgewordene Gussstück. Nach dem Abkühlen wird die Gussform entfernt, und das resultierende Teil kann anschließend weiter bearbeitet oder verwendet werden.

Das Verfahren ist gerade bei größeren Stückzahlen besonders wirtschaftlich und liefert je nach Gussverfahren eine sehr hohe Qualität. Damit einhergehend sind aber auch hohe Anschaffungskosten für die Maschinen, Werkzeuge, Formen und Knowhow notwendig.

Um die erwünschte Gussqualität zu erreichen sind neben der verwendeten Legierung, der Fließgeschwindigkeit und Gusstemperatur auch weitere Restriktionen nicht zu vernachlässigen. Folgende Restriktionen sind hinsichtlich eines Optimierte Gussteils besonders wichtig für die Herstellung.

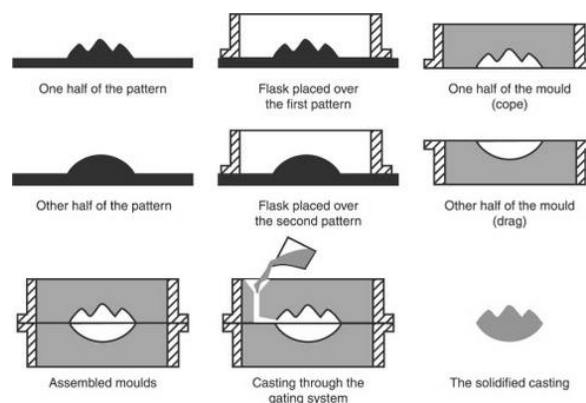


Abbildung 14 Guss Prozesskette

1. Entformungsrichtung

Eine der wichtigsten Restriktionen für das Gießen ist die Entformungsrichtung. Gussteile werden in der Regel mit Gussformen hergestellt, die aus zwei Hälften bestehen und ggf. noch Kerne enthalten, um Hohlräume oder ähnliches zu realisieren. Die Entformungsrichtung ist daher wichtig, da sie zum einen die Gussform in ihrer Geometrie beeinflusst und auch das Entformen selbst. Bauteile die Symmetrisch sind, mit einer kontinuierlichen Struktur lassen sich leichter entformen und bedürfen keiner komplexen Sondergussform mit mehreren Kernen

2. Hinterschnitte

Hinterschnitte sind beim Gießen, wenn möglich zu vermeiden. Diese erfordern speziellere Gussformen mit Kernen. Ggf. sind auch verlorene Gussformen von Nöten. Sprich Hinterschnitte verkomplizieren den Gussprozess und verursachen erhöhte Kosten

3. Waddicken

Da beim Gießen flüssige Metalllegierungen mit sehr hohen Temperaturen verwendet werden, sind den Waddicken eine besondere Aufmerksamkeit zu geben. Ungleichmäßige Waddicken verursachen ein ungleichmäßiges Abkühlen des Gussteils. Dadurch kann es zu Spannungen und Verzug innerhalb des Bauteils kommen. Die Folge davon ist, dass die vorgegebene Form nicht eingehalten werden kann. Ebenso sind Mindestmaße für die Dicken der Wände einzuhalten. Eine weitere Konsequenz der Waddicken-Unterschiede ist eine schwerere Entformbarkeit. Sprünge von dünnerer, zu dickerer Waddicke verhindern ggf., dass das Gussteil aus der Form gezogen entfernt kann. Für den Feinguss gilt in der Regel ein Richtwert von 0,5-1 mm Waddicke.

4. Minimale Strukturgrößen

Metalllegierungen sind beim Gießen nur bis zu einem gewissen Grad fließfähig, da ihre Viskosität höher ist als die von Wasser. Daher sollten filigrane Strukturen vermieden werden, da bei zu geringen Querschnitten oft keine vollständige Formfüllung erreicht wird, weil das Material möglicherweise bereits abkühlt, bevor es die gesamte Struktur ausfüllt. Dies kann besonders bei feinen Details auftreten.

Für den Feinguss, der präzisere und filigranere Strukturen ermöglicht, sollten Strukturen ebenso einen Mindestdurchmesser von 0,5 bis 1 mm haben. Kleinere Durchmesser können zu unvollständigen Gussstücken führen. Auch feine Details sollten sorgfältig gestaltet werden, um sicherzustellen, dass das flüssige Metall die Form vollständig ausfüllt. Filigrane Strukturen können unnötig komplexe Gussformen verursachen, was den gesamten Gießprozess verteuern kann. Daher trägt eine durchdachte Gestaltung zur Effizienz und Kostensenkung bei.

5. Symmetrische Konturen

Symmetrische Konturen sorgen bei Gussteilen für eine gleichmäßige Materialverteilung. Dies führt wiederum dazu, dass mechanische oder thermische Spannungen ebenso gleichmäßig verteilt werden und so die Belastbarkeit des Gussteils verbessern. Solche Konturen sind leichter gleichmäßig zu kühlen, was die Wahrscheinlichkeit von thermischen Spannungen und damit einhergehend den Verzug verringert. Sie sind also wenn möglich zu bevorzugen.

6. Schleifbare Querschnitte

Wie auch für das Fräsen gilt es Flächen von Gussteilen die in der Nachbearbeitung geschliffen werden sollen, zugänglich zu machen. Funktionsflächen von Gussteilen wie Flansche oder auch Lagersitze. Diese müssen oft nachbearbeitet werden, da das Gussverfahren keine ausreichend hohe Oberflächenqualität erreicht.

4.3 MIM (Metallpulver-Spritzguss/ Metal Injection Molding)

Das Metallpulver Spritzgussverfahren, ist ein Fertigungsverfahren bei dem feines Metallpulver mit einem Bindemittel zu einer spritzgussfähigen Masse vermischt wird. Diese Masse wird dann in eine Form gespritzt um das gewünschte Bauteil herzustellen. Dieses noch mit dem Bindemittel verbundenen Teil wird Grünteil genannt. Im Anschluss wird dieses von dem Bindemittel, durch das Pre-Sintern befreit. Das hat zur Folge, dass das Bauteil porös und noch nicht richtig belastbar ist. Das vom Bindemittel befreite Teil wird dann Bräunling genannt. Zum Schluss wird dieser gesintert, damit die Metallpartikel zu einer dichten und festen Masse

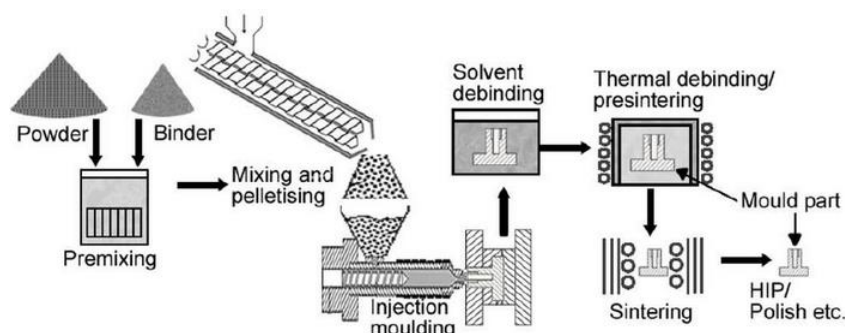


Abbildung 15 MIM Prozesskette

[https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-MIM-process-](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-MIM-process-45_fig1_278414405)

45_fig1_278414405 Besucht am 04.08.24

verbinden. Das Verfahren findet beispielsweise in der Automobilindustrie, der Medizintechnik oder dem Werkzeugbau Anwendung.

Für das MIM-Verfahren gelten vergleichbare Einschränkungen wie für das konventionelle Gussverfahren:

1. Entformungsrichtung

Analog zu anderen Fertigungsverfahren ist auch beim MIM-Verfahren die Entformungsrichtung von entscheidender Bedeutung. Eine durchdachte Gestaltung der Form, die die Entformungsrichtung berücksichtigt, kann verhindern, dass sich das Spritzgussteil in der Form verklemmt oder unnötig komplexe Geometrien erforderlich macht.

2. Minimale Strukturgrößen

Um Formstabilität und Prozesssicherheit zu gewährleisten, sollten filigrane Strukturen nicht zu klein dimensioniert sein. Insbesondere während des Sinterns können zu kleine Strukturen Verformungen oder gar Brüche erleiden. Üblicherweise sollten Wanddicken nicht unter 0,3 bis 0,5 mm liegen. Bohrungen und Durchbrüche erfordern einen Minstdurchmesser von etwa 0,5 mm, um eine ausreichende Stabilität während des Herstellungsprozesses sicherzustellen.

3. Maximale Strukturgrößen

Überdimensionierte Strukturen können eine ungleichmäßige Wärmeverteilung während des Sinterns zur Folge haben, was zu variierenden Dichten innerhalb des Bauteils und damit zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führt. Ferner besteht das Risiko einer unvollständigen Entfernung des Bindemittels aus dem sogenannten Grünling. Generell sollten Bauteildicken 10 bis 15 mm nicht überschreiten, um diese Risiken zu minimieren.

4. Symmetrien

Wie auch beim Gießen trägt eine symmetrische Bauteilgeometrie zu einem gleichmäßigen Abkühl- und Sinterverhalten bei. Dies verringert die Gefahr von Verzug und trägt zur Verbesserung der strukturellen Integrität bei. Eine symmetrische Gestaltung erleichtert zudem den Entformungsprozess und kann dazu beitragen, die Präzision und Qualität des Endprodukts zu erhöhen.

5 Additive Fertigung

Die additive Fertigung, ein Verfahren, das sich in der Gruppe der Urformverfahren einordnen lässt, hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Von einfachen Prototypen, bis hin zu ganzen Fabriken bestehend aus 3D-Druckern, nimmt diese Art der Fertigung immer mehr Anteil an der Industrie und ermöglicht es dem Ingenieur, Konstruktionen immer freier von gängigen Restriktionen zu realisieren.

So ist das Verfahren auch für den Bereich der Topologieoptimierung von größter Bedeutung. Die, für topologisch optimierte Bauteile, typischen komplexen Strukturen, sind mit konventionellen Fertigungsverfahren oftmals nur unter hohem Material- und Kostenaufwand realisierbar. Es braucht dafür meist hoch spezialisierte Fräsmaschinen oder sehr teure Gusswerkzeuge. Dieser Aspekt macht die additive Fertigung für diesen Bereich besonders attraktiv. Strukturen wie in Abbildung 16 sind, beispielsweise mit einem laserbasiertem 3D Drucker, keine Herausforderung mehr und lassen sich mit sehr guten Ergebnissen herstellen.



Abbildung 16 Topologisch optimiertes Bauteil

<https://www.3dbavaria.com/3d-druck-nachhaltigkeit-bauteile/> besucht am 10.09.24

Da die Additive Fertigung für diese Arbeit von entscheidender Bedeutung ist und verständlicher wird, wird im Folgenden auf die Grundlagen eingegangen. Es werden dabei zwei spezielle Arten der additiven Fertigung etwas mehr beleuchtet, da sie in den späteren Kapiteln von Relevanz sind.

5.1 Grundlagen der additiven Fertigung

In der additiven Fertigung gibt es viele verschiedene Varianten der Fertigung. Besonders beliebt für den Heimbedarf sind sogenannte FDM-Drucker (Fused Deposit Material Drucker) und SLA Drucker (Stereolithografie-Drucker). Beide verwenden in der Regel spezielle Arten von Polymeren, die für das jeweilige Verfahren geeignet sind. PLA für den FDM Drucker und diverse Photopolymere für den SLA Drucker. Also Materialien die durch UV Strahlen aushärten.

Immer mehr an Bedeutung gewinnen aber auch Laserbasierte Verfahren wie LPBF (Laser Powder Bed Fusion). Diese ermöglichen die Verwendung von metallischen Werkstoffen mit einer sehr hohen Fertigungsgenauigkeit im ηm -Bereich.

In der Regel läuft ein 3D Druck in folgenden Schritten ab:

1. Vorbereitung des Modells:

Ein 3D-Modell wird mittels CAD vorher konstruiert. Dieses Modell muss dann in ein für Slicer lesbares Format, normalerweise STL oder OBJ exportiert werden

2. Slicing:

Das exportierte Modell wird in der Slicer-Software in einzelne Schichten zerlegt. Diese Software generiert einen sogenannten G-Code, der die Anweisungen für den Drucker enthält. Das beinhaltet die Verfahrswege, Materialstrom, Temperatureinstellungen, Schichthöhen die gedruckt werden sollen und mehr

3. Druckbettvorbereitung:

Das Druckbett sollte vor jedem Druck von Restmaterialien befreit und ggf. mit einem Reinigungsmittel wie Isopropylalkohol gereinigt werden.

4. Materialvorbereitung:

Das Druckmaterial, beispielsweise Polymere, Metalle oder auch Holz, wird von dem Drucker aufgenommen und auf Verarbeitungstemperatur erhitzt.

5. Druckbeginn:

Das Material wird aufgeschmolzen und durch eine Düse oder durch einen sogenannten „Recoater, also den Auftragsmechanismus für Pulver zum Aufschmelzen mit einem

Laser, auf das Druckbett aufgebracht, wodurch die erste Schicht entsteht. Diese erste Schicht ist von größter Bedeutung, da sie die Basis für die weiteren Schichten bildet und die Qualität des späteren Bauteils maßgeblich beeinflusst. Haftet sie nicht genügend am Druckbett, kann sie sich später durch den thermischen Verzug von der Platte lösen und das gesamte Bauteil unbrauchbar machen. Ist sie uneben hat dies einen direkten Einfluss auf die darauffolgenden Schichten und beeinträchtigt die strukturelle Integrität.

6. Schichtaufbau:

Schicht für Schicht wird weiteres Material hinzugefügt, bis die Geometrie des Bauteils vollständig abgebildet ist. Die Dauer der Herstellung hängt stark von der Komplexität von dem Füllgrad, aber auch von der verwendeten Maschine ab. In der Regel ist ein Füllgrad von 20% ausreichend für gute Ergebnisse und kleinen bis keinen Verzug. Es kommt eher selten vor, dass additiv gefertigte Teile im Vollen gedruckt werden. Stattdessen nutzt man Füllmuster bzw. Lattice Strukturen um die mechanische Belastbarkeit zu gewährleisten.

Je nach Geometrie kann es erforderlich sein, sogenannte Stützstrukturen zu drucken, die dafür sorgen, dass Überhänge realisiert werden können. Diese Stützstrukturen werden in der späteren Nachbearbeitung meist manuell entfernt.

In der Regel werden Stützstrukturen ab einem Winkel von 45° benötigt, da das Material auf Grund der Erdbeschleunigung nicht einfach in die Luft gedruckt werden kann. Ursache hierfür

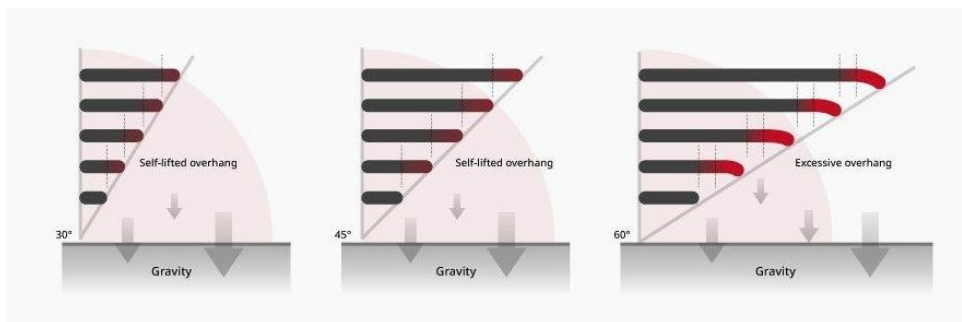


Abbildung 17 Überhangsschema

<https://www.raise3d.com/academy/when-and-how-to-use-3d-printed-support-structures/>

besucht am 04.08.24

ist, dass das Material beim Auftragen noch in einem viskosen Bereich und noch nicht ausreichend abgekühlt ist. Daher neigt das Material dazu, sich leichter zu verformen und unter der eigenen Masse nachzugeben. Begünstigt wird dies dadurch, dass die Schicht darunter, nicht ausreichend Halt liefert, um der Last durch die eigene Masse standzuhalten.

Bezogen auf den Materialverbrauch kann es daher sinnvoll sein, Geometrien und die Druckausrichtung so zu dimensionieren bzw. einzustellen, dass Stützstrukturen minimiert oder gar komplett ausgelassen werden können. Diese führen oft zu erheblichem Materialausschuss und sind in den meisten additiven Fertigungsverfahren weder einfach recycelbar noch leicht zu entfernen.

Die mechanische Belastbarkeit von additiv gefertigten Bauteilen ist nach wie vor noch eine Herausforderung. Durch den Schichtweisen Aufbau entstehen zwischen den einzelnen Schichten kleine Kerben, die zwar, im Fall von LPBF, kaum sichtbar sind, an denen aber Spannungsspitzen bei Belastung entstehen. Um ein Strukturversagen zu vermeiden muss bei dem Druck also auf die Belastungsrichtung geachtet werden. So sollten besonders Zug und Biegebelastungen vermieden werden, da 3D Drucke anisotrope Eigenschaften aufweisen und dadurch in manchen Belastungsrichtungen besonders anfällig für Schäden sind.

Um ein passendes Design für die additive Fertigung zu konstruieren hilft es folgende Abbildung zu betrachten. Sie sagt aus, dass man nicht einen einzelnen Bereich ändern kann ohne einen

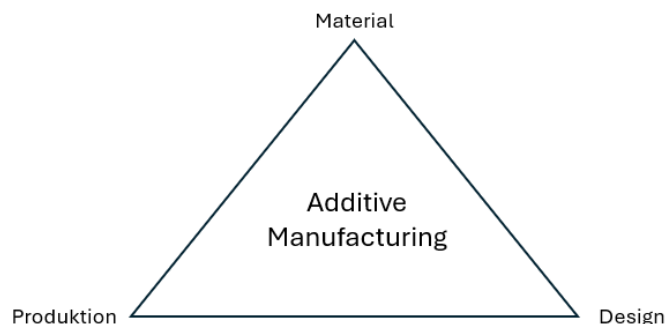


Abbildung 18 3D Druck Design Dreieck (Gebhardt, et al., 2019)

direkten Einfluss auf die anderen zu haben. Das bedeutet bezogen auf die additive Fertigung, dass es nicht diese eine Vorgehensweise für das Design gibt sondern viele verschiedene Faktoren mit beachten muss. (Andreas Gebhardt, 2019). Rückblickend auf die Restriktionen der additiven Fertigung ist also ratsam, vor Beginn der Konstruktion, Skizzen zu erstellen und eine genaue Vorgehensweise zu planen um den späteren Nachbearbeitungsbedarf zu minimieren.

5.2 Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen

Der Ablauf (siehe Abbildung 19) des pulverbasierten Laserstrahlschmelzen (LPBF) erfolgt durch das lokale Aufschmelzen von zum Beispiel metallischen Pulvermaterialien. Dabei wird ein feines Pulvermaterial auf die Druckfläche, durch einen „Recoater“ aufgetragen. Das aufgetragene Material wird durch einen oder mehrere Laser, die genauen Verfahrenswegen folgen, lokal aufgeschmolzen. Dadurch, dass das Material nur in einer Schichtdicke von ein paar μm aufgeschmolzen wird, kühlt es entsprechend schnell ab. Nachdem die Schicht fertig ist folgt eine neue Schicht Pulvermaterial, welches dann wieder aufgeschmolzen wird. Dieser Prozess wird solange wiederholt bis das Bauteil die gewünschte Form erreicht hat. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist die Flexibilität. Damit werden Strukturen möglich die für ein Fräsverfahren oder für das Gießen zu komplex, zu viele Hinterschnitte, ungleichmäßige Wanddicken hätten oder schlichtweg nicht fertigbar wären.

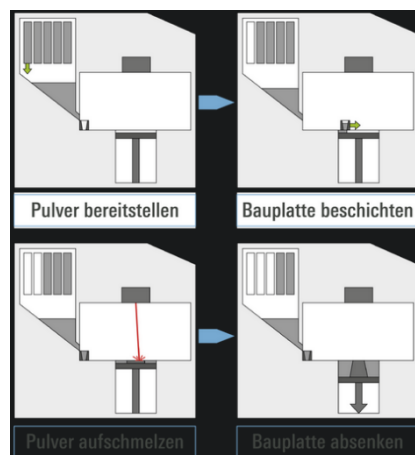


Abbildung 19 LPBF Prozess 20<https://www.teilefabrik.de/technologien/lpbf-technologie>
besucht am 21.07.2024

Um gute Ergebnisse mit diesem Verfahren zu erzielen müssen jedoch auch einige Restriktionen beachtet werden, die maßgeblichen Einfluss auf die Qualität haben.

1. Dimensionierung des Bauteils

Auch wenn sehr komplexe Strukturen möglich sind, ist die Größe immer durch den Bauraum und die Geschwindigkeit des verwendeten Druckers nach wie vor beschränkt. Besonders große Bauteile, wie ein Motorblock, der ansonsten gegossen werden würde, sind mit diesem

Verfahren kaum zu realisieren und wären auch schlichtweg zu teuer. Denn je größer das Bauteil, desto länger die Druckzeit. Im Fall des Motors würde ein solcher Druck vermutlich Wochen dauern. Ebenso sind gewisse Abstände zwischen den einzelnen Strukturen vorzusehen. In der Regel geht man hier von etwa 0,5 Millimetern aus, um zu verhindern, dass beim Aufschmelzen des Materials zwei voneinander getrennte Strukturen sich miteinander verbinden.

2. Winkelmaße

Für die meisten 3D-Druck-Verfahren gilt, wie bereits oben beschrieben, eine Winkelbeschränkung von ca. 45°. Alles darunter wird schwierig, da der Drucker ansonsten in die Luft drucken müsste, sofern die Schichten darunter das neue Material nicht ausreichend tragen können. Auch für das LPBF-Verfahren gilt diese Einschränkung. Theoretisch ist es



Abbildung 20 Überhangsmuster (Gebhardt, et al., 2019)

möglich, das Pulver als Stützmaterial zu nutzen. Dafür muss dieses allerdings während des gesamten Prozesses seine strukturelle Integrität wahren, was unter der steigenden Materialbelastung durchaus schwierig werden kann. Daher sind Stützstrukturen meist die bessere Wahl, wenn erforderlich. Um dennoch Stützstrukturen zu vermeiden, bietet es sich an, Materialübergänge in das Bauteil zu konstruieren (Abbildung 20). Diese ermöglichen es, die Schichten Stück für Stück in Richtung Überhang aufzubauen. Auf diese Weise können die einzelnen Schichten leichte Überhänge schaffen, sodass sie der Zielgeometrie immer näher kommen, ohne Stützen zu benötigen. Für Abbildung 20 gilt, dass die Überhänge von links nach rechts immer besser für einen Druck wären. Eine einfache Schräge (rechts) bietet die beste Stütze für darauffolgende Schichten.

3. Vorsehung von Pulverablässen

Da bei diesem Verfahren ein Pulver verwendet wird, welches mit wachsender Geometrie mitwächst, muss dieses in der Nachbearbeitung entfernbar sein. Zu diesem Zweck müssen bei Hohlräumen im Design entsprechende Öffnungen vorgesehen sein, die ein Ablassen des Restpulvers ermöglichen, aber auch gleichzeitig die strukturelle Integrität nicht beeinträchtigen.

Sprich, bei der Planung des Bauteils sollten etwaige Ablässe vorab in einer FEA geprüft werden.

5.3 **Materialextrusion**

Die Materialextrusion stellt eines der beliebtesten Verfahren im 3D-Druck-Bereich dar. Die Anschaffungskosten für die Geräte sind heutzutage mit einem Smartphone vergleichbar. Bei diesem Verfahren wird, nicht wie beim Laserbasierten, das Material erst auf dem Druckbett aufgeschmolzen, sondern direkt in einem Druckkopf. Dieser besteht je nach Bauweise aus einem Cold End und einem Hot End. Das Cold End besteht aus einem Kühlkörper, um zu verhindern, dass das eingebrachte Material zu früh schmilzt, und einem Heat Break, der eine thermische Trennung zwischen dem kalten und heißen Bereich des Druckkopfes darstellt. Das Hot End besteht aus einem Heizblock, der das Material aufschmilzt, und einem Thermistor, welcher kontinuierlich die Temperatur misst. Zuletzt folgt noch die Düse, meist mit dem englischen Namen Nozzle bezeichnet. Die Nozzle gibt zusammen mit dem Extruder, welcher direkt auf dem Druckkopf oder am Rahmen des Druckers befestigt ist, vor, wie viel Material gleichzeitig austreten kann. Eine dünnere Nozzle sorgt für eine bessere Auflösung des Druckes. Dies bedeutet aber auch gleichzeitig eine Verlängerung der Druckzeit. Abbildung 21 zeigt ein grobes Schema eines Materialextrusionsdruckers. Die Materialzufuhr erfolgt meist mit einer Filament-Spule aus einem „endlos“ langen Strang eines Polymers oder anderen Materials oder auch in Granulatform. Letztere Variante ist allerdings seltener anzutreffen. Bei diesem Verfahren sind Schichtdicken von 0,05 bis 0,2 Millimetern üblich.

Wie auch das laserbasierte Verfahren unterliegt die Materialextrusion gewissen Fertigungsrestriktionen. Beide Verfahren sind eingeschränkt durch die Winkelvorgabe von 45° sowie die Bauteildimension, abhängig vom gegebenen Bauraum. Bei der Materialextrusion ist die Ausbildung der Stützstrukturen jedoch oft deutlich größer und schwerer zu entfernen. Besonders großen Einfluss hat bei diesem Verfahren der Schichtaufbau. Die Anisotropie des Bauteils macht sich bei diesem Verfahren besonders bemerkbar. Dadurch, dass das Material nach dem Auftragen direkt abkühlt, verschmilzt es nur bedingt mit der neuen Schicht darüber. Sprich, die Schichtadhäsion ist nur begrenzt belastbar. Das hat zur Folge, dass, wie bereits oben beschrieben, diese Bauteile besonders empfindlich hinsichtlich der Belastungsrichtung sind und die Schichten sich schnell voneinander lösen können. Man spricht von einer sogenannten

Delaminierung. Entsprechend sollte die Fertigung auf diese Restriktionen hin optimiert sein. Das heißt, bereits die Konstruktion muss so gewählt sein, dass die Belastungsrichtung orthogonal zur Druckrichtung liegt. Ebenso ist das Verfahren durch den Mindestdurchmesser der Strukturen beschränkt. Die Auflösung hängt stark von der verwendeten Düse, der Maschine oder auch dem Material ab. Für Streben sind Durchmesser von 0,8 bis 1 Millimeter möglich, während die Wanddicke bei 1 bis 2 Millimetern mindestens liegen sollte, um eine Formstabilität zu gewährleisten.

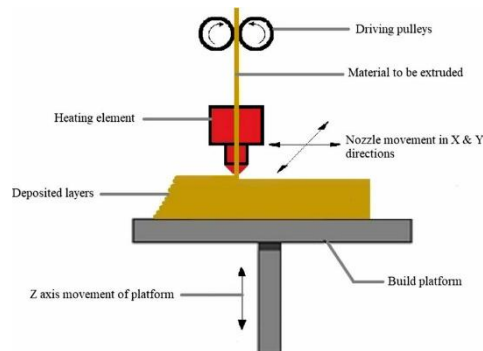


Abbildung 21 MEX Prozess

https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-material-extrusion-additive-manufacturing_fig1_366627654

besucht am 25.06.2024

Zusammengefasst unterliegt die additive Fertigung trotz ihrer Freiheiten gegenüber den konventionellen Verfahren einigen Restriktionen. Um diese einzuhalten, muss das Bauteil in der Konstruktion bereits so geplant werden, dass zum einen Überhänge möglichst vermieden oder zumindest mit Übergängen versehen werden. Zum anderen muss die Konstruktion an das gewählte Druckverfahren angepasst sein. Soll ein Teil mit einem einfachen Extrusionsverfahren hergestellt werden, sollten die Strukturen möglichst einen minimalen möglichen Durchmesser besitzen, um herstellbar zu sein. Ebenso sollten scharfe Ecken und Kanten vermieden werden, um die Formhaltigkeit zu gewährleisten.

6 Automatisierungsplattform Synera

Die Low Code Programmierumgebung Synera ist in ihrer Art ein recht neuer Ansatz im Ingenieurwesen. Man kann sich die Software vorstellen wie einen digitales Schweizer Taschenmesser, das Ingenieuren diverse Werkzeuge für ihre Konstruktionen, Simulationen und vielem mehr, in einem einzigen Tool zur Verfügung stellt. Das Bauteil wird nicht mehr klassisch in einem CAD-Modellierungs-Tool (siehe Abbildung 22 konstruiert, sondern es wird mit sogenannten Workflows gearbeitet. Diese werden mit allen wichtigen Eigenschaften für das Ziel Teil versehen. Ähnliche einer einzigen großen Parametrisierung. Der große Vorteil in diesen Workflows besteht darin, dass die erstellten Geometrien und Körper flexibel angepasst werden können. Was ansonsten in einer aufwendigen Parametrisierung einzeln aufgebaut werden muss, kann hier in einem einzigen Workflow variabel erstellt und jederzeit ohne Abhängigkeitsprobleme angepasst werden

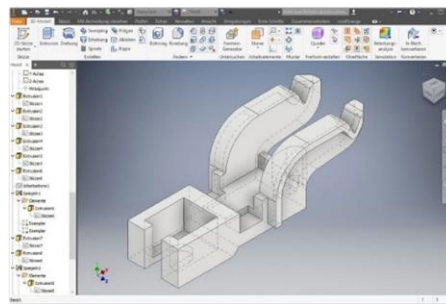


Abbildung 22 CAD Inventor Bsp.

<https://3d-print-solutions.de/cad/>

besucht am 13.04.2024

Dies fängt an bei den Dimensionen bzw. Maßen, geht hin über Design Bereiche, Materialeigenschaften, Rundungen, Fasen und vielem mehr. Mit all den ,vorher definierten, Eigenschaften lässt sich mit Hilfe des Programms ein Bauteil generieren. Die genaue Funktionsweise, wie die Software angewendet wird und was beachtet werden muss, wird in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Dabei wird besonders, auf die, für die Anwendungsfälle relevanten Optimierungs-Solver eingegangen und anhand eines einfachen Beispiels deren Funktionsweise aufgezeigt. Da jedoch die Workflows viele einzelne Nodes enthalten werden nicht alle einzeln erklärt, sondern nur die, für das Verständnis, relevantesten. Eine gesonderte Dokumentation der verwendeten, relevanten, Nodes ist im Anhang zu finden.

6.1.1 Funktionsweise und Aufbau

Synera funktioniert, ähnlich wie andere Low Code Anwendungen, mit Hilfe von Blöcken, genannt Nodes. Die Nodes beschreiben Eigenschaften und Funktionen. Alleine liefern sie keinen Mehrwert sondern müssen in Verbindungen angewandt werden. Zum besseren Verständnis wird dies anhand eines kleinen Beispiels in Abbildung 23 gezeigt.

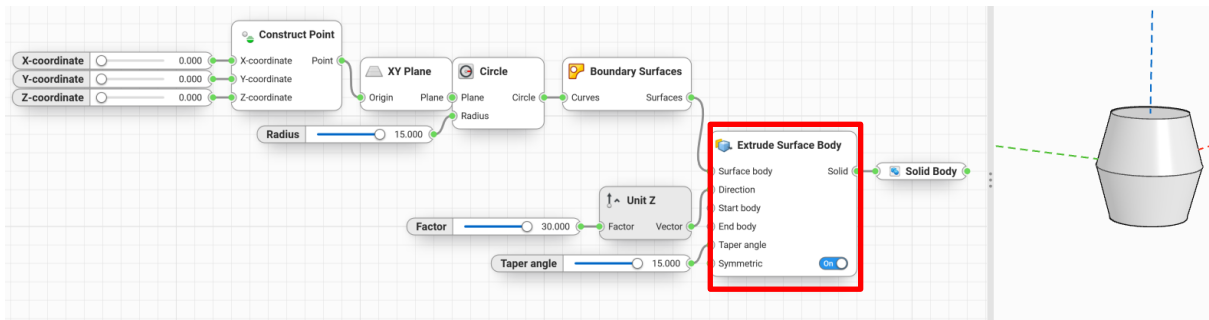


Abbildung 23 Synera Workflow

Der Node „Extrude Surface Body“, rot markiert, wird dazu verwendet eine Extrusion, wie man sie auch aus CAD Tools kennt, zu erstellen. Um die Extrusion zu realisieren, werden allerdings mehrere Inputs benötigt. Es braucht als erstes eine Zeichnung, welche nochmal aus weiteren Inputs wie Radius, Art der Kurve, und ggf. noch eine Ebene mit einem Ursprungspunkt für die Orientierung besteht. Wird keine Ebene mit einem Punkt vorgegeben, beginnt die Zeichnung immer im Ursprung des Koordinatensystems. Wichtig ist dabei, dass Synera nicht automatisch mit festen Einheiten arbeitet. Das heißt, dass alle Werte vor der Verwendung auf ihre Einheiten hin abgestimmt sein müssen. Werden die 3D Modelle in Millimeter konstruiert, so müssen auch die vorhandenen Spannungen etc. bezüglich ihrer Einheiten angepasst werden.

Ist dies gegeben wird eine „Boundary Surface“ hinzugefügt, die alle Kurven miteinander zu einer geschlossenen Fläche vereint und anschließend Extrusions-Node, welcher die Fläche extrudiert und daraus einen Körper macht.

Die „Direction“ wird für den Richtungsvektor der Extrusion genutzt und benötigt einen Wert und eine Achse für die Richtung. Diese lässt sich mit Hilfe einer „Unit x,y,z“ vorgeben. Als Ergebnis kommt dann aus der Extrusion ein „Solid“ heraus. Dieses Ergebnis lässt sich, samt der davor liegenden Logik an Nodes, als „Body“ oder „Solid Body“ abspeichern um für den späteren Workflow zur Verfügung zu stehen. Dafür bietet Synera eine „Internalize“-Funktion,

welches es ermöglicht die Daten aus dem Workflow dauerhaft abzuspeichern, sodass die Daten ggf. in einen anderen Workflow übertragen werden können. Hier ist jedoch Vorsicht geboten. Es kann vorkommen, dass sich Synera zwischendurch aufhängt und das „Internalizing“ verloren geht und damit der gesamte hintere Workflow nicht mehr funktioniert. Die Workflows können je nach Ziel eines Projektes klein, aber auch sehr aufwendig und unübersichtlich ausfallen. Das obere Beispiel ist nur ein Bruchteil dessen, was notwendig ist für eine Topologie Optimierung.

Nachdem nun das Grundlegende Prinzip der Workflows in Synera geklärt wurde, folgt im nächsten Unterkapitel der Aufbau einer Topologischen Optimierung, samt der verwendeten Solver für eben diese.

6.1.2 Aufbau einer Topologie Optimierung in Synera

Eine Topologie Optimierung mit Hilfe von Synera und den zur Verfügung gestellten Solvern, läuft je nach Solver, also dem verwendeten Softwaretool, unterschiedlich ab. Hierbei geht es speziell um die Solver der Firmen Hexagon und Altair. Beide haben eigene Algorithmen entwickelt, die mit Hilfe der in der Theorie erläuterten Methoden SIMP und BESO arbeiten.

Grundsätzlich erfolgt eine Optimierung in Synera ähnliche wie es auf dem konventionellen Weg laufen würde. Vereinfacht in sechs Schritten.

1. Konstruktion CAD Modell
2. Definition des „Non Design Bereiches“
3. Definition des „Design Bereiches“ inklusive des verfügbaren Raumes
4. Definition der Randbedingungen
5. FEM Analyse.
6. Definition der Zielrestriktionen
7. Optimierungsprozess mit entsprechendem „Solver“

6.1.3 Hexagon Emendate Solver

Der Hexagon Solver Emendate arbeitet mit einem sogenannten „Engineering Approach“. Dieser nutzt die Ansätze der BESO Methode um besonders klare Strukturen zu ermöglichen, die, theoretisch, so direkt fertigbar sein sollen. Die Vorgehensweise unterscheidet sich hier von einem Workflow mit Altair OptiStruct in Synera. Der Aufbau einer Optimierung beginnt zunächst, wie auch mit Altair OptiStruct, mit den CAD Modelle, dem DS und NDS. Danach erfolgt normalerweise eine FEA vorgeschaltet zur topologischen Optimierung. Hexagon wählt hier jedoch einen anderen Ansatz. Es werden ebenso Kräfte, Lagerpunkte und Materialeigenschaften, sowie Spannungsziele und Fertigungsrandbedingungen festgelegt. Nur wird hier mit einer integrierten FEA gearbeitet. Diese arbeitet parallel zur Optimierung und berechnet die mechanischen Spannungen nach jeder Iteration erneut. Abgesehen von der Geometrie in Form von 3D Modellen müssen folgende Nodes für die Optimierung definiert werden.

1. Solid Part

Das „Solid Part“ wandelt ein gegebenes 3D Modell innerhalb von Synera um in ein „Hexagon-Modell“, mit den entsprechenden Dateiformat um dieses weiterverarbeiten zu können. Mit diesem Node können auch die NDS eingebracht werden, damit der Solver weiß welches Teil nicht angepasst werden darf. Das „Retained Volume“ dient dazu Bereiche zu definieren die zwar in Kontakt zu dem Modell sind, aber nicht angepasst werden und auch nicht zum NDS gehören.

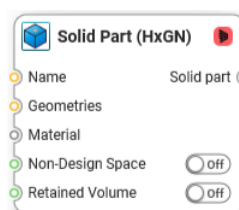


Abbildung 24 Solid Part Node (HxGN) Screenshot
Synera, Version Judicious Juracan

2. Interface

Definiert eine Schnittstelle, einschließlich der Nicht Designdicke, die von der ursprünglichen Geometrie erhalten bleiben soll und Bearbeitungszugabe-Dicke für die Optimierung. Das Interface wird zum einen verwendet um das Modell für die Optimierung zu speisen und zum anderen um die Angriffspunkte für die Lager und Kräfte, die wirken zu liefern. Es ist zwar auch möglich dies zu realisieren, indem Flächen dort Flächen mit einem „Surface“-Node definiert werden wo die Kräfte angreifen, jedoch ist diese Variante einfacher und übersichtlicher. Ist der NDS nicht nur eine einfache Fläche, sondern ein separater Körper, so ist es sinnvoll statt einer „Surface“ also eine Kontaktfläche, einen „Surface Body“ zu nutzen. Damit wird sichergestellt, dass der Solver auch tatsächlich um diesen Bereich herum optimiert und nicht nur eine einfache Fläche als Kontaktpunkt nutzt.

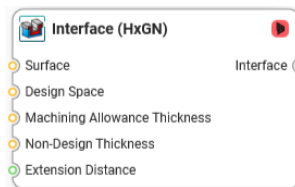


Abbildung 25 Synera Interface Node (HxGN)
Screenshot Synera, Version Judicious Juracan

3. Construct Model

Das „Construct Model“ führt alle relevanten Daten wie Interfaces, Kräfte, Lagerpunkte und Teile zusammen, um daraus ein Modell zu erstellen das von dem Solver optimiert werden kann.

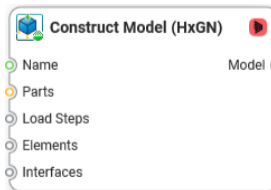


Abbildung 26 Synera Construct Model Node (HxGN)
Screenshot Synera, Version Judicious Juracan

4. Topology Optimization

Dieser Node optimiert das Bauteil in bis zu hundert iterativen Schritten. Dazu wird dieses in ein Meshing aus Finiten Elementen übertragen, anhand der Lasten berechnet, Material entfernt oder hinzugefügt und erneut berechnet. Dabei wird das Meshing mit fortschreitender Optimierung, mit jeder Iteration, immer feiner. Dadurch können zu Beginn größere Mengen Material entfernt werden und gegen Ende hin die Optimierung feiner gestaltet werden. Die einzelnen Iterativen Schritte werden, bei diesem Solver sichtbar gemacht, was den Vorteil hat, dass nicht bis zum Ende gewartet werden muss um ggf. Anpassungen vorzunehmen. Diese Funktion ist auch hilfreich um zu beobachten wie genau der Solver die Optimierungen handhabt und welche Vorgehensweise genutzt wird.

Gespeist wird der Node mit dem Modell, das aus dem „Construct Model“ kommt, mit einer Fertigungsmethode, Guss oder Additive Fertigung, mit einem Komplexitäts Faktor und einem Globalen Sicherheitsfaktor. Der Komplexitätsfaktor bzw. „Complexity“ in Synera wird dazu verwendet zu bestimmen wie komplex die Geometrie werden soll. Niedrigere Faktoren sorgen für schnellere Ergebnisse und höhere Faktoren für genauere und strukturierte Ergebnisse. Es ist also sinnvoll auch hier ein mittleres Maß in Abhängigkeit von den eigenen Anforderungen zu wählen. Für den „Global Safety Factor“ ist ein Wert einzustellen ähnlich dem, was aus dem Maschinenbau kommt. Dieser dient als Sicherheitsfaktor und kann eingesetzt werden, wenn die Struktur ggf. mit einer Sicherheit beaufschlagt werden soll. Als Alternative kann der Faktor auch bei den Lasten eingebracht werden und diese so als höher angenommen werden. Wichtig ist hier, dass bei der Gussoptimierung eine Sicherheit von 1 bis 2 manchmal nicht reicht, da die entstehenden Strukturen nicht gießbar wären (siehe 4.2 Gussrestriktionen)

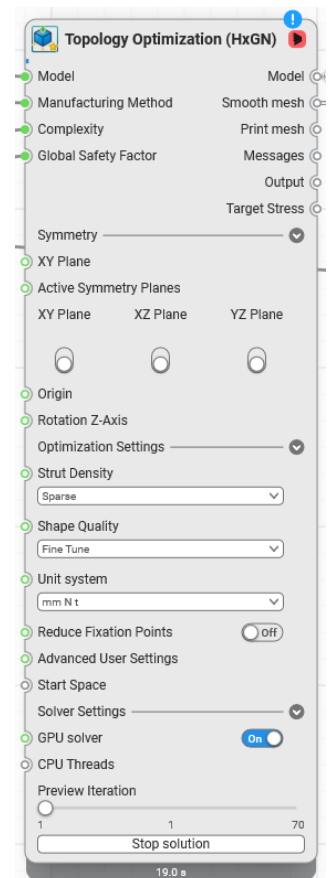


Abbildung 27 Synera Topology Optimization Node (HxGN)
Screenshot Synera, Version Judicious Juracan

Um Symmetrien in Hexagon zu erwirken können mehrere Wege eingeschlagen werden. Die einfachste Variante ist es die Symmetrieebenen im Solver selbst zu verwenden. Dazu sollte das Bauteil entweder vorher halbiert oder geviertelt werden und die Lasten entsprechend nur auf diesen einen Bereich anzuwenden, oder die veranschlagten Randbedingungen sollten exakt symmetrisch sein, damit

das Design am Ende auch symmetrisch wird. Das beschleunigt die Optimierung und das Ergebnis kann später ggf. mit der Spiegel Funktion vervollständigt werden, zu einem Symmetrischen Bauteil. Alternativ zu dieser Variante kann die in Punkt 5 erwähnte Startebene als Symmetrieebene verwendet werden. Von dort aus werden dann alle weiteren Symmetrieebenen definiert die zusätzlich eingebracht werden sollen. Die Funktion „Origin“ dient dazu den Ursprung der Symmetrieebene zu definieren. Dazu muss lediglich ein Punkt im Raum bestimmt werden der als eben jener dienen soll. Es ist ebenso möglich Rotationssymmetrische Strukturen zu bilden.

Für die Optimierung bietet der Solver weitere Einstellmöglichkeiten, die das Ergebnis später direkt beeinflussen. Dazu gehören „Strut Density“, „Shape Quality“, „Unit System“, „Reduced Fixation Points“, „Advanced User Settings“ und „Start Space“.

Die „Strut Density“, in Kombination mit der Einstellung der Komplexität, bestimmt das Design des Optimierungsergebnisses. Die Auswahl "Dense" erzeugt einen detaillierteren Entwurf mit einer höheren Anzahl an Verstrebungen oder sehr dünnen Schalenstrukturen. Im Gegensatz dazu führt die Auswahl "Sparse" zu einem Ergebnis mit weniger, aber dafür dickeren Verstrebungen. Die Option "Medium" bietet einen Kompromiss zwischen den beiden.

Die „Shape Quality“ legt die Anzahl der durchzuführenden Iterationen fest. Bei der Einstellung "Preview" werden lediglich die ersten 16 Iterationen ausgeführt, um dem Benutzer einen Eindruck von der Richtung der Optimierung zu vermitteln. Die Option "Balanced" umfasst 64 Iterationen (bzw. 80 Iterationen bei einer Gussoptimierung) und ermöglicht eine vollständige Optimierung. Die Einstellung "Fine Tune" läuft über 70 Iterationen (100 Iterationen für Guss), was 6 (bzw. 20) Iterationen mehr als bei "Ausbalanciert" auf der höchsten Auflösungsstufe bedeutet. Diese zusätzlichen Iterationen verfeinern lediglich die Oberflächendetails des Optimierungsergebnisses und ermöglichen unter Umständen eine verbesserte Fertigung. „Unit system“ an dieser Stelle dient lediglich als zusätzliche Information, die in die Konfigurationsdatei der Optimierung eingetragen wird. Diese Auswahl beeinflusst weder die Einheiten der Geometrie noch andere Parameter.

Ist der Schalter für „Reduced Fixation Points“ auf „On“ gestellt, kann der Algorithmus überflüssige feste Fixpunkte aus der Lagerung reduzieren, die für die Einhaltung der Randbedingungen nicht notwendig sind. Feste Fixpunkte müssen daher als separate Elemente erstellt werden, was durch das „Graften“ und „Flatten“ des Eingabe- und Ausgabestreams

erreicht werden kann.

Die „Advanced User Settings“ ermöglichen es, die Optimierung, zusätzlich zu den regulären Parametern weiter zu beeinflussen. Normalerweise durchläuft die Optimierung mehrere Auflösungsstufen, wobei die Anzahl der Iterationen pro Stufe angepasst werden kann. Durch die erweiterten Einstellungen die Vorgaben für Strebendichte und Formqualität überschrieben werden. Es kann zum Beispiel mit „configuration.maxThickness=2“ die maximale Wanddicke oder auch mit „configuration.minThickness= 2“ die minimale Wanddicke genau eingestellt werden. Letztere Funktion eignet sich gut dafür, wenn das Ergebnis dazu neigt zu filigran für die Fertigung zu sein. Diese Optionen sind allerdings noch in der Testphase und können die Vorgabe nicht immer einhalten.

Als letzte Funktion für den Optimierungsprozess kann der „Start Space“ definiert werden. Statt vorher einen Designraum in Synera zu modellieren, kann eine CAD Datei als STL oder PLY importiert werden und als Designraum dienen. An diesem orientiert sich dann der Solver für die Optimierung. Wichtig ist, dass diese Funktion nur genutzt werden kann, wenn die „Advanced User Settings“ genutzt werden. Hexagon empfiehlt hierfür die Auflösung des Designs auf die zwei höchsten Stufen einzustellen. Zusätzlich kann der Solver mit einem Update des Grafikkartentreibers verbessert werden. Der „CUDA“-Treiber beschleunigt die Berechnungen des Solvers erheblich und ermöglicht eine parallele Rechenoperationen auf der GPU. Die Funktion „CPU-Threads“ bestimmt die Anzahl der „Threads“ eines Kerns die es ermöglichen mehrere Aufgaben gleichzeitig auszuführen.

5. Fertigungsverfahren Additive Manufacturing und Casting

Da in dieser Arbeit die Optimierungen hinsichtlich diverser Fertigungsrestriktionen betrachtet werden sollen, benötigt der „Topology Optimization“-Node ein Fertigungsverfahren anhand dessen sich die Optimierung orientiert. Dazu bietet Hexagon zu diesem Zeitpunkt zwei Optionen. Die Additive Fertigung und das Gussverfahren.

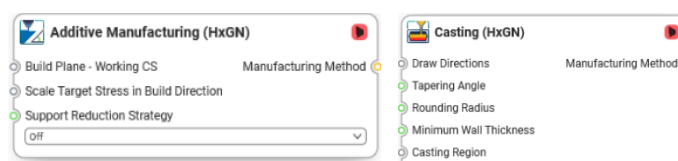


Abbildung 28 Synera AM Node und Casting Node (HxGN) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan

Beide Verfahren geben dem Optimizer die Möglichkeit die Restriktionen die sich aus dem jeweiligen Verfahren ergeben zu berücksichtigen. So werden die zu bildenden Strukturen angepasst, damit sie mit dem jeweiligen Verfahren auch fertigbar sind. So können zum einen die Startebene für einen 3D-Druck, die Zielspannung in Druckrichtung und die Support Strategie definiert werden. Die Einstellbarkeit des Winkels für den Überhang ist über die „advanced user settings“ möglich. Mit der „Support Reduction Strategy“ kann eingestellt werden wie stark Stützstrukturen minimiert werden sollen. Möglich sind entweder „off“ für Stützstrukturen sind frei wählbar, Low, Medium und High für immer stärker Stützstruktur Minimierung. Will man hier ein Bauteil optimieren, muss angegeben werden welche Stützstrukturstrategie verfolgt wird. Im Fall, dass so wenig wie möglich gewollt ist, sollte diese als „High“ angegeben werden.

In der Einstellung "High" der „Support Reduction Strategy“ wird der Algorithmus so angepasst, dass der Support für die additive Fertigung deutlich minimiert wird. Dies geschieht, aller Wahrscheinlichkeit nach, durch eine gezielte geometrische Analyse zur Reduzierung von Stützstrukturen, eine Optimierung der Bauteilorientierung sowie eine Reduktion der Supportdichte und -kontaktpunkte. Zusätzlich wird der Penalty Factor erhöht, wodurch der Algorithmus größere Abweichungen toleriert, ohne die Stabilität des Drucks zu gefährden. Danach muss noch die Druckrichtung betrachtet werden, indem eine Basis Ebene vorgegeben wird die als Ausgangspunkt für den Druck dient. Wie im theoretischen Teil beschrieben, sind additiv gefertigte Bauteile anisotrop und besitzen durch den Schichtaufbau minimalste Kerben,

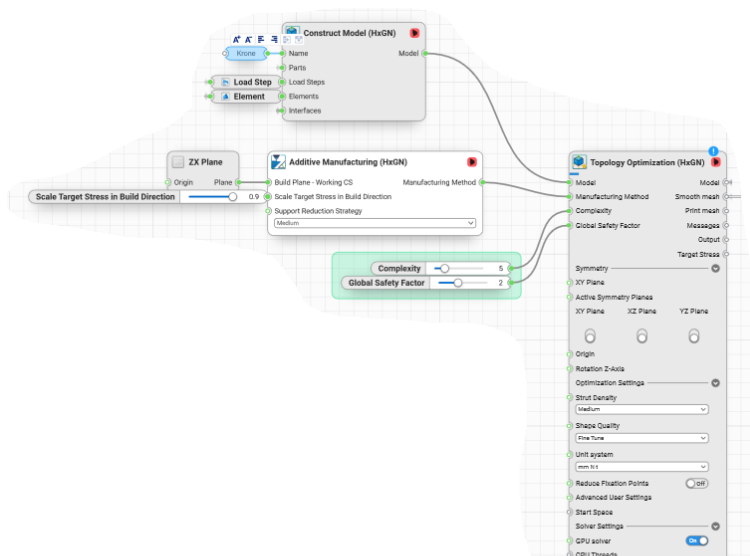


Abbildung 29 Synera Beispiel Workflow, eigene Darstellung

die ,für Spannungsspitzen sorgen und je nach Druckverfahren, zwischen den Schichten keinen optimalen Halt liefern. Zu diesem Zweck sollte die Ebene von der aus gedruckt wird so gewählt werden, dass die Schichten Orthogonal dazu zur Lastrichtung verlaufen und die besseren Eigenschaften genutzt werden. Für den Casting Algorithmus benötigt der Solver ebenfalls Input. Es müssen die Gushälften mit der Trennebene und die Entformungsrichtung angegeben werden. Das ist der minimale Input für eine Gussoptimierung. Es können aber auch der „Taper Angle“ für die Entformung oder auch der „Rounding Radius“ für Rundungen definiert werden. Eine Besonderheit bei diesem Verfahren von Hexagon Emendate ist die Signalisierung, dass die Gushälften mit der Entformungsrichtung, Probleme verursachen können.

6.1.4 Altair OptiStruct Solver

Der Solver Altair OptiStruct arbeitet, im Gegensatz zu Hexagon, mit einem separaten FEM Prozess. Daher ist die Abfolge für den Workflow auch unterschiedlich. Es wird mit der Vorgabe des DS und NDS begonnen, geht weiter mit einer FEA Analyse und Ende mit der Optimierung durch den Altair OptiStruct Solver. Es folgen die relevantesten Nodes für die Optimierungen.

1. Meshing

Bevor die Optimierung ablaufen kann, muss das vorgegebene Modell in einer FEM Analyse berechnet werden, damit die vorhandenen mechanischen Spannungen sichtbar werden und der Solver damit arbeiten kann. Dieser Node benötigt als Input lediglich die CAD Geometrien und die Größe der Finiten Elemente. Diese lässt sich variabel anpassen. Je feiner die Elemente, desto aufwändiger die Berechnung, aber auch desto besser sind die Ergebnisse.

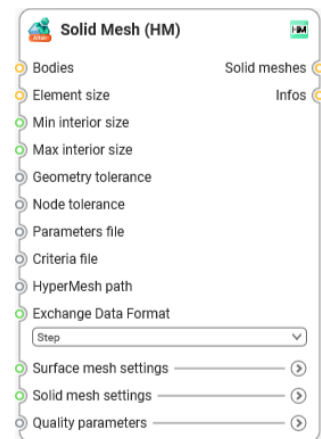


Abbildung 30 Synera Solid Mesh Node (HM) Screenshot Synera, Version Judicious Juracan

2. Solid Part

Das Solid Part generiert aus dem Meshing ein festes Teil. Dieses kann je nach Bedarf auf Design und non Design Bereich aufgeteilt werden. Das ist abhängig davon welche Geometrien als Grundlage dienen. Als Input benötigt dieser Node das Modell aus dem Meshing und die Materialeigenschaften, die in einem speziellen Node angegeben werden.

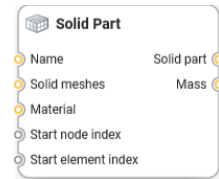


Abbildung 31 Synera Solid Part
Node Screenshot Synera,
Version Judicious Juracan

3. Construct Model

In diesem Node werden wie bei Hexagon die Teile oder auch Parts genannt, die Elemente, Tolerance und anliegenden Lasten zusammengeführt und in ein für den Solver nutzbares Format übersetzt und zusammengefasst. Wichtig ist, dass alle Daten die eingebracht werden einzigartige Namen haben. Etwa zwei Kräfte die beide mit „Force“ bezeichnet werden, könnten nicht genutzt werden. Daher ist es notwendig Namen die ggf. mehrfach vorkommen zu nummerieren oder anders zu deklarieren, damit der Solver diese auch nutzen kann.

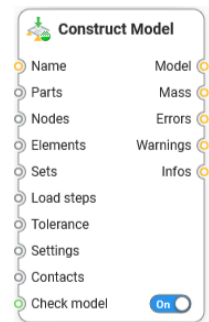


Abbildung 32 Synera
Construct Model Node
Screenshot Synera, Version
Judicious Juracan

4. Altair OptiStruct FEA Solver

Der „FEA Solver“ Nutzt das aus dem „Construct Model“ entstandene Modell mit allen darin befindlichen Daten und berechnet das FEA Modell. Je nach Auflösung, kann dies ein paar Sekunden bis hin zu ein paar Minuten dauern. Gelegentlich tritt hier eine Fehlermeldung auf, dass diverse Nodes bzw. Elemente nicht berechnet werden konnten und bricht dann die Berechnungen ab. Da hilft es die Auflösung anzupassen. So wird das Meshing feiner und die Fehlermeldung sollte verschwinden. Ggf. muss auch über „Arguments“ der Befehl „-check no“ gegeben werden. So wird die Elementqualität von Altair OptiStruct nicht mehr überprüft, sondern direkt die Berechnungen vorgenommen. Der Elementcheck ist ein Kriterium damit das Modell berechnet wird. Mit der „Check no“ wird dieses Kriterium außer Kraft gesetzt.

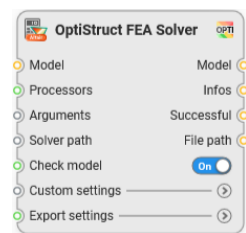


Abbildung 33 Synera
OptiStruct FEA Solver Node
Screenshot Synera, Version
Judicious Juracan

5. Solid Topology Variable

Der „Solid Topology Variable“ Node besteht aus mehreren Bereichen mit Variablen, die verwendet werden können um dem Optimizer Vorgaben zu machen welche Randbedingungen und Ziele gelten. Es werden dabei folgende Variabel-Bereiche unterschieden:

1. Member size

Mit „Member Size“ lassen sich die minimalen und maximalen Durchmesser der gebildeten Strukturen steuern. Dies ist besonders dann sinnvoll, wenn zu dünne Elemente nicht erwünscht sind oder durch das Fertigungsverfahren eine Mindestdicke vorgegeben wird. Ebenso lassen sich die Abstände zwischen den Strukturen, durch die „Minimum gap“ steuern. Anwendbar ist dies zum Beispiel um eine Struktur zu entwickeln die für das Fräsen eher geeignet ist.

2. Symmetries

Mit „Symmetries“ werden die Symmetrien des Bauteils gesteuert. Dazu wird lediglich eine einzige Ebene angegeben. Sollen weitere Ebene folgen muss die Zahl der Symmetrieebenen definiert werden. Diese verwenden dann den Ursprung und die Ausrichtung der ersten Ebene um entsprechen die Orthogonale dazu zu bilden. Es ist dabei ein maximum von drei Symmetrieebenen möglich. Es ist allerdings sinnvoll nicht allzu viele Symmetrien vorzusehen, da es die Optimierung komplexer gestaltet und ggf. dazu führt, dass keine angemessene Lösung gefunden werden kann oder die Berechnungsdauer sich hinzieht. Zusätzlich zu den standardisierten Symmetrien sind auch zyklische Symmetrien möglich. So lassen sich rotationssymmetrische Bauteile konstruieren. Mit der „Cyclic repetitions“ ist die Zahl innerhalb eines Zyklus zu definieren.

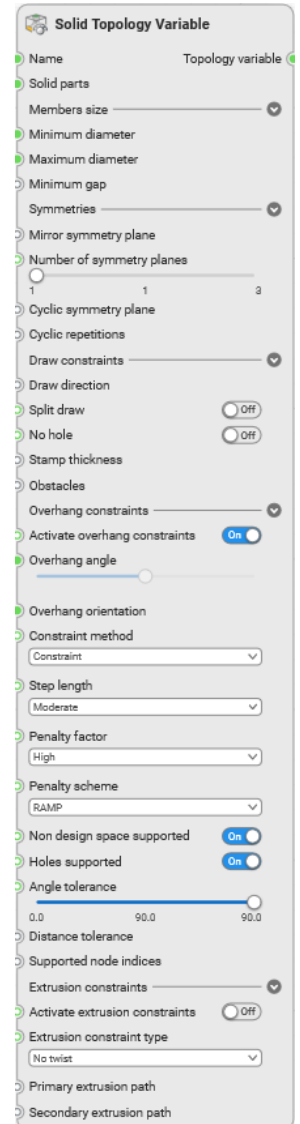


Abbildung 34 Synera Solid Topology Variable Node Screenshot Synera, Version Judicious Juracan

3. Draw constraints

Die „Draw Constraints“, sind besonders dann zu verwenden, wenn es um Gussteile geht. Sie definieren zum Beispiel eine Schnittebene, welche dazu dient zwei Hälften für die Gussformen zu konstruieren. Zusätzlich lässt sich mit Hilfe von „no hole“, definieren, dass keine Löcher in der Ausziehrichtung entstehen dürfen, was die Entformung erleichtert und ggf. auch unnötige Kerne verhindert. Um etwaige Hindernisse mit einzubeziehen, die nicht als Designraum definiert wurden, aber Teil des Bauteils sind, wie der Nicht Designraum, muss die Funktion Obstacles verwendet werden. Diese liefert dem Solver die Information, dass Hindernisse in der Ausziehrichtung sind und beachtet werden müssen.

Zuletzt lässt sich noch mit der „Stamp thickness“, die Dicke der Schale einstellen. Altair empfiehlt hier eine Minstdicke von mindestens drei Mal der Elemente des Meshings.

4. Overhang Constraints

Die „Overhang Constraints“ sind dazu da eine Struktur zu entwickeln, die vor allem für den 3D Druck geeignet ist. Die wichtigste Variablen dafür ist der Überhangswinkel, der den minimalen Winkel vorgibt, der in Überhangsrichtung vorhanden sein muss. So lässt sich beispielsweise verhindern, dass zu viele Stützstrukturen benötigt werden. Wie genau der Solver vorgeht um zu evaluieren welche Elemente entfernt werden lässt sich nur vermuten. In der Theorie wird der Algorithmus während der Optimierung jedes Element des Modells analysieren, indem es den Winkel zwischen der Normalen des Elements und der definierten Überhangsrichtung berechnet. Wenn dieser Winkel den vorgegebenen Grenzwert (z. B. 45 Grad) überschreitet, wird das entsprechende Element als problematisch eingestuft. Über einen Penalisiertungsmechanismus, der Elemente mit zu großen Überhängen „bestraft“, werden solche Bereiche schrittweise entfernt oder angepasst, es sei denn, sie sind für die strukturelle Integrität entscheidend. Der gesamte Prozess ist iterativ aufgebaut, wobei der Optimierungsalgorithmus kontinuierlich die Materialverteilung verfeinert, um sowohl die strukturellen Leistungsziele (z. B. Minimierung des Gewichts oder Maximierung der Steifigkeit) als auch die Überhangsrestriktionen zu berücksichtigen. Dadurch wird sichergestellt, dass das resultierende Design nicht nur mechanisch effizient, sondern auch druckbar ist, ohne aufwändige Stützstrukturen zu erfordern.

In manchen Fällen kann es vorkommen, dass die Überhangs-Randbedingung nicht durch die SIMP Methode vollständig erfüllt werden kann. Dies liegt an der Eigenschaft von SIMP keine sanften Übergänge innerhalb der Struktur zu ermöglichen und teilweise die Dichtenverteilung weniger klar definiert ist wie mit RAMP. Mit der Constraint Methode lässt sich die „Strenge“ der Umsetzung von Randbedingungen definieren. Ist die Vorgabe von 45° also nicht vollständig zu beachten und Stützstrukturen sind später ggf. teils erlaubt, so bietet es sich an „Penalty“ als Methode zu verwenden. Diese erlaubt Verstöße gegen die Randbedingung. Die Methode „Constraint“ (tatsächlich ist Constraint eine Constraint-Methode) in Kombination mit RAMP, erlaubt keinerlei Verstöße. Sie macht es dem Solver allerdings deutlich schwerer Ergebnisse zu erzielen, je nach Anwendungsfall kann es vorkommen, dass keine Lösung gefunden wird.

Die „Penalty Methode“ definiert wie viele Verstöße gegen die Randbedingungen erlaubt sind. Es lassen sich hier für Stufen von „Low“, „Medium“, „High“ und „Ultra“ einstellen. „Low“ erlaubt viele Verstöße gegen die Randbedingungen. „Ultra“ erlaubt nur kaum bis keine Verstöße gegen die Randbedingungen. Diese Einstellungen haben auch direkten Einfluss auf die Struktur. Je höher die Einstufung, desto mehr Material wird in den Randzonen entfernt.

Je nach Einstellung dieser Parameter kann es vorkommen, dass die klassische SIMP-Methode nicht in der Lage ist eine sinnvolle Lösung zu finden die alle Randbedingungen erlaubt. Daher lassen sich für Altair sowohl die SIMP als auch die RAMP Methode, welche ebenso in der Theorie beschrieben wurde, verwenden. RAMP ermöglicht es durch die Angepasste Herangehensweise feinere Übergänge zu gestalten und so Randbedingungen wie die 45° , wenn sie erzwungen werden, eher einzuhalten und die Struktur entsprechend auszubilden.

Um zu definieren, dass der NDS unterstützt wird kann die Funktion „Non design space supported“ mit „on“ eingestellt werden. Dies hat zur Folge, dass der Design Bereich unter Umständen den NDS nicht mehr berührt und so keine vollständige Struktur entsteht. Mit „Holes Supportet“ lässt sich zusätzlich einstellen, dass Löcher in der Struktur erlaubt oder nicht erlaubt sind. Wichtig ist, dass die Funktion Holes Supported nur dann funktioniert, wenn auch der Design Bereich unterstützt wird. Als weiterer Parameter lässt sich noch die „Angle Tolerance“ von 0° bis 90° einstellen. Sie identifiziert jene Elemente des Meshings, auf die die Überhangsrestriktion nicht angewandt wird.

Die beiden letzte Funktionen „Distance tolerance“ und „Supported node indices“ charakterisieren zum einen die Distanz der Designschichten auf die die Überhangsrestriktion nicht angewendet wird und zum anderen werden Elemente, innerhalb des Modells, mit Hilfe des Indices definiert, die als unterstützt gelten

Alle Funktionen im Zusammenspiel lassen sich so einstellen, dass eine Struktur durch die Optimierung entsteht die den Restriktionen der Additiven Fertigung gerecht wird und so fertigbare Vorschläge entstehen.

5. Extrusion Constraints

Die „Extrusions Constraint“ kann dem Solver vorgeben, welchen Weg die Strukturen gehen soll. Dabei wird unterschieden zwischen „Primary extrusion path“ und „secondary extrusion path“. Beide werden, mit mindestens zwei Punkten vorgegeben und definieren genaue Punkte oder Wege, die von wem Solver eingehalten werden müssen. Damit lässt sich die Struktur, die entstehen soll, besonders Präzise steuern.

Sind die Parameter eingestellt, benötigt der Node lediglich noch einen Namen und das Meshing des Designraumes. Auf dieses werden dann die Vorgaben angewendet für die Optimierung.

6. OptiStruct Optimizer

Der OptiStruct Optimizer ist der Kern des ganzen Workflows, der auf allem vorherigen aufbaut. Hier werden das FEA Modell, die Topologie Variablen, die Randbedingungen und Ziele zusammengefasst. Aus diesen Daten berechnet dann der Solver, mit Hilfe der SIMP oder RAMP Methode (für mehr siehe Theorie), das Optimum für das Bauteil. Das kann wie auch bei Hexagon je nach Komplexität, Auflösung und Größe des Bauteils ein paar Minuten bis zu einer halben Stunde dauern (Erfahrungswerte). Wichtig ist hier zu erwähnen, dass die Ergebnisse besser und klarer werden umso feiner das Meshing ist. Das heißt es sollte ein gutes Maß an Feinheit gewählt werden. Will man besonders klare Strukturen, gibt man für die minimalen und maximalen Durchmesser die gleichen Werte an. Dann dauert zwar die Rechnung etwas länger, aber das Ergebnis wird unter Umständen besser.

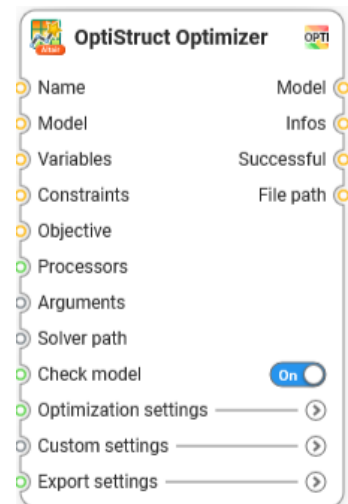


Abbildung 35 Synera OptiStruct Optimizer Node Screenshot
Synera, Version Judicious Juracan

Zur Beeinflussung der Struktur liefert der Node lediglich noch die Zahl der Iterationen. Diese lassen sich auf ein maximum von 100 Iterationen anheben und sorgen ggf. für noch bessere Ergebnisse.

Eine zusätzliche Einstellung ist die „Discrete Topology“. Die Hauptunterschiede zwischen diskreter und kontinuierlicher Topologie Optimierung (also der Standard Funktion mit SIMP und RAMP) liegen in der Art und Weise, wie das Material im Designraum dargestellt und optimiert wird. Die diskrete Topologie nutzt binäre Designvariablen, um Materialverteilung zu steuern, während die kontinuierliche Topologie eine glatte Übergangszone zwischen Material und Leerraum ermöglicht. Damit lässt sich allerdings keine Struktur entwickeln, die an Überhangsrestriktionen gebunden ist. Daher ist sie nicht für Konstruktionen geeignet, die additiv gefertigt werden sollen.

7. Result Isomesh

Im letzten Node, dem „Result Isomesh“, wird das Ergebnis der Optimierung dargestellt. Mit diesem lässt sich nochmal etwas „Feinarbeit“ leisten, indem der Iso-Wert angepasst wird. Dieser sorgt dafür, dass mehr oder weniger Material vorhanden ist. Genauer ist dieser ein Schwellwert, der vorgibt, welche Dichten im Design als festes Material vorhanden sein sollen. Ein hoher Iso-Wert führt dazu, dass nur Dichten Nahe 1 (siehe Theorie für mehr) vorhanden sind. Ein geringerer Wert lässt mehr Material mit geringerer Dichte zu, was zu einem massiveren Bauteil führt. Das kann hilfreich sein, wenn das vorhandene Ergebnis zu klobig ist oder ggf. auch zu dünn. Die besten Ergebnisse erreicht man in der Regel mit einem Iso-Wert von 0,3 bis 0,6 erreichen. Das sind allerdings Erfahrungswerte und die auch von dem gegebenen Bauteil abhängig. Für die Optimierung sind die „Objectives“ und „Constraints“ noch von entscheidender Bedeutung. Sie geben vor welche Ziele verfolgt und

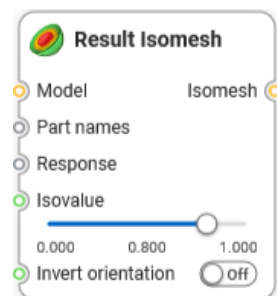


Abbildung 36 Syner Result Isomesh Node Screenshot
Synera, Version Judicious
Juracan

welche Randbedingungen beachtet werden sollen. Sie werden nach der Auswahl mit dem Optimizer verbunden und beeinflussen das Ergebnis maßgeblich.

1. FEA Objectiv

Dient dazu ein Optimierungsziel vorzugeben, auf welches der Solver hinarbeiten soll.



Abbildung 37 Synera FEA Objective Node Screenshot
Synera, Version Judicious
Juracan

2. FEA Constraint

Definiert die Randbedingungen die der Solver bei der Optimierung beachten

muss.

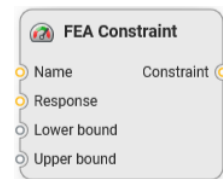


Abbildung 38 Synera FEA Constraint Node Screenshot Synera, Version Judicious
Juracan

Die Constraints und Objectives können variiert werden. Möglich sind Ziele, wie die Reduzierung der Masse unter Berücksichtigung der mechanischen Spannungen oder Verschiebungen unter der Last. Ebenso ist es möglich Vorgaben zu machen, dass das Endvolumen einen bestimmten Prozentsatz des Originalvolumens nicht über oder unterschreiten darf. Wie genau die Ziele und Randbedingungen definiert werden ist abhängig vom Use Case. Für eine genauere Beschreibung der Constraints und Objectives, die mit Altair OptiStruct möglich sind siehe im Anhang „Node Bibliothek“.

7 Untersuchungen der Solver und Ergebnisse

Nachdem nun alle für die Analyse erforderlichen Grundlagen dargelegt und eine erste Einführung in den Aufbau der Workflows gegeben wurde, werden in den folgenden Kapiteln die Untersuchungen an zwei Anwendungsfälle vorgestellt. Anhand dieser Anwendungsfälle wurden die Leistungsfähigkeit, die Vor- und Nachteile sowie die charakteristischen Eigenschaften der beiden Solver eingehend analysiert. Hierfür wurden spezifische Bauteile zur Optimierung ausgewählt. Da der Fokus dieser Untersuchung auf dem Vergleich der Leistungsfähigkeit der beiden Solver lag, werden vereinfachte Lastfälle verwendet, die für diesen Zweck ausreichend waren. Für die Analysen wurden vorab Kriterien definiert, die als Hilfestellung dienten, um die entstandenen Strukturen zu untersuchen. Die Optimierungen

wurden alle jeweils auf die verschiedenen Funktionen der beiden Solver hin angepasst und ein vielversprechendes Design für die nachfolgende Fertigungsanalyse ausgewählt. Alle Anwendungsfälle wurden unter den gleichen Restriktionen getestet um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Da eine Vorstellung jedes einzelnen Designs den Rahmen der Arbeit sprengen würde, werden hier nur ausgewählte Optimierungen vorgestellt an Hand derer die Arbeitsweisen der Solver analysiert werden sollen. Ein Vergleich der Ergebnisse samt tabellarischer Aufführung dieser folgt im Anschluss an die Analysen.

7.1 Anwendungsfälle

1. Fahrrad Gabelkrone

Die Gabelkronen bei Fahrrädern bestehen in der Regel aus einer Stahllegierung, da sie, zusammen mit anderen Bereichen der Fahrräder, besonders hohe Lasten aufnehmen müssen. Für den Fall eines Rennrades ist es ebenso von großer Bedeutung, die Räder so leicht wie möglich und gleichzeitig so robust wie möglich zu gestalten. Das heißt Bauteile die besonders schwer sind, bieten eine gute Möglichkeit sie zu optimieren und

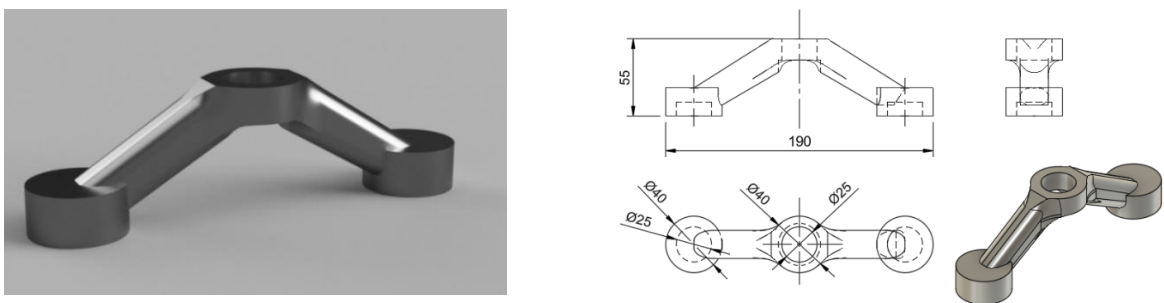


Abbildung 39 Gabelkrone/Zeichnung

leichter zu machen. Nimmt man das Beispiels eines Radlers, der mit 30km/h, bei einer Masse von 80 Kilogramm auf einen Bordstein knallt, dann wirkt allein durch die Geschwindigkeit und die Masse eine Kraft von etwa 5000 N auf die Lager der Gabelkrone. Diese Kraft wird dabei symmetrisch auf die beiden Ausläufer der Gabelkrone verteilt. Für diesen Fall haben die meisten Räder eine Federung in der Gabel verbaut um solche Stöße abzumindern. Je nach Federung können sie bis zu 70% der

Kraft abfedern. Geht man in diesem Fall von einer mittleren Federung von ungefähr 40% aus, so bleibt nach wie vor eine wirkende Kraft von etwa 3000 Newton.

Sprich es wirkt eine Last von 1500 Newton pro Seite (siehe Abbildung 40) Das Startgewicht der Krone liegt bei etwa 890 Gramm.

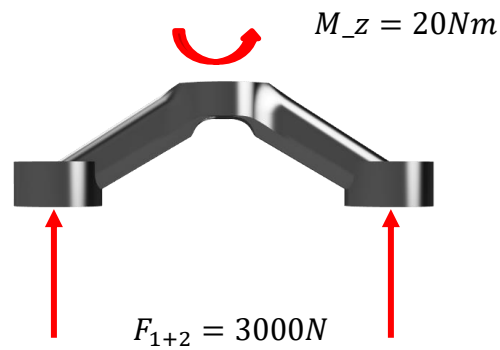


Abbildung 40 Gabelkrone Lasten

Tabelle 1 Werkstoffeigenschaften Gabelkrone

Werkstoffeigenschaft	Wert [Einheit]
Dichte	$7,85[\frac{g}{cm^3}]$
E- Modul	$210[GPa]$
Poisson Zahl	0,3
Maximale zul. Spannung	$0,375[GPa]$
Maximale Verschiebung	$0,0867[mm]$

Für die FEA liegen, für die Gabelkrone die Simulationen in der Abbildung 41 vor. Wie zu erwarten konzentrierte sich die maximale Last auf die Punkte mit dem größten Hebel und nimmt Richtung Ausläufer ab. Das Ziel für die Optimierung war es ähnliche, wenn nicht bessere mechanische Eigenschaften zu erreichen.

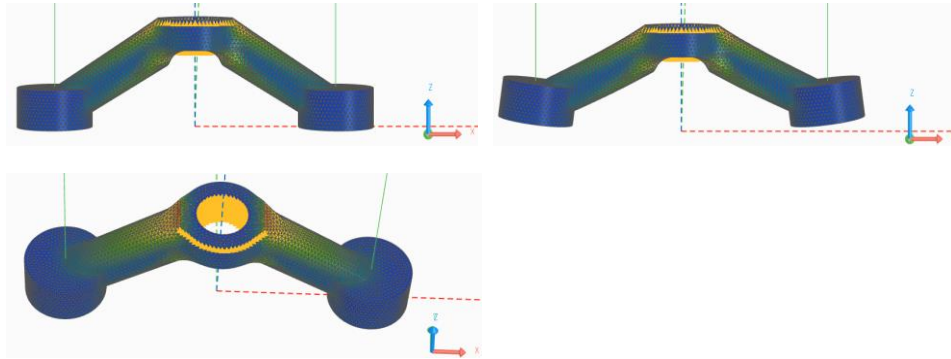


Abbildung 41 Gabelkrone FEA

2. Rohr-Flansch Konstruktion

Als zweiten Use Case wurde eine einfache Rohrkonstruktion mit Flansch ausgewählt. Grund hierfür ist eine potentielle Schwachstelle des Hexagon Solvers.

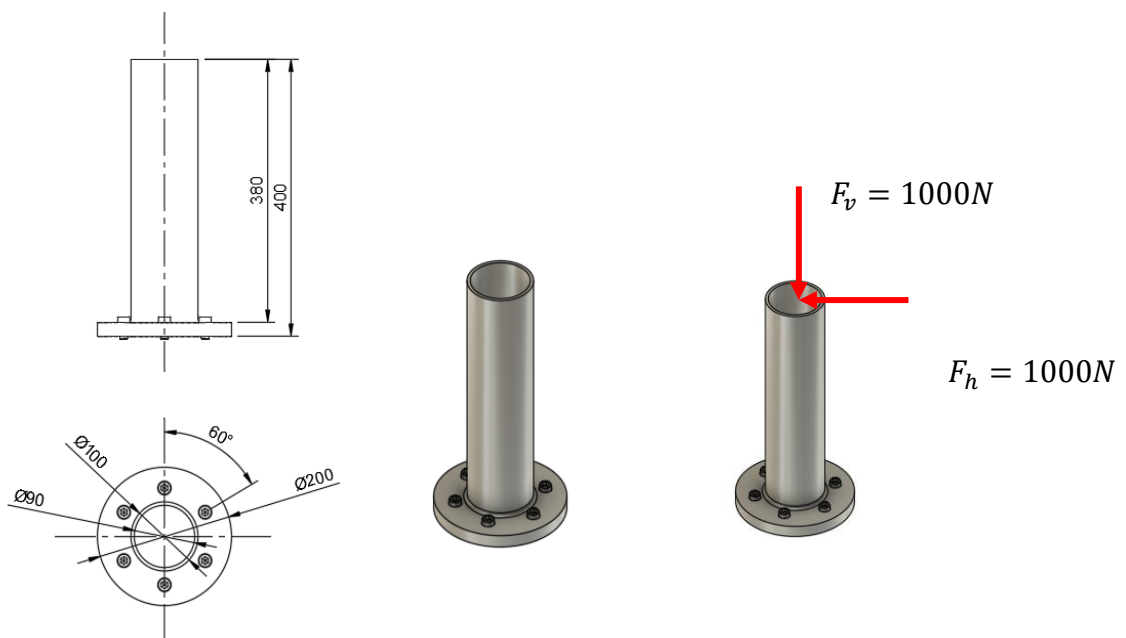


Abbildung 42 Rohrflansch Zeichnung und Lasten

Laut Aussage des Herstellers hat der Solver auf Grund seines spannungsbasierten Vorgehens, Probleme bei besonders dünnen Strukturen. Daher wurde das Rohr nicht mit einer gleichbleibenden Wandstärke getestet, sondern diese wurde variiert. Begonnen wird mit einer Dicke von fünf Millimetern. Diese Dicke sollte mit jeder Optimierung um einen Millimeter reduziert werden. Auf diese Weise sollte ein Bereich ausfindig gemacht werden, ab dem der Solver nicht mehr in der Lage ist eine sinnvolle Optimierung vorzunehmen. Für die Optimierung mit Altair wurden zwei verschiedene Ziele gesetzt. Das erste war die Maximierung der Steifigkeit bei gleichzeitiger Minimierung der Masse und einer gleichmäßigen Verteilung der mechanischen Spannungen sein. Das zweite die Begrenzung des Volumens bei gleichzeitiger Minimierung der Nachgiebigkeit.

Tabelle 2 Werkstoffeigenschaften Rohrflansch

Werkstoffeigenschaft	Wert [Einheit]
Dichte	$7,85[\frac{g}{cm^3}]$
E-Modul	$210[GPa]$
Poisson Zahl	0,3
Maximale zul. Spannung	$0,375[GPa]$

7.2 Workflows

In diesem Kapitel werden die Workflows für Altair OptiStruct und Hexagon Emendate vorgestellt, wobei der Fokus auf den relevanten Aspekten beider Verfahren liegt. Da die vollständige Darstellung der Workflows mit allen Details zu umfangreich wäre, werden hier nur die grundlegenden Prinzipien, sowie die wichtigsten Abschnitte beschrieben und abgebildet. Auf diese Weise lassen sich die zentralen Unterschiede und Besonderheiten der beiden Ansätze besser verdeutlichen.

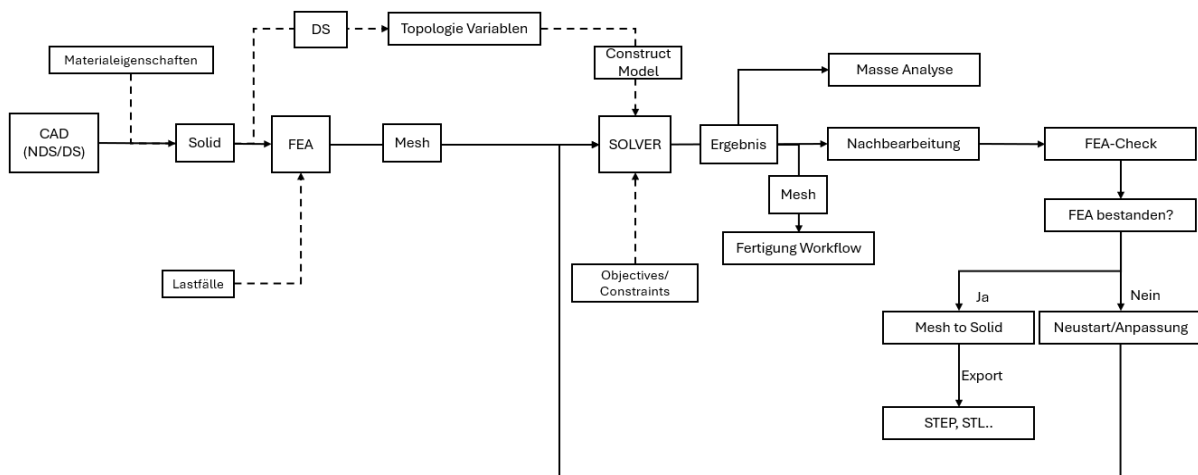


Abbildung 43 Vereinfachter Workflow Altair OptiStruct

Der Grundaufbau von allen Workflows dieser Arbeit, ist fast der selbe. Die zentralen Unterschiede liegen im Umgang mit dem optimierten Ergebnis, dem zugrunde liegenden CAD-

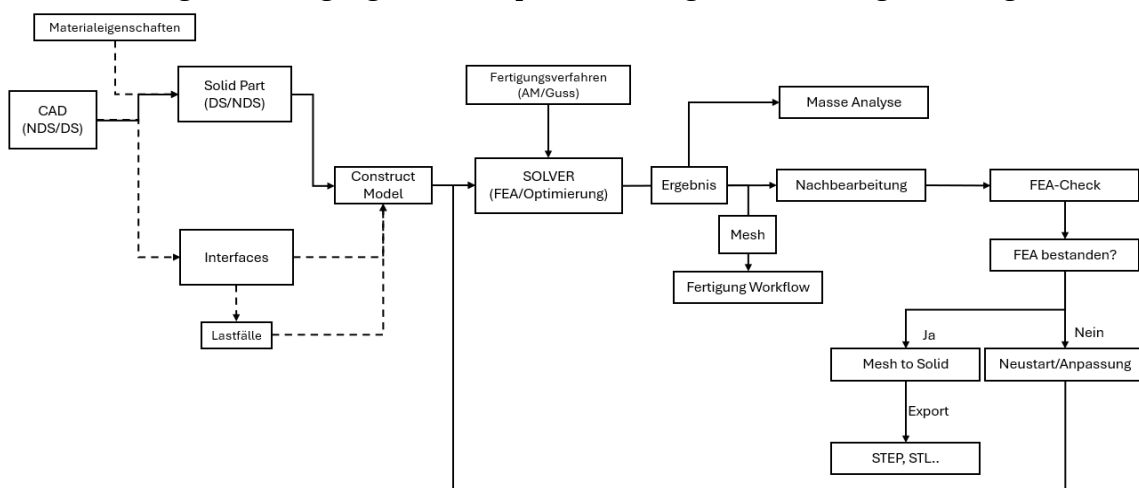


Abbildung 44 Vereinfachter Workflow Hexagon Emendate

Modell und dem verwendeten Solver. Während bei Altair OptiStruct für den Optimierungsprozess eine separate FEA erforderlich ist, die anschließend zusammen mit den Topologie-Variablen in den Solver integriert wird, folgt Hexagon Emendate (siehe Abbildung 44) einem anderen Ansatz. Hier wird die FEA direkt in die Optimierung eingebunden, was den Prozess effizienter gestaltet. Für diese Optimierung müssen ein „Solid Part“ sowie die entsprechenden Interfaces, einschließlich der Lastfälle, implementiert werden. Die Interfaces repräsentieren dabei die Flächen oder Volumenelemente, die den Kontakt zwischen Designraum (DS) und Nicht-Designraum (NDS) definieren. Ohne die explizite Festlegung dieser Interfaces generiert der Solver eigenständig Kontaktflächen, was potenziell zu Fehlern führen kann.

Abschließend wird der Solver mit einem Fertigungsverfahren verknüpft, das alle relevanten Fertigungsrestriktionen enthält (siehe 6.1.3).

Nachdem die Solver und die zugehörigen Nodes definiert wurden, folgt eine Verzweigung in drei Richtungen. In der ersten wird ein kleiner Workflow zur Berechnung der neuen Masse implementiert, um die erzielte Gewichtseinsparung zu ermitteln. Anschließend folgt ein Workflow, der die jeweiligen Fertigungsverfahren – Guss, additive Fertigung und Fräsen – integriert, wobei letzteres in diesem Kontext eine geringere Relevanz besitzt. Zur Validierung der Fertigungstauglichkeit enthält der Fertigungsworkflow die „Additive Design Toolkit“-Nodes, die die analysierte Struktur, auf Basis der Druckebene überprüfen. Dabei werden Stützstrukturen, kritische Elemente für die Fertigung sowohl von der Druckebene zum Bauteil als auch innerhalb des Bauteils identifiziert. Zusätzlich können die Distanzen zwischen den einzelnen Strukturen und auch deren Dicken beurteilt werden (weitere Informationen hierzu in Kapitel 10).

Um das optimierte Bauteil genauer analysieren zu können, schließt sich ein Workflow zur Nachbearbeitung an, da einige Ergebnisse, insbesondere von Altair OptiStruct, oft nicht direkt verwendet werden können. Hierbei wird das Mesh des Ergebnisses in einen soliden Körper umgewandelt. Bei Altair OptiStruct reicht eine einfache „Mesh-to-Solid“-Transformation häufig nicht aus, weshalb eine Rekonstruktion erforderlich ist. Das Modell wird dabei in eine „SubD“-Geometrie umgewandelt, um den Designraum zu durchlaufen und das Solid-Modell daraus zu gewinnen. Je nach Auflösung kann es vorkommen, dass der Körper nicht vollständig

als festes Volumen abgebildet wird und offene Flächen enthält. Um diese zu schließen, wird im Vorfeld durch ein „Voxel Meshing“ eine zusätzliche Materialschicht aufgetragen.

Nach der Umwandlung in einen soliden Körper durchläuft das Modell eine erneute FEA, inklusive Meshing, um die neuen Optimierungsergebnisse zu überprüfen. Wenn das Design die FEA besteht und verbesserte Eigenschaften aufweist, die zufriedenstellend sind, kann es beispielsweise als STEP- oder STL-Datei exportiert werden. Sollte es die FEA jedoch nicht bestehen, können die Optimierungsparameter angepasst und der Prozess erneut durchlaufen werden. Der Vorteil eines integrierten Workflows liegt darin, dass Änderungen in der Geometrie oder den Lastfällen nicht separat in verschiedene Workflows übertragen werden müssen. Das Modell durchläuft den gesamten Prozess und liefert am Ende alle relevanten Ergebnisse direkt.

7.2.1 Einstiegsbeispiel Fahrrad-Kurbel

Nachdem nun die theoretischen Hintergründe und die Funktionsweise von Synera erläutert wurden, wird hier ein einfaches Anwendungsbeispiel aufgezeigt, das den Ablauf einer topologischen Optimierung in Synera einschließlich der Ergebnisse veranschaulicht. Für dieses Beispiel wurde der Altair OptiStruct Workflow verwendet. Wichtig, es geht hier lediglich darum, den Ablauf grob aufzuzeigen für das bessere Verständnis der nachfolgenden Anwendungsfälle

In diesem Beispiel wird die Fahrrad Kurbel, als zu optimierendes Bauteil verwendet. Die ursprüngliche Masse der Kurbel beträgt etwa 250 Gramm und das Material ist eine Aluminium Legierung. In den folgenden Abbildungen sind alle relevanten Maße und Kräfte angegeben, die zur Umsetzung in Synera benötigt werden.

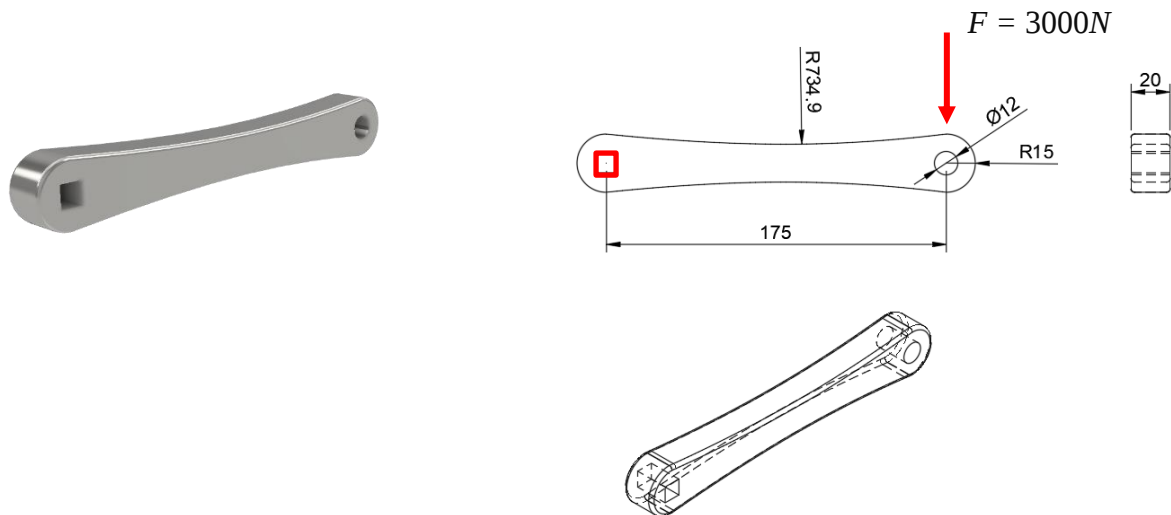


Abbildung 45 Fahrradkurbel Zeichnung und Lasten

Die Vorgehensweise für die Optimierung sieht aus wie folgt:

1. Den DS und NDS in Synera erstellen. Dabei sollten Details wie Kanten, Bohrungen etc. direkt mit eingeplant werden um Probleme bei der späteren Optimierung und der Nachfolgenden Fertigung zu vermeiden. Es wird begonnen mit dem Designraum in Der Designbereich sollte gemäß den vorher besprochenen Prinzipien ausreichend groß gehalten werden, um dem Algorithmus die Möglichkeit zu geben entsprechende Optima identifizieren zu können. Das dient aber auch dazu, die Grenzen des Funktionsraumes einzuhalten, damit das spätere Bauteil keine anderen Funktionsräume verletzt oder in der Ausübung seiner Funktion blockiert wird
2. Es folgt die FEM Analyse. Dafür müssen Lagerungspunkte und äußere Kräfte eingebracht werden. Ebenso die Materialeigenschaften wie Dichte, E-Modul, maximal zulässige Spannung des Materials und die Poissonzahl. Hierfür werden standardmäßig isotrope Materialeigenschaften verwendet. Allerdings sind auch Anisotrope möglich. Es können auch andere Materialeigenschaften wie das Thermische Verhalten, Referenztemperaturen etc. berücksichtigt werden. Nachdem die Randbedingungen alle definiert wurden, berechnet der FEM Solver alle Finiten Elemente und färbt sie entsprechend ihrer mechanischen Spannungshöhe ein.

Anhand des dabei entstehenden Bildes lassen sich oft auch schon theoretische Strukturen erahnen, denen der Optimierungs-Solver später folgen kann.

3. Zuletzt folgt der Workflow für die Optimierung. Da es hier nur um die Darstellung des grundlegenden Prinzips geht, wird lediglich ein Workflow für Altair verwendet und Hexagon erst in den folgenden Anwendungsfällen betrachtet wird. Begonnen wird mit dem Node „Solid Topology Variable“. Wie bereits oben beschrieben, werden in diesem diverse Variablen definiert, die auf das berechnete FEA Modell angewandt werden. Für dieses Beispiel wurden lediglich der Überhangswinkel von 45° , die Überhangsrichtung in X-Richtung, die minimalen und maximalen Durchmesser der Strukturen und eine Y-Z Symmetrieebene definiert. Ist dies geschehen müssen nun die sogenannten Constraints und Objectives definiert werden. Dazu wurden hier die Minimierung der Nachgiebigkeit der Struktur, die Reduzierung des Gesamtvolumens auf nur 30% und die Constraint Methode definiert. Die Methode ist entscheidend dafür wie sehr sich der Solver an die 45° -Vorgabe halten muss. Verwendet der Solver SIMP und „Penalty“ als Methode, so sind Verstöße gegen die Restriktionen erlaubt. Wird stattdessen „Constraint“ als Methode verwendet, so muss die Optimierungsmethode RAMP, statt SIMP verwendet werden. Grund dafür ist, dass „Constraint“ keine Verstöße zulässt und SIMP damit oftmals keine Ergebnisse liefern kann. Es lassen sich auch weitere Randbedingungen und Ziele, wie die maximale Von-Mises-Spannung, die Minimierung der Masse oder die maximale Verschiebung definieren. Für dieses Beispiel genügen zur Anschauung die beiden ersteren. Im letzten Schritt werden nun die definierten Variablen, Constraints, Objectives und das FEA Modell in den Altair OptiStruct Solver eingespeist.

Dieser beginnt mit der Berechnung des Optimums sobald alle notwendigen „Threads“ also Verbindungen mit den Daten aufgebaut sind.

Die Berechnung kann je nach Auflösung und Komplexität des Bauteils und der Rahmenbedingungen Zeit in Anspruch nehmen. Für die Werte der entsprechenden Constraints, Objectives und Methode ab siehe [Tabelle....](#)

Tabelle 3 Constraints und Objectives Fahrradkurbel

Randbedingungen	Art	Vorgabe [Einheit]
Objective	Weighted Compliance Response	Minimieren
Constraint	Volume Fraction Response	0,3
Constraint Method	Penalty	-

Nach Abschluss der Optimierung kann mit dem „Result isomesh“ Node das Ergebnis visualisiert und noch angepasst werden. Je nachdem, welche Auflösung zu Beginn der Optimierung genutzt wurde, können noch einige Modifikationen durchgeführt werden, um das Ergebnis zu verfeinern. Dazu benötigt es einen zusätzlichen Workflow zur Nachbearbeitung, der zum einen freiliegende Strukturen bzw. Elemente herausfiltert und zum anderen das Ergebnis glättet. Dies ist allerdings nicht unbedingt notwendig.

Die fertigen Ergebnisse stellt der Solver als Meshing dar. Das Mesh kann dann noch in einen Solid Body umgewandelt werden um dann ggf. in einer zusätzlichen FEA das Ergebnis zu bewerten.

Abbildung stellt einen Vergleich zwischen verschiedenen Iso Werten des Ergebnisses dar. Der Isowert kann genutzt werden um je nach Bedarf nachträglich das Ergebnis filigraner oder robuster zu gestalten indem die Schwellwerte für die Dichte damit angepasst werden. Also mehr oder weniger Material am Design zuzulassen. Links wurde mit einem Isowert von 0,3 gearbeitet und rechts mit etwa 0,7.

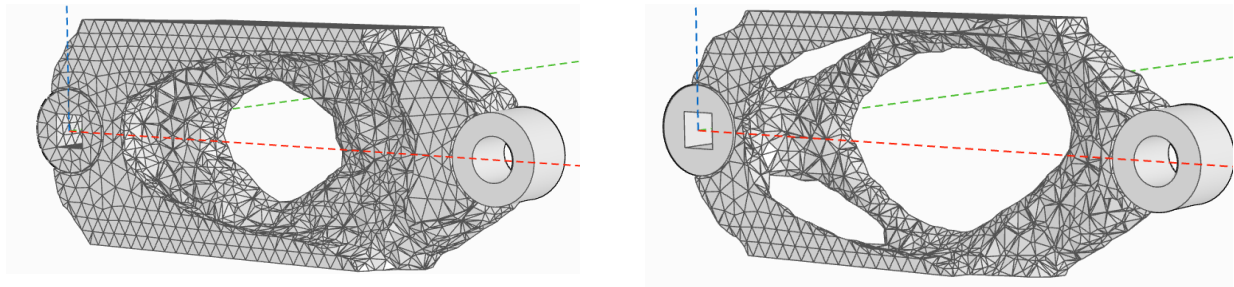
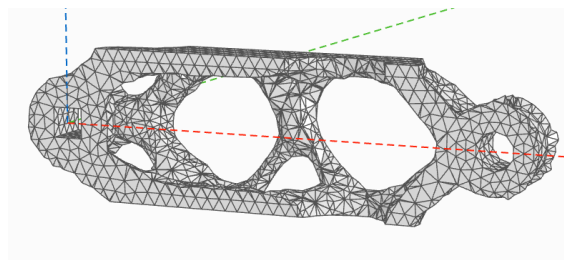
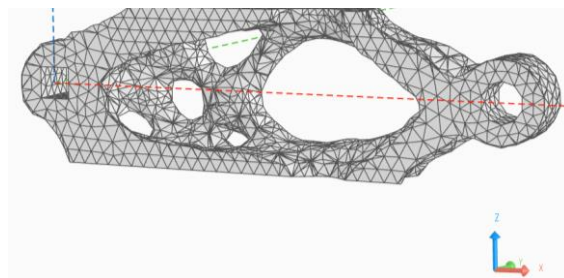


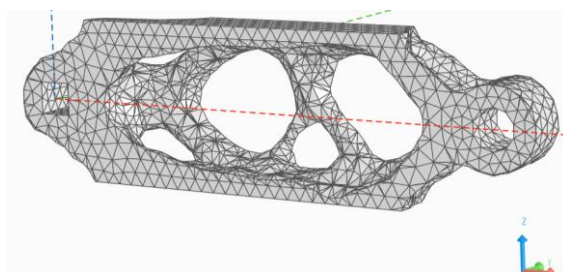
Abbildung 46 Altair OptiStruct eigenes Beispiel



X-Orientierung



Z-Orientierung



Y-Orientierung

Abbildung 47 Altair OptiStruct Orientierung variiert, eigenes Beispiel

Dabei wird der Grenzwert für die Dichteverteilung hoch- oder herabgesetzt. In den folgenden Abbildungen sind Beispiele der Kurbel mit Variierungen der Überhangsrichtungen dargestellt.

7.3 Strukturen und Analyse

Im Folgenden wurden die Topologieoptimierungslösungen von Hexagon (Emendate) und Altair (OptiStruct) hinsichtlich ihrer Leistung und der resultierenden optimierten Strukturen verglichen. Beide Solver wurden in zwei verschiedenen Anwendungsfällen getestet. Für eine fundierte Analyse wurden die Optimierungsparameter mehrfach variiert und spezifische Kriterien festgelegt, um die Ergebnisse objektiv zu bewerten. Diese Methode ermöglichte einen umfassenden Vergleich der beiden Optimierungsansätze.

Die Analyse erfolgte anhand folgender Kriterien:

1. Ausnutzung des verfügbaren Designraums

Beide Solver wurden mit dem gleichen Designraum konfrontiert, um ihre Effizienz unter identischen Bedingungen zu testen. Die Bewertung erfolgt anhand der Effektivität der Raumausnutzung, d. h. wie gut das verfügbare Volumen genutzt wurde und ob effizientere Lösungsansätze erkennbar sind. Dies gibt Aufschluss darüber, welcher Solver das Potenzial des Designraums besser ausschöpft.

2. Orientierung der Strukturen im Designraum

Die Orientierung der generierten Strukturen wurde dahingehend bewertet, inwieweit die Solver die vorgegebenen Randbedingungen, wie den maximal zulässigen Winkel eingehalten haben. Insbesondere wurde überprüft, ob die theoretisch festgelegten Rahmenbedingungen beachtet wurden. Bei Altair OptiStruct erfolgt diese Analyse durch die Überprüfung der Output-Informationen, die auf eventuelle Verletzungen von Randbedingungen hinweisen.

3. Durchmesser der Strukturen

Ein wichtiges Kriterium war die Analyse des Durchmessers der generierten Strukturen. Diese Bewertung diente der Feststellung, ob die Strukturen robust oder eher filigran ausgeprägt waren. Dünnere Strukturen könnten zu einer höheren Materialeffizienz führen. In Altair OptiStruct können die Maße vorgegeben werden, um deren

Auswirkungen auf Stabilität und Effizienz zu untersuchen. Zur Überprüfung wurde das für die additive Fertigung spezifizierte Merkmal „Feature Thickness“ herangezogen.

4. Volumen- und Massenänderung

Die Analyse von Volumen- und Massenänderungen im Vergleich zum ursprünglichen Design lieferte Hinweise darauf, wie gut die Solver mit den gegebenen Designräumen gearbeitet haben. Es wurde untersucht, ob eine optimale Balance zwischen Masse-/Volumenreduktion und Steifigkeitsmaximierung erreicht wurde und ob schmale Designräume die Performance der Solver beeinträchtigen. Ziel war es, signifikante Materialeinsparungen zu identifizieren.

5. Steifigkeit/Nachgiebigkeit und Spannungsverteilung

Die Bewertung der Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit der Strukturen sowie der Spannungsverteilung ermöglichte eine Einschätzung der strukturellen Leistungsfähigkeit. Es wurde analysiert, ob die Steifigkeit verbessert wurde oder unerwartete Schwächen auftreten. Die BESO-Methode könnte durch ihr bidirektionales Materialmanagement eine effizientere Lastverteilung ermöglichen, während SIMP- und RAMP-Methoden durch flexible Optimierungsziele eventuell bessere mechanische Eigenschaften erzielen könnten. Hexagon Emendate arbeitet spannungsbasiert, weshalb Altair OptiStruct-Optimierungen sowohl auf Spannungs- als auch auf Steifigkeitsziele hin durchgeführt wurden.

6. Herstellbarkeit mit den betrachteten Fertigungsverfahren

Ein weiterer entscheidender Punkt war die Herstellbarkeit der optimierten Strukturen mit den betrachteten Fertigungsverfahren. Dabei wurde vor allem auf die additive Fertigung eingegangen, und es wurde untersucht, welches Volumen an notwendigen Stützstrukturen für innenliegende und äußere Bereiche der Strukturen benötigt wurde. Tools wie das Additive Design Toolkit und die browserbasierte Anwendung 3D Spark halfen bei der Analyse der Fertigungsfreundlichkeit der Designs. Genauer wird diese Thematik im Kapitel 8 „Fertigungsanalyse“ besprochen.

7. Nutzlose freistehende Strukturen

Ein Ziel der Optimierungsmethoden SIMP/RAMP und BESO war die Entfernung ineffizienten Materials. Bei SIMP/RAMP entstehen dabei oft charakteristische Löcher,

die die Spannungsverteilung beeinflussen können. Es wurde untersucht, ob solche freistehenden Strukturen die Komplexität der Fertigung erhöhen und ob Nachbearbeitung erforderlich ist, um ungewollte Strukturen zu entfernen, die während des Optimierungsprozesses entstanden sind.

8. Einfluss der Nachbearbeitung auf das Endergebnis

Abschließend wurde analysiert, inwiefern die Nachbearbeitung der optimierten Strukturen notwendig war und wie sie das finale Design beeinflusst hat. Dies betraf insbesondere die SIMP- und RAMP-Methoden, die häufig eine Nachbearbeitung erfordern. Es wurde bewertet, ob die nachträgliche Bearbeitung die strukturellen Ergebnisse negativ beeinflusst und wie signifikant dieser Einfluss ist.

Durch die Anwendung dieser Kriterien wurde eine detaillierte Analyse ermöglicht, um die Stärken und Schwächen beider Optimierungsmethoden herauszuarbeiten. Zusätzlich wurde eine Vergleichstabelle erstellt, die relevante Ergebnisse, wie maximale Verschiebung, Volumen- und Massenänderungen, maximale mechanische Spannung und die Anzahl der Spannungsspitzen zusammenfasst.

7.3.1 Gabelkrone

Den Beginn der Optimierungen des Bauteils macht Altair OptiStruct. Ziel war es, das Bauteil so zu gestalten, dass es sowohl für die additive Fertigung, idealerweise orthogonal zur Belastungsrichtung, als auch für Gussverfahren oder MIM geeignet war. Für die additive Fertigung sollt die Notwendigkeit von Stützstrukturen minimiert werden, während bei den Gussverfahren darauf geachtet wurde, den Einsatz von Kernen und die Entstehung von Hinterschnitten möglichst zu vermeiden. Um sicherzustellen, dass der Funktionsraum anderer

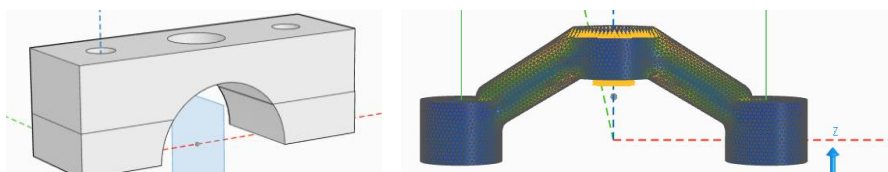


Abbildung 48 Gabelkrone DS und FEA

Komponenten eines Fahrrads nicht beeinträchtigt wurde, wurde der Designraum so definiert, dass im Bereich der Symmetrieebene (hier in Blau) ausreichend Platz für einen Reifen oder ein Schutzblech blieb (siehe Abbildung 48).

Durch diese präzise Ausrichtung an den Anforderungen der Fertigungsverfahren und der geometrischen Randbedingungen wurde eine optimale Balance zwischen Funktionalität und Herstellbarkeit angestrebt.

7.3.1.1 OpiStruct Struktur additive Fertigung

Für die additive Fertigung bietet Altair OptiStruct, wie bereits zuvor beschrieben, eine Vielzahl an Einstellungsmöglichkeiten. Der Fokus lag nun darauf, die durch die Optimierung generierten Strukturen hinsichtlich ihres Aufbaus und der Charakteristika der verwendeten Optimierungsmethode zu analysieren. Abbildung 49 zeigt eine erste Optimierung, die für die additive Fertigung in Y-Richtung, also zum Druckbett hin, ausgerichtet war. Ziel der Optimierung war es, das Volumen des Bauteils auf maximal 15 % des verfügbaren Designraums zu reduzieren und gleichzeitig die Nachgiebigkeit zu minimieren bzw. die Steifigkeit zu maximieren. Die Zielvorgabe hierfür war es die Masse zu minimieren, die Maximale Verschiebung auf 0.1 zu und die maximale Von-Mises-Spannung auf maximal $300 \frac{N}{mm^2}$ zu reduzieren.

Mithilfe der SIMP-Methode (Solid Isotropic Material with Penalization) und der Penalty-Methode, bei der ein „Penalty-Faktor“ auf mittlerem Niveau angesetzt wurde, wurde die Struktur stärker entlang der Druckbettebene ausgerichtet. Der Penalty-Ansatz erlaubt es dem Solver, unter bestimmten Bedingungen gegen Restriktionen zu verstoßen. Solche Verstöße

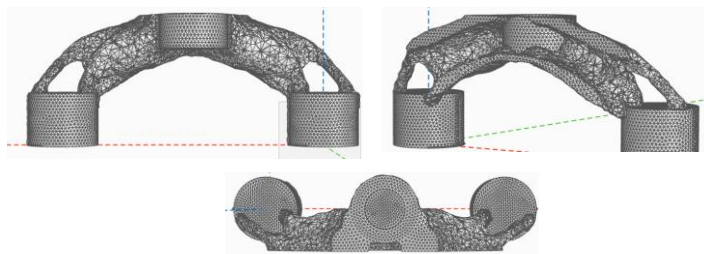


Abbildung 49 OptiStruct Optimierungsbeispiel Y Orientierung

können beispielsweise die Überhangsrestriktionen betreffen, da die Potenzfunktion von SIMP, durch eine nicht ganz eindeutige Differenzierung zwischen den Dichten, in bestimmten Fällen

Schwierigkeiten verursacht, diese Einschränkungen vollständig einzuhalten. Bei genauerer Betrachtung wurde die erhöhte Materialanhäufung in ein paar wenigen Bereichen auffällig. So schien Altair OptiStruct für eine verringerte Nachgiebigkeit mehr Material an wenigen Stellen zu bevorzugen, als weniger angehäuften Material und mehr Streben zu nutzen.

Der Solver orientierte sich hierbei primär an den vorgegebenen Volumeneinsparungen und entfernt Materialanteile, die als überflüssig erachtet werden. Dadurch entstand (siehe Abbildung 50) ähnlich wie bei der Optimierung mit Hexagonstrukturen (siehe Punkt 2), eine Struktur, die zwar den geforderten Lasten standhält, jedoch neue potenzielle Probleme mit sich brachte. Durch die Umverteilung des Materials entstand ein Kippmoment, das die Steifigkeit

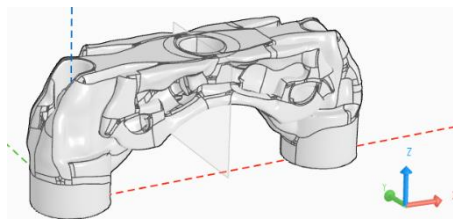


Abbildung 50 OptiStruct Optimierungsbeispiel
Volumen/Nachgiebigkeit 1

der Struktur beeinträchtigt und nicht ausreichte, um diesem entgegenzuwirken. Grund war, dass zwar die Kontaktpunkte gehalten wurden, doch lediglich von der Druckebene aus. Der Rest war freiliegend und hatte keinerlei Stützen. Dies führte zu einem unbrauchbaren Ergebnis.

Theoretisch sollte der Solver durch die Anwendung der Symmetriebedingung in der Lage sein,

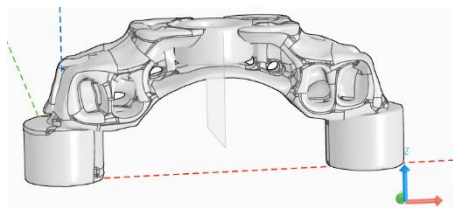


Abbildung 51 OptiStruct Optimierungsbeispiel
Volumen/Nachgiebigkeit 2

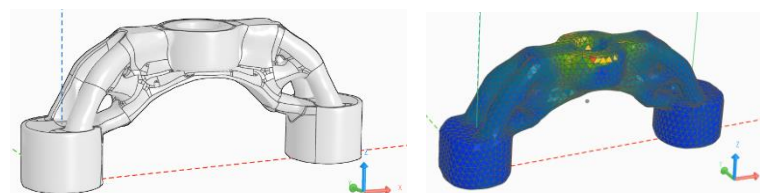
ein Modell zu erzeugen, das trotz der Symmetrie eine Materialverteilung ermöglicht, die den Überhangsrestriktionen gerecht wird. Dies ist jedoch offensichtlich nicht der Fall gewesen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Symmetriebedingung lediglich als einfache Spiegelung einer Hälfte interpretiert wird, ohne als zusätzliche Restriktion zu fungieren, die die Struktur signifikant beeinflusst.

Um ein besseres Ergebnis zu erzielen, wurde daher die XY-Ebene als neue Ausgangsbasis gewählt. Mit dieser Änderung sollte der Solver theoretisch eine verbesserte Materialverteilung erreichen. Abbildung 51 zeigt jedoch, dass diese Annahme nicht zutraf. Zwar schien das Material schlanker verteilt zu werden, jedoch war die resultierende Struktur stärker zerklüftet und bot keine klare Trennung zwischen potenzieller Stützstruktur und Bauteilstruktur. Sie ähnelte mehr einer unstrukturierten Entfernung von unterbelastetem Material.

Es ist wahrscheinlich, dass der Solver aufgrund der Volumenbeschränkung auf 25 % das maximal verfügbare Volumen ausschöpfte, um eine möglichst geringe Nachgiebigkeit zu erzielen. Dies führte jedoch zu einer Struktur, die in dieser Form nicht ohne Fehler weiterverarbeitet werden konnte.

Abbildung 52 zeigte hingegen bei einer Volumenbegrenzung auf 12 % deutlich bessere Ergebnisse. Die Strukturen waren klar abgegrenzt und boten ausreichend Raum für die Fertigung. Durch die Reduktion des Volumens wurde der Solver gezwungen, robustere und konzentriertere Materialverteilungen zu erzeugen, die die festgelegten Restriktionen erfüllten. Dies steht im Einklang mit der Anforderung, ausreichend Designraum für die Optimierung zur Verfügung zu stellen.

Bei der Arbeit mit Altair OptiStruct sollte daher besonders darauf geachtet werden, welche Restriktionen angewendet werden, um den Designraum oder die Volumenobergrenze entsprechend anzupassen. Dass dieser Vorschlag, ausgehend von einer ursprünglichen Masse von 890 Gramm, immer noch über 1300 Gramm wog, lag daran, dass die Optimierung nicht primär auf die Minimierung der Masse, sondern auf die Begrenzung des Volumens und der



*Abbildung 52 OptiStruct Optimierungsbeispiel
Volumen/Nachgiebigkeit Volumen 0,12*

Nachgiebigkeit ausgerichtet war. Die Masse wurde somit nur indirekt durch die Reduzierung des Volumens beeinflusst.

Die FEA zeigte zudem, dass die mechanischen Spannungen das vorhandene Material nur gering beanspruchen und die Nachgiebigkeit relativ niedrig blieb. Trotz des reduzierten Volumens erscheinen die Strukturen weiterhin überdimensioniert. Lediglich am Fixierungspunkt treten übermäßige mechanische Spannungen auf. Dies könnte jedoch auf die geringere Auflösung der FEA zurückzuführen sein, bei der Elemente, die bei einer höheren Auflösung getrennt blieben, hier zur Darstellung der Spannung zusammengefasst wurden.

Um eine signifikante Reduzierung der Masse zu erreichen, musste die Volumenbegrenzung im Verhältnis zum Designraum weiter reduziert werden. Mit einer neuen Grenze von 8 % und einem Iso-Wert von 0,6 wurde ein schlankeres Design erzielt, wie in Abbildung 53 zu sehen ist. Dieses Design war zwar filigraner als die vorherige Iteration, bot jedoch nicht die angestrebte Gewichtseinsparung. Mit einer Masse von knapp 1000 Gramm blieb das Bauteil immer noch schwerer als das ursprüngliche, das ein Gewicht von 890 Gramm aufwies.

Auch wenn die angestrebten Ergebnisse durch die vorgenommenen Anpassungen nicht erreicht wurden, liefern sie dennoch wertvolle Einblicke in das Vorgehen des Solvers während des Optimierungsprozesses. Im Rahmen einer volumetrischen Optimierung mit dem Ziel, die Nachgiebigkeit zu minimieren, tendiert der Solver dazu, das vorhandene Material dichter zu konzentrieren und bevorzugt dabei robustere Materialverteilungen, insbesondere bei einer immer weiter reduzierten Volumengrenze. Dies impliziert, dass der Solver gezwungen ist, auf

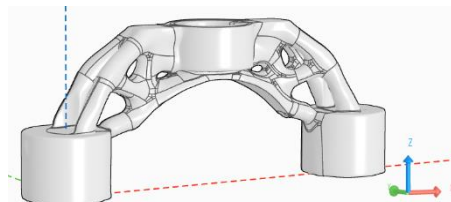


Abbildung 53 OptiStruct Optimierungsbeispiel
Volumen/Nachgiebigkeit Volumen 0,08

massivere Strukturen zurückzugreifen, da diese bei geringerem Volumen eine niedrigere Nachgiebigkeit aufweisen. Auch unter der Berücksichtigung, der minimalen und maximalen Durchmesser für ausgebildete Strukturen (hier 10-15 als Dicken) bleibt diese Annahme bestehen.

Die Betrachtung der Iterationen in ihrer Gesamtheit verdeutlicht den erheblichen Einfluss der Volumenbegrenzung auf den Optimierungsprozess. Diese Begrenzung reguliert nicht nur, wie viel des Designraums genutzt werden darf, sondern wirkt sich auch maßgeblich auf die

Strukturentwicklung aus. Bei einer anfänglichen Volumengrenze von 25 % war keine klar definierte Geometrie bzw. Materialverteilung erkennbar, sondern es entstanden freistehende Strukturen, die der Solver unter normalen Bedingungen hätte entfernen müssen. Mit der schrittweisen Reduzierung des verfügbaren Volumens wurde der Solver zunehmend dazu gezwungen, nicht nur kompaktere und effizientere Strukturen zu erzeugen, sondern auch den Strafexponenten (Penalty Factor) für das Entfernen von Elementen anzupassen. Dieser wurde bei allen Optimierungen auf der Stufe „Medium“ belassen und scheint daher vom Solver je nach spezifischen Restriktionen und Komplexität des Anwendungsfalls dynamisch angepasst zu werden.

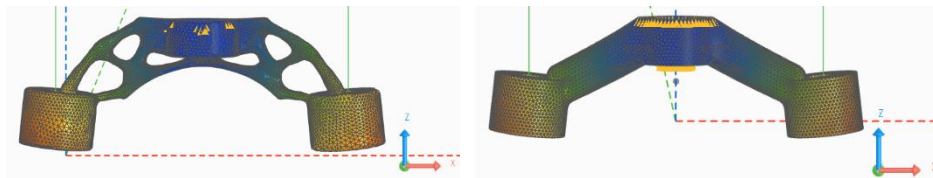


Abbildung 54 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit SIMP Ergebnis

Besonders interessant waren die Strukturen im Hinblick auf die „Member Size“-Parameter, also die minimalen und maximalen Durchmesser der Strukturen sowie den Mindestabstand zwischen diesen. Theoretisch sollten diese Einstellungen einen direkteren und signifikanten Einfluss auf die Materialverteilung und die Anordnung der Strukturen haben. Tatsächlich zeigte sich jedoch, dass dies nicht der Fall war. Es scheint, als würden der Volumen- und Nachgiebigkeitsrestriktion der weitaus größte Einfluss zukommen. Abbildung 55 veranschaulicht eine Optimierung unter Berücksichtigung der „Member Size“-Anpassung und bestätigt die Vermutung, dass diese Werte lediglich die Dicken und Abstände der Strukturen vorgeben, jedoch kaum signifikanten Einfluss auf deren Anordnung haben.

Der dargestellte Designvorschlag schien auch auf den ersten Blick alle relevanten Restriktionen in Bezug auf die Struktur zu erfüllen. Die Strukturen waren klar definiert, und es gab kein freistehendes Material, das nachbearbeitet hätte werden müssen. Zudem zeigte die FEA, dass die Nachgiebigkeit, repräsentiert durch die „max. Displacement“-Werte mit der des Originalbauteils vergleichbar waren.

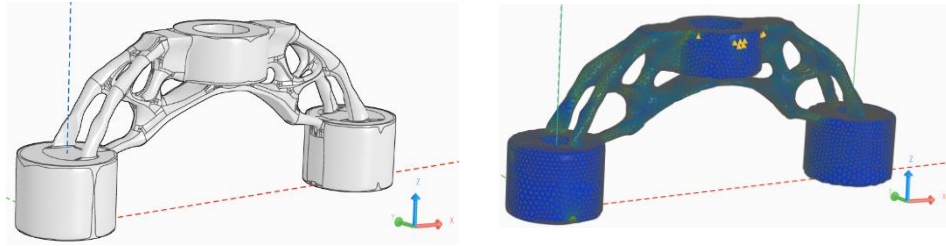


Abbildung 55 OptiStruct Optimierungsbeispiel Volumen/Nachgiebigkeit SIMP Ergebnis Member
Size Anpassung

Auffällig ist im Vergleich zum Ursprungsmodell, dass die mechanischen Spannungen fast schon ideal gleichmäßig verteilt waren.

Ziel dieser Optimierung war, wie oben besprochen, eine Minimierung der Nachgiebigkeit bzw. eine Maximierung der Steifigkeit und eine Optimierung der Volumens auf eine festgelegte maximale Volumengrenze. Diese Optimierung bewirkte eine bessere Materialverteilung, die letztendlich auch eine bessere Umleitung der mechanischen Spannungen erreichte. Dies wirkte sich auch auf die Nachgiebigkeit des neuen Designs aus.

Im Vergleich zu SIMP sah die Optimierung mit dem RAMP Ansatz (siehe Abbildung 56), dieser sehr ähnlich. Als Ausgangsbasis wurden hierfür die Einstellungen der letzten Optimierung durch SIMP verwendet.

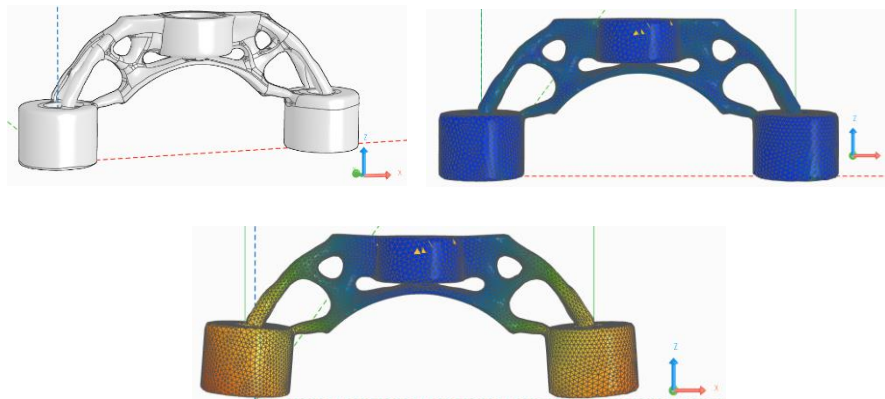


Abbildung 56 OptiStruct Optimierung RAMP

Das Ergebnis wies gewisse feinere Übergänge in der Struktur der einzelnen Streben auf. Zu beachten ist, dass die Dicke der Streben, größer ausfällt als jene der SIMP Struktur. Die Dicke ist darauf zurückzuführen, dass das ursprüngliche Meshing filigraner ausfällt und daher in der Nachbearbeitung weitere Schichten aufgetragen bekommen hat, da es ansonsten nicht für eine

Weiterverarbeitung geeignet gewesen wäre. Genauer konnte bei der Umwandlung in ein Solid keine Struktur erreicht werden und mit einem „SubD“-Workflow wurden die Grenzebenen nicht vollständig abgebildet.

RAMP ist es auf Grund der rationalen Funktion, die diesem Ansatz zu Grunde liegt, möglich die Übergänge mit einer härteren Aussiebung der Dichten zwischen 0 und 1, klarere Konturen zu schaffen, die letztendlich zu feineren Übergängen führen. Zwar kann versucht werden diese Eigenschaft durch einen höheren „Penalty“-Faktor bei SIMP nachzuahmen, doch dabei würden auch, unter Umständen, Bereiche der Struktur entfernt werden, die das Ergebnis verschlechtern. Weiterhin kommt es vor, dass eine Veränderung des „Penalty“ Faktors ab einem Wert von „High“ kaum noch einen Unterschied macht und lediglich gering Material entfernt wird.

Die Fähigkeit, feinere Übergänge zu erzeugen, ist ein entscheidender Grund, warum die RAMP-Methodik für Altair OptiStruct von besonderer Bedeutung ist. Im Vergleich zur SIMP-Methode, bei der abrupte Materialübergänge, durch die unklare Materialverteilung Mittels der Dichte, die Einhaltung von Restriktionen wie dem 45°-Winkel in der additiven Fertigung erschweren, ermöglicht RAMP eine bessere Einhaltung solcher Fertigungsanforderungen. Allerdings führt die Anwendung von RAMP in der Regel nicht zu einer signifikanten strukturellen Verbesserung unter den gleichen Randbedingungen, sondern erleichtert primär die Umsetzung der Fertigungsrestriktionen. Daher ist es ebenso möglich eine automatisierte Einstellung zwischen beiden Methoden zu wählen. So nutzt der Solver bei einer Penalty Methode „Penalty“ den SIMP und bei „Constraint“ den RAMP-Ansatz.

Die Ähnlichkeit zwischen den Ergebnissen von SIMP und RAMP lässt sich auf das gemeinsame Ziel beider Ansätze zurückführen, eine optimale Materialverteilung zu ermitteln. Sowohl SIMP als auch RAMP streben, auf Grund der vorgegebenen Restriktionen, danach, die Nachgiebigkeit zu minimieren, indem sie das Material so anordnen, dass die Struktur unter den gegebenen Lasten möglichst steif bleibt. Da das physikalische Ziel sowie die Randbedingungen – wie Volumengrenzen und Belastungen – übereinstimmen, neigen beide Methoden dazu, vergleichbare Materialverteilungen zu erzeugen, die diesen Anforderungen gerecht werden.

Wie entwickeln sich jedoch die Strukturen bei einer Optimierung, die sowohl auf die Minimierung der Masse, einer optimierten Spannungsverteilung und einer minimierten Verschiebung hin abzielt? Dafür wurden die Maximale Verschiebung auf 0.1 und die maximale

Spannung innerhalb des Materials auf $300 \frac{N}{mm^2}$ festgelegt und die Minimierung der Masse als Ziel vorgegeben.

Ein Blick auf die nachfolgenden Abbildungen zeigt, dass trotz unterschiedlicher Restriktionen im Vergleich zu den vorherigen Optimierungen eine starke Ähnlichkeit zum Design aus der volumetrischen Optimierung besteht. Die Streben folgen innerhalb des Volumens ähnlichen Verläufen.

Auffällig war außerdem die abweichende Verschiebung der Knotenpunkte in der FEA. Obwohl die Lasten auf beiden Seiten identisch waren und auch eine Symmetriebedingung vorlag, wies die Struktur keine perfekte Symmetrie auf.

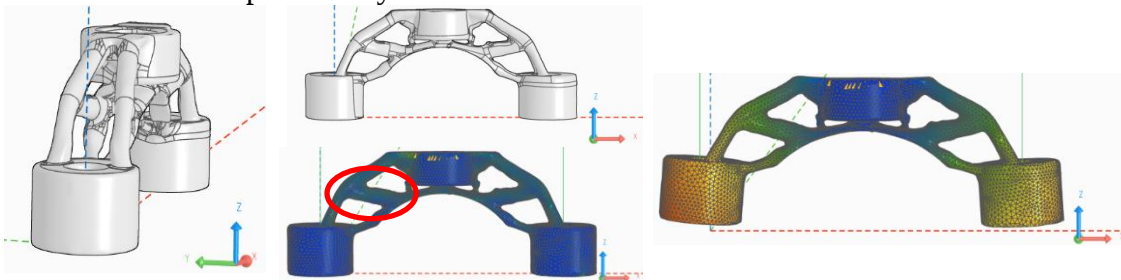


Abbildung 57 OptiStruct Optimierung SIMP Steifigkeitsoptimiert

Es stellt sich die Frage, weshalb beide Strukturen sich so stark ähneln, obwohl sie teils völlig unterschiedliche Restriktionen zu Grunde haben. Nun dazu muss das Vorgehen des Solvers genauer betrachtet werden. Die FEA des Designraumes stellt Altair OptiStruct einen Rahmen zur Verfügung, welcher nur einen gewissen Spielraum an Freiheiten hergibt. Die mechanischen Spannungen verlaufen in diesem Raum gleich für beide Ansätze. Daraus ergibt sich für den Solver lediglich ein kleiner Raum der tatsächlich zur Optimierung der genutzt werden kann. Eine alternative Route für die mechanischen Spannungen wäre für SIMP und RAMP nicht ohne weiteres umsetzbar gewesen und bedürfte der Fähigkeit zusätzliches Material hinzufügen zu können und weiterer geometrischer Einschränkungen. Die beiden Ergebnisse waren mehr oder weniger ein Abbild dessen, was die FEA zu Beginn zeigte und was die Symmetrie Restriktion und die „Member Size“ vorgaben. Eine weitere Charakteristik schien fast alle Ergebnisse des Altair OptiStruct Solvers aus diesem Anwendungsfall zu betreffen. Das Maß an Nacharbeit, nach der eigentlichen Optimierung. Oftmals ließen sich die Vorschläge, nicht sofort in ein „Solid“ transformieren, sondern mussten vorab einen zusätzlichen Workflow durchlaufen. Dieser Workflow bereinigte das Modell von frei liegenden Elementen, die der Solver nicht

entfernt oder gar nicht als ineffizient erkannt hatte. Nach der Bereinigung wird das Modell in ein Voxel Mesh, für die Verfeinerung der Struktur und dem eventuellen aufbringen von zusätzlichen Schichten und anschließend in ein Quad-Mesh umgewandelt. Dieses Quad-Mesh kann dann entweder direkt oder über einen „SubD“-Workflow in ein „Solid“ umgewandelt werden. Aus diesem Prozess geht hervor, dass die Ergebnisse, die von Altair OptiStruct ausgegeben werden, meist nicht für eine direkte Fertigung oder allgemeine Verarbeitung geeignet sind. Vielmehr muss das Modell aufwendig angepasst werden. Zwar könnte dies umgangen werden indem der „Penalty Factor“ höher eingestuft würde, doch das würde die gesamte Struktur beeinflussen und ggf. eine eigentlich gutes Ergebnis zunichtemachen.

In Abbildung 58 ist ein Nachbearbeitungs-Durchlauf anhand der Zwischenstufen optisch dargestellt. Aus technischen Gründen wurde auf die Darstellung des „Voxel Meshings“ verzichtet, die Visualisierung die Leistung der verwendeten Hardware auf Grund einer hohen Auflösung, die notwendig ist, überfordert. Es ist noch zu erwähnen, dass sich die Struktur aus dem Solver auch direkt mit einem sogenannten „Smooth Mesh“ verbessern lassen würde.

Die "Smooth Mesh"-Funktion dient der Glättung des Meshes, um Oberflächen gleichmäßiger gestalten. Dabei werden die Koordinaten der Eckpunkte durch Mittelung mit benachbarten Punkten verschoben, was eine gleichmäßigere Verteilung und damit eine glattere Oberfläche bewirkt. Gleichzeitig können auch die Normalenvektoren, welche die Ausrichtung der Oberfläche bestimmen, geglättet werden, ohne die Geometrie signifikant zu verändern. Der Glättungsprozess erfolgt dabei iterativ. Sprich mit jeder Iteration wird das Meshing glatter und abgerundeter und damit eindeutiger.

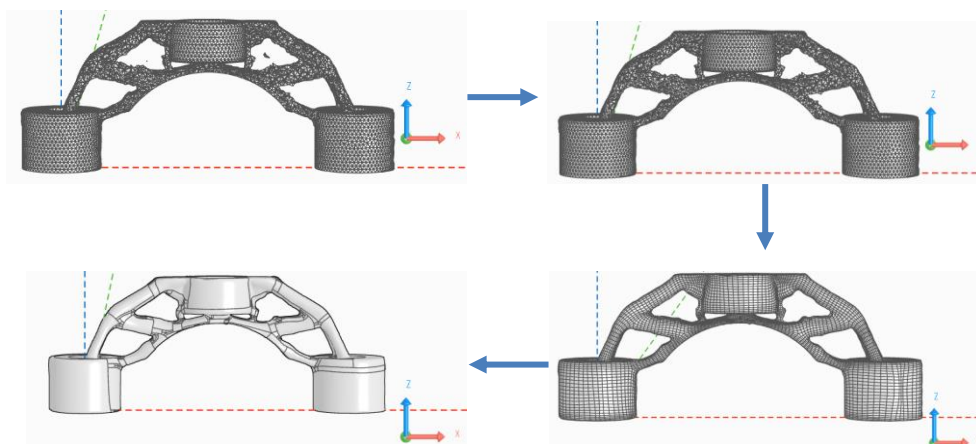


Abbildung 58 Nachbearbeitungsdurchlauf

Diese Funktion birgt allerdings das Risiko, dass sich die DS-Struktur von der restlichen Struktur NDS-Struktur trennt, da dabei besonders Kanten und Ecken abgerundet werden. Die Optimierung betrifft nur den NDS, weshalb das „Smooth Mesh“ auch nur diese anpasst. Dabei entstehen unter Umständen Lücken zwischen DS und NDS, die in der späteren Verarbeitung zu Problemen bei einem FEA Check oder einer Umwandlung in ein festes Bauteil führen können.

7.3.1.2 Hexagon Emendate Struktur additive Fertigung

Hexagon Emendate scheint bei der Optimierung einen gänzlich anderen Weg einzuschlagen. Während dieser ließ sich beobachten, wie der Solver zunächst das Bauteil in eine gröbere Netzstruktur bzw. ein gröberes Meshing unterteilt und viel Material entfernt hat.

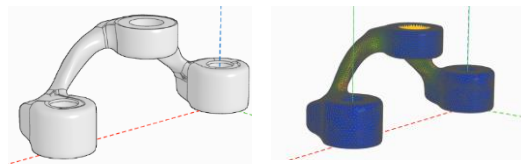


Abbildung 59 AM Hexagon Emendate Y Orientierung

Dies geschah vor allem in Bereichen die laut der FEM Analyse kaum bis gar nicht belastet wurden. Nachdem die ersten Iterationen abgeschlossen waren, wurde das Meshing weiter verfeinert und wieder Material entfernt. Hier wurde auch schnell die besondere Arbeitsweise des Solvers deutlich sichtbar. Die ursprüngliche Struktur wurde deutlich schneller, drastisch verkleinert. Dann in den darauffolgenden Schritten, wurden Stellen die zuvor von Material befreit wurde, wieder überbelastet und Material musste hinzugefügt werden. Bezogen auf Punkt 1 und 2 der Bewertungskriterien war auffällig, dass der Hexagon Emendate-Solver den vorhandenen Designraum nur im geringen Maße nutzte, also ähnlich wie Altair OptiStruct mit den dazugehörigen Restriktionen ,mit einer Optimierung bzw. Minimierung des genutzten Volumens und verbesserung der Spannungsverteilung arbeitete.

Die in Y-Richtung optimierte Struktur wurde von einer Basis in der ZX-Ebene nahezu angezogen. Dies ist auf die Support-Strategie mit dem Niveau „High“ zurückzuführen. Dem Solver scheint diese Materialverteilung als die effizienteste Methode zu erscheinen, um eine Struktur zu bilden, die den gegebenen Randbedingungen entspricht und den Belastungen standhalten kann. Entsprechend tritt eine verstärkte Volumenänderung des Bauteils auf.

Das Problem dieser optimierten Struktur zeigte sich jedoch erst in einer separaten FEA. Zwar war die Spannungsverteilung hier „optimal“ und es entstanden kaum Spannungsspitzen, doch ergaben sich mit diesem Design neue mechanische Schwierigkeiten, ähnlich wie mit Altair OptiStruct. Da die Materialverteilung größtenteils in Richtung der Druckebene ausgerichtet war, entstand ein Kippmoment, wodurch die Verschiebung der beiden Kontakte deutlich größer wurde als zuvor. Dies wirft die Frage auf, warum der Solver trotz dieses Problems ein solches Design vorschlägt. Nun, Hexagon Emendate arbeitet spannungsbasiert. Das bedeutet, dass Aspekte wie die Steifigkeit der Gesamtstruktur nicht direkt betrachtet werden, sondern nur, wie sich die Spannungen am besten verteilen, das Volumen minimiert und die Stützstrukturen reduziert werden können. Unter diesen Voraussetzungen erscheint dieses Design, trotz der beschriebenen Mängel als „ideal“ für den Solver. Man könnte dieses Problem umgehen, indem man die Zielspannung, also die maximal zulässige Spannung des Materials anpasst und so eine größere Steifigkeit erreicht. Dies wäre jedoch nicht zielführend, da das Problem des Kippmoments dadurch nicht behoben würde, sondern lediglich eine robustere Struktur entstehen würde, die im Endeffekt schwerer wäre. Die Frage lautet nun: Wie erreicht man ein Design, das den Anforderungen entspricht und gleichzeitig mittels additiver Fertigung herstellbar ist, ohne das Spannungsziel anzupassen und möglicherweise nachteilig die Gewichtseinsparungen zu beeinflussen?

Dafür gibt es verschiedene Ansätze. Ein Wechsel der Druckrichtung, beispielsweise in die Z-Richtung, würde – wie in Abbildung 60 gezeigt – zu einem eher fragwürdigen Ergebnis führen. Dennoch ließen sich hier bereits Vergleiche zu Altair OptiStruct ziehen. Die spannungsbasierte Optimierung in Kombination mit einer effizienten Materialverteilung und der Fertigungsrestriktion für AM schien hier einen deutlich stärkeren Einfluss zu haben.

Mit einer Support-Minimierungsstrategie auf „high“ wird diese hier massiv vermieden, indem

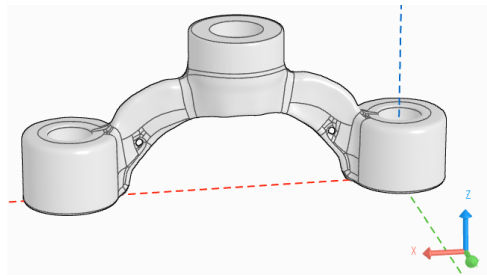


Abbildung 60 Hexagon Emendate Z-Orientierung
High

mehr volle Strukturen und keine Streben artigen Gebilde entstehen. Schaltet man nun die Support Strategie vollkommen aus, so entsteht eine eher unerwartete Materialverteilung

Fast der gesamte Designbereich (Abbildung 61) schien in den ersten Iterationen gelöscht zu werden. Ob dies tatsächlich der Fall war, war schwer zu beurteilen, da zu Beginn des Meshings die Strukturen nur grob abgebildet und damit nicht unbedingt sichtbar sind.

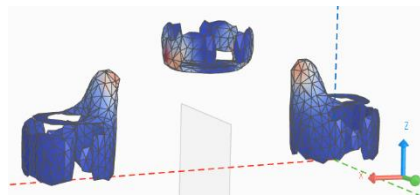


Abbildung 61 Hexagon Emendate
Optimierungsfehler 1

Das Endergebnis dieser Optimierung (Abbildung 62)mit 64 Iterationen wirkte im Vergleich zur Iteration 54 ungewöhnlich. Der Solver schien anfangs auf dem richtigen Weg, doch in den letzten Iterationen schienen Probleme bei der Materialverteilung dazu geführt zu haben, dass sich die Spannungen nicht mehr durch einfaches Hinzufügen von Material optimal verteilen ließen. Eine mögliche Ursache hierfür könnte eine unzureichende Anzahl von Iterationen sein. Dies unterstreicht den erheblichen Einfluss der gewählten Einstellungen und damit

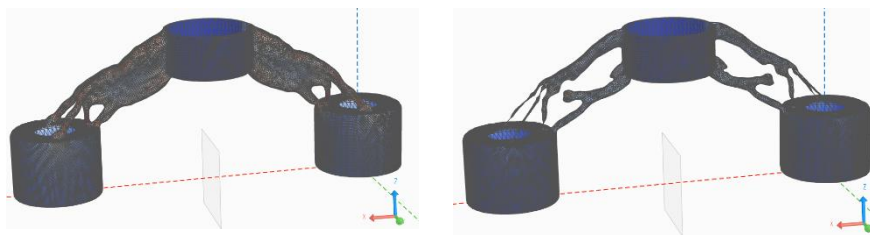


Abbildung 62 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 2

einhergehend, der verfügbaren Iterationen. Durch das bidirektionale Materialmanagement und die iterative Verfeinerung des Meshes benötigt der Solver in der Regel mehr Iterationen, um die Struktur zu optimieren, da er sowohl Material entfernt als auch hinzufügt. Dabei kann es vorkommen, dass Material an Stellen entfernt wurde, die im lokalen Optimum zunächst unbedeutend erschienen, jedoch in der globalen Betrachtung von wesentlicher Bedeutung waren. Der Solver handelt hier möglicherweise zu voreilig. Tritt dieser Fehler auf, kann Hexagon Emendate das entfernte Material nicht wie bei einem Soft-Kill-Verfahren zurückholen, sondern muss neues Material um die bestehenden Elemente herum auftragen, was wiederum zusätzliche Iterationsschritte erfordert, die effizienter für die eigentliche Optimierung hätten genutzt werden können. Abbildung 63 zeigt ein gutes Beispiel für diesen Fehler. Abgebildet ist der linke Strukturteil der Gabelkrone. In vorherigen Iterationen war hier eine strebenartige Struktur ausgebildet, die auf dasselbe Ergebnis hinauslaufen sollte wie bei den anderen Optimierungen. Doch eben dort trat dann das Problem des Solvers auf, dass hier Material entfernt wurde, das eigentlich gebraucht wurde. Eine weitere Ursache für dieses Verhalten kann in einer Schwäche liegen, die im zweiten Anwendungsfall besprochen werden soll. Nämlich die Problematik des Solvers mit sehr dünnen Strukturen umzugehen.

Ist eine solche Struktur entstanden, können numerische Instabilitäten auftreten, die dazu führen, dass Hexagon Emendate Probleme bekommt, eine ausreichende Auflösung der Meshings zu erreichen, die die komplexen Lastfälle abbilden kann. Der Algorithmus sieht sich dann dazu gezwungen, diese Struktur zu entfernen, da sie nicht mehr verarbeitbar ist, und eine Alternative zu finden.

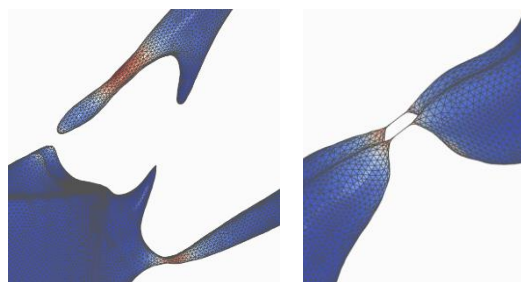


Abbildung 63 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 3

Dieses Phänomen tritt bei Emendate immer wieder auf und führt in den meisten Fällen zu keinem brauchbaren Ergebnis.

Um diese Fehler zu vermeiden, lassen sich verschiedene Veränderungen an den Parametern vornehmen. Ein erster Ansatz wäre, die Komplexität anzupassen und die „Strut Density“ zu erhöhen. Dadurch kann dem Solver durch die gewünschte Komplexität der Struktur vorgegeben werden, dass mehr Streben erwünscht sind (dieser Wert ist stark vom spezifischen Anwendungsfall abhängig), was zu mehr Möglichkeiten führt die Lasten zu verteilen

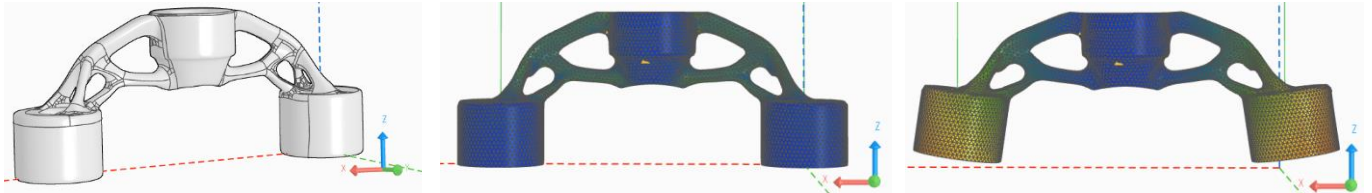


Abbildung 64 Hexagon Emendate AM Optimierung

.Andererseits kann die Dicke oder Robustheit der Strukturen beeinflusst werden. Bei einer niedrigen „Strut Density“ wird die Struktur filigran und kann zwar mechanische Lasten aufnehmen, bietet jedoch nur geringe Steifigkeit. Um eine verbesserte Steifigkeit zu erreichen, sollte der Wert auf „Medium“ erhöht werden, und gleichzeitig der Sicherheitsfaktor in Druckrichtung angehoben werden.

Mit diesen Anpassungen ergab sich dann ein Designvorschlag, der denen von Altair OptiStruct sehr ähnelte. Die wesentlichsten Unterschiede waren hier die feineren Materialverläufe und eine ungewöhnliche Materialanhäufung unterhalb des Lagers in der Mitte. Das neue Design erreicht mit einer Masse von etwa 0,9 Kilogramm einen ähnlichen Bereich wie das Originalbauteil. Die wesentlichen Vorteile lagen hier jedoch nicht in der reduzierten Masse, sondern in den mechanischen Eigenschaften. Während zuvor besonders an der Lagerung hohe Spannungsspitzen vorhanden waren, waren im neuen Design die mechanischen Spannungen so gut verteilt, dass die Einfärbung der FEA verstärkt werden musste, um diese besser sichtbar zu machen.

7.3.1.3 Altair OptiStruct Struktur Guss

Nachdem die Optimierungen für die Additive Fertigung besprochen wurden, soll hier nun auf die Optimierungen für Gussverfahren eingegangen werden.. Abbildung 65 zeigt eine erste Optimierung für die Gabelkrone mit einer Entformung in Y-Richtung. Zu Testzwecken wurde hier die Funktion „no holes“ angewandt. Also, dass Löcher innerhalb der Struktur vermieden werden sollen um ein Entformen zu erleichtern. Ebenso galten dieselben Restriktionen wie für die Additive Fertigung. Optimierungen sowohl in Richtung Volumen und Steifigkeit, als auch masse- und spannungsbasiert. In der ersten Iteration, einer masse- und spannungsbasierten Optimierung wiederholte sich das Ergebnis aus dem Anwendungsfall „Gabelkrone“. Die Struktur war mit den gegebenen Einstellungen zu klobig und wirkte überdimensioniert. Interessant ist hier jedoch die Tatsache, dass die Struktur sehr einem gerippten Gussbauteil

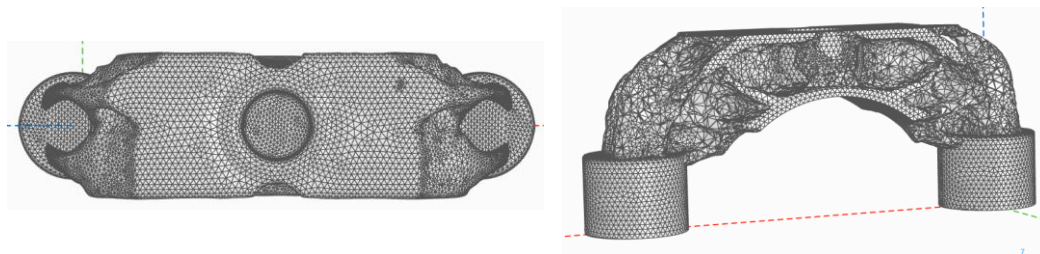


Abbildung 65 OptiStruct Guss

ähnelt. Rippen werden gerne bei diesem Verfahren verwendet um Bauteile mit mehr Steifigkeit zu versehen und um zu verhindern, dass sie mit zu viel Vollmaterial gegossen werden müssen. An dieser Art von Struktur scheint sich auch der Solver zu orientieren. Aber wie genau wird hier entschieden welches Material wo entfernt wird? Der Algorithmus hat die Vorgabe eine Optimierung vorzunehmen, die in Y- Richtung mit dem Gussverfahren entformbar ist. Dadurch wird er in seinen Möglichkeiten beschränkt Material an Stellen zu entfernen, das Hinterschnitte oder gar Kerne zur Folge hätte. Der Solver prüft dann während der Optimierung zum einen ob das Entfernen von Material einen Hinterschnitt verursachen würde und versucht gleichzeitig vermehrt Material entlang der Entformungsrichtung zu entfernen um eben jene Hinterschnitte zu vermeiden. Man kann es sich wie in Abbildung 66 vorstellen. Der grüne Bereich samt der Lücke dazwischen stellt die Trennebene der beiden Gushälften dar.

Gibt man dem Solver nun vor, dass das Teil gesplittet werden soll, trennt er es und orientiert sich ausgehend vom grünen Bereich in Richtung Entformungsrichtung für die Materialverteilung.. Dabei werden Materialanhäufungen (hier gelb), die eine Entformung verhindern oder erschweren würden, vermieden. Durch dieses Vorgehen entsteht bei der Optimierung dieses charakteristische Gerippe. Es bietet unter den gegebenen Rahmenbedingungen die besten mechanischen Eigenschaften und wäre für den Guss geeignet. Mehr zur Fertigung in Kapitel 9 Fertigungs-Analyse.

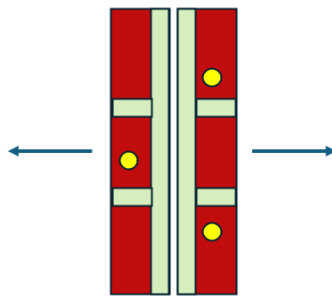


Abbildung 66 Guss Schema

Mit der deaktivierten Einstellung „no holes“ bekam der Solver die Möglichkeit, Löcher in der Entformungsrichtung bei einer Topologieoptimierung zuzulassen (siehe Abbildung 67). Dies kann bei Gussteilen sinnvoll sein, da es die Herstellbarkeit verbessert. Gussteile werden oft mithilfe von Formen hergestellt, und eine Entformungsrichtung ohne Hinterschnitte erleichtert das Entformen des Bauteils. Dadurch kann die Optimierung Material dort entfernen, wo es strukturell nicht notwendig ist, ohne die Entformbarkeit zu beeinträchtigen. Dies reduziert das Gewicht des Bauteils, ohne Kompromisse bei der Funktionalität oder Herstellbarkeit einzugehen.

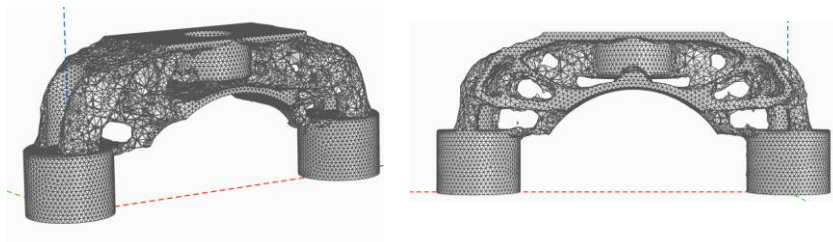


Abbildung 67 OptiStruct Guss "no holes" off

Im Vergleich zur massen- und spannungsbasierten Struktur zeigte die Nachgiebigkeits- und volumenbasierte Optimierung eine deutlich kompaktere Struktur mit weniger Streben. Dies liegt daran, dass bei der steifigkeitsbasierten Optimierung das Ziel darin besteht, die Gesamtsteifigkeit des Bauteils bei minimalem Materialeinsatz zu maximieren. Hierbei wird gezielt Material nur an den Stellen belassen, die entscheidend zur Lastübertragung und Stabilität beitragen. Im Gegensatz dazu fokussiert sich die massen- und spannungsbasierte Optimierung auf eine gleichmäßige Spannungsverteilung, was häufig zu komplexeren Strukturen mit mehr Streben führt, aber besser Steifigkeitsergebnisse hervorbringt.

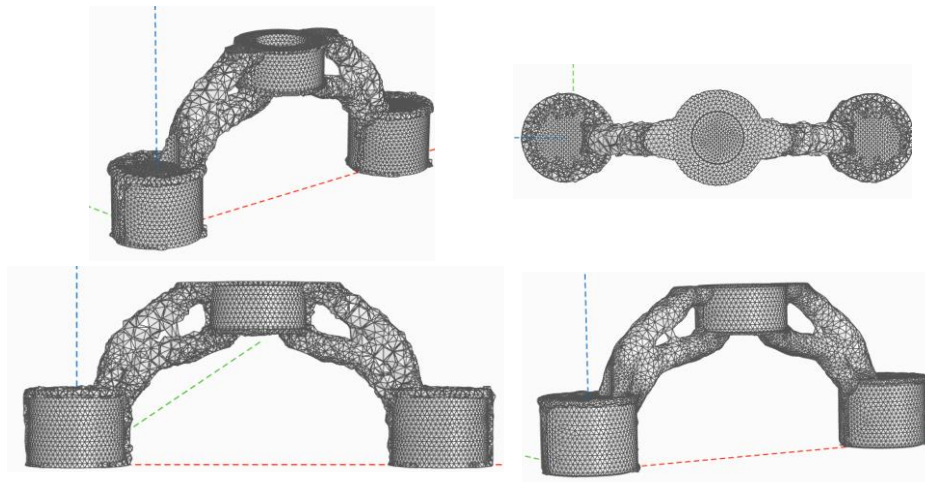


Abbildung 68 SIMP Volumen Guss

Nun wurden für eine bessere Gießbarkeit die Funktion „no holes“ verwendet. Damit sollte gewährleistet werden, dass möglichst keine Kerne oder Löcher in der Struktur entstehen die Hinterschnitte verursachen oder die Entformung behindern. Für Abbildung 68 zeigte der Solver eines der besten Ergebnisse. Die Struktur, ein auf Spannung optimiertes Design wies eine klare Abgrenzung der Bereiche auf, hatte zu gut wie keine Hindernisse die eine Entformung erschweren könnten und ergab in der FEA eine sehr gute Spannungsverteilung. Mit einer maximalen Spannung innerhalb der Struktur, von $93 \frac{N}{mm^2}$, lag diese in einem deutlich niedrigeren Bereich wie die der vorherigen Optimierungen. Besonders hervorzuheben ist die deutliche verbesserung der Steifigkeit bzw. Minimierung der Verschiebung. Mit einem Wert von etwa 0,04 mm lag das Ergebnis deutlich unter dem Ursprungswert. Lediglich bezüglich der Masse ist keinerlei Verbesserung erreicht worden. Dies lag allerdings an der Problematik, dass

das Modell erst mit einer intensiven Nachbearbeitung und einem aufrufen von zusätzlichen Schichten in ein „Solid“ formatiert werden konnte.

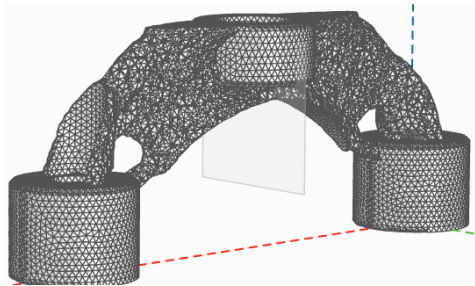


Abbildung 70 OptiStruct Guss_no holes

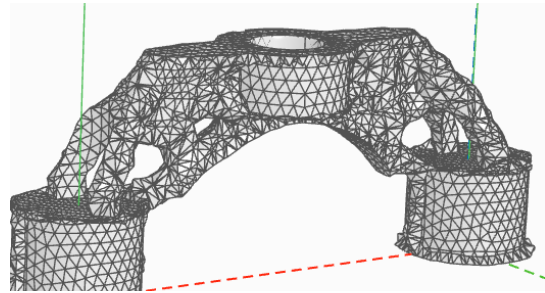


Abbildung 70 SIMP Steifigkeit Guss

7.3.1.4 Hexagon Emendate Struktur Guss

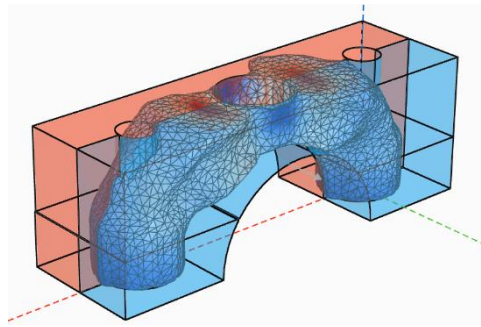


Abbildung 71 Guss Schema Hexagon Emendate

Betrachtet man nun die Optimierung durch den Casting-Algorithmus von Hexagon Emendate, also mit dem Gussverfahren, so geht der Solver ähnlich vor, wie bei der Additiven Fertigung. In diesem Fall wurde ebenfalls eine Trennebene in ZX eingebracht, sodass eine Entformung in Y-Richtung möglich ist. Entgegen der Erwartung sah es zumindest optisch nicht so aus als wäre dies ein klassisches Gussdesign. Lediglich die Versteifungsschultern mittig ähnelte diesem. Verblüffend war auch die Nähe zum Design für die additive Fertigung. Hexagon Emendate legt offensichtlich auch hier den Fokus auf die Spannungsverteilung und Optimierung der Masse. Worauf ein besonderes Augenmerk zu werfen ist, sind die Streben die dabei entwickelt wurden. Der Algorithmus versucht zwar ein ähnliches Ergebnis wie bei der additiven Fertigung zu erreichen, jedoch mit dem feinen Unterschied, dass die Löcher in der Struktur so ausgeformt sind, dass sie bei einer Entformung kein Hindernis darstellen. Lediglich die Streben an den beiden Kontaktpunkten stellten ein Hindernis dar, welches aber dem Designraum geschuldet war.

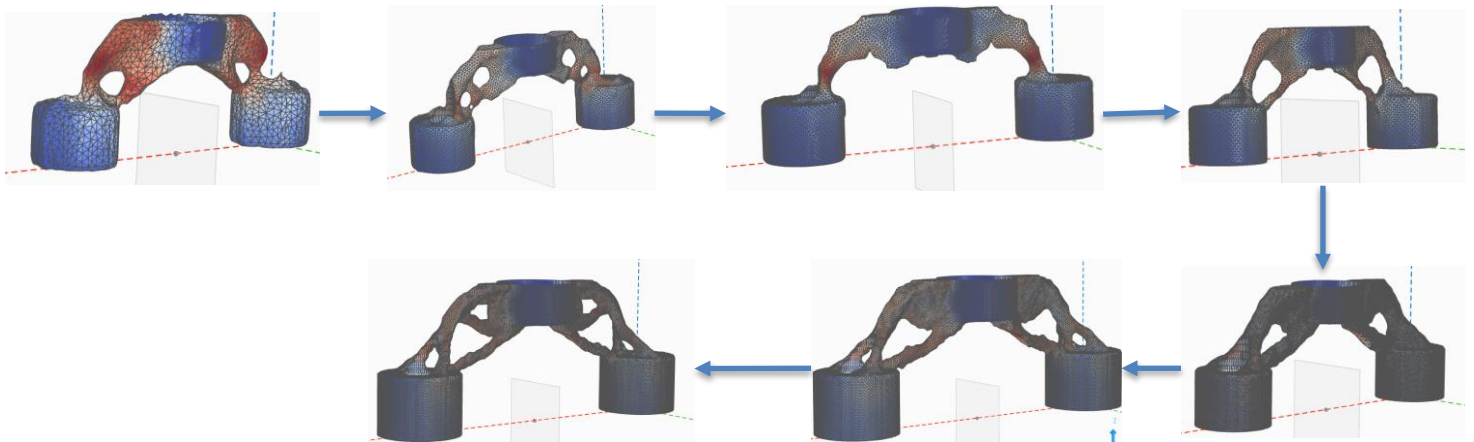


Abbildung 72 Optimierungs Prozess Hexagon Emendate

Für diese Optimierung wurde ein geringer „Taper Angle“ also ein Winkel für die Entformung gewählt um zu testen wie gering dieser eingestellt werden kann bis eine Optimierung keine sinnvollen Designvorschläge mehr hervorbringt. Nach einer Anpassung des Sicherheitsfaktors erreichte der Solver ein solides Ergebnis mit einer nahezu idealisierten Spannungsverteilung. Betrachtet man dieses Ergebnis genauer so sind keine Spannungsspitzen zu finden und die Struktur ist genau wie bei der additiven Fertigung klar abgegrenzt, besitzt kaum scharfe Kanten und ist zu großen Teilen gut abgerundet. Darin spiegelt sich der Vorteil dieses Solvers besonders wieder. Auch wenn Hexagon Emendate durch die Festlegung auf die Idealisierung der Spannungsverteilung ausgelegt und damit gegenüber Altair OptiStruct recht eingeschränkt ist, so erreicht er dennoch oftmals Designs, die nicht nur in der Optik überzeugen, sondern auch in Punkto Leistung.

Auch wenn hier die Vorzüge der Hard-Kill ähnlichen Methodik besonders zum Vorschein kommen, so müssen auch die Nachteile dabei betrachtet werden. Gleichbedeutend mit der Optimierung aus der additiven Fertigung erreicht der Solver eine Spannungsoptimierung die nahezu ideal ist. Doch dabei hat besonders die Steifigkeit des Bauteils das Nachsehen. Gerade diese mechanische Eigenschaft der Verformung zu widerstehen, macht eine Optimierung besonders sinnvoll. Das Ziel einer topologischen Optimierung ist vorrangig eine verbesserte Effizienz der Materialverteilung eines vorgegebenen Bauteils, ohne dabei, im Idealfall, eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften zu erzielen. Wenn dann nun durch die Optimierung zwar die Spannungen gleichmäßig verteilt werden und dabei die Masse reduziert wird, und dies dazu noch das Ziel der Optimierung ist, so leistet Hexagon Emendate wertvolle Arbeit. Doch oftmals ist der Aspekt der Maximierung der Steifigkeit eher im Fokus des Entwicklers. Bezogen auf dieses Anwendungsbeispiel, ist eine Gabelkrone, die die Lasten zwar sehr gut aufnimmt, sich dabei aber stärker verformt als es Toleranzen zulassen, so ist dieses Design nicht sinnig in diesem Fall. Obgleich das Ergebnis dieser Optimierung sich durchaus sehen lässt und die Optik, ebenso wie die Optimierung der additiven Fertigung, fast schon beeindruckend ist, stellt sich auch die Frage weshalb für Hexagon Emendate ein Spannungsbasierter Ansatz gewählt wurde, der lediglich durch das Herabsetzen der zulässigen Materialspannung eine Verbesserung der Steifigkeit erreicht. Diese Frage lässt sich durch mehrere Möglichkeiten beantworten. Die theoretische Antwort ist, dass der BESO Ansatz, der in diesem Solver verwendet wird mit dem spannungsbasierten Ansatz, trotzdem diverse Vorteile liefert. Anders als mit SIMP ist Hexagon Emendate dadurch in der Lage

Optimierungen, zumindest in der Theorie, deutlich flexibler und feiner zu gestalten. Der Solver kann damit die Struktur auf das absolute Minimum dessen herunterbrechen, damit die Spannungsverläufe ideal abbilden und dann das Material entsprechend so verstärken und verteilen, dass eine deutlich effizientere Materialverteilung entsteht. Dies liefert gegenüber SIMP und RAMP einen entscheidenden Vorteil. So punktet der Ansatz, den Hexagon Emendate nutzt, in Sachen Flexibilität, Ergebnisqualität und Anpassungsfähigkeit auf das jeweilige Fertigungsverfahren. Hexagon Emendate erlaubt, bezogen auf das Gussverfahren, eine Anpassung hin bis ins kleinste Detail. Ein Aspekt sind Rundungen, die verhindern, dass ungleichmäßiges Abkühlen Verzug des Bauteils verursacht. Diese können durch Vorgaben im Fertigungsverfahren klar definiert und dann in der Optimierung berücksichtigt werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Formschrägen. Eine der Grundlagen der Fertigungsrestriktionen ist, dass Schrägen immer so zu positionieren sind, dass das Bauteil nach dem Abkühlen auch entformt werden kann. Dafür bietet Hexagon Emendate die Einstellung „Tapering Angle“. Dieser definiert zusammen mit der vordefinierten Gussformhälfte in welche Richtung und in welchem Winkel die Struktur geformt sein darf. Auf diese Weise erreicht der Solver Ergebnisse (siehe Abbildung 73) die der Gussfertigung im höchsten Maße entsprechen. Die entstandene Struktur stellt trotz der verschlechterten Steifigkeitseigenschaften dennoch eine Verbesserung dar. Die Masse wurde hier um 150 Gramm, also um 17% von der Originalmasse reduziert. Bedeutender ist dabei die maximale vorhandene Spannung innerhalb der Strukturen. Diese lag bei diesem Ergebnis bei maximal $289 \frac{N}{mm^2}$. Ausgehend von einer zulässigen Spannung von $370 \frac{N}{mm^2}$, war der Maximalwert weit darunter. Stellt man diese Ergebnisse nun der Steifigkeit, repräsentiert durch die maximale Verschiebung, gegenüber so ist der Vorteil dieses Ansatzes doch stärker zu Gewichten. Für diesen speziellen Anwendungsfall ist die Methodik des Solvers zwar nicht ideal, doch mit einem passenden Bauteil, das nicht so sehr auf die Steifigkeit angewiesen ist, sondern auch eine verbesserter Spannungsverteilung und damit mehr Sicherheit in der Nutzung, so ist Hexagon Emendate eine sehr gute Wahl.

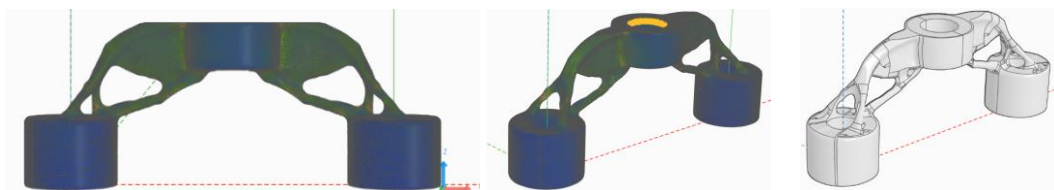


Abbildung 73 Gabelkrone Casting; Max Disp 0,158mm (neu), 0,0867mm (alt);

Masse 0,74 Kg

7.3.1.5 Altair OptiStruct/ Hexagon Emendate Gabelkrone Vergleich

Tabelle 4 Gabelkrone Ergebnisse additive Fertigung

Gabelkrone Ergebnisse Additive Fertigung			
Wert	Altair OptiStruct (SIMP) steifigkeitsbasiert	Altair OptiStruct (SIMP) spannungsbasiert	Hexagon Emendate spannungsbasiert
Max. Verschiebung [mm]	0,094	0,059	0,130
Max. Von Mises Spannung [$\frac{N}{mm^2}$]	119,43	106	150
Massereduzierung [%]	25,73	6	16,85
Neue Masse [Kg]	0,661	0,838	0,740

Tabelle 5 Gabelkrone Ergebnisse Guss

Gabelkrone Ergebnisse Guss			
Wert	Altair OptiStruct steifigkeitsbasiert	Altair OptiStruct spannungsbasiert	Hexagon Emendate spannungsbasiert
Max. Verschiebung [mm]	n.v.	0,04	0,158
Max. Von Mises Spannung [$\frac{N}{mm^2}$]	n.v.	93	289
Massereduzierung [%]	n.v.	0	5
Neue Masse [Kg]	n.v.	0,890	0,740

n.v. = nicht vorhanden

Vergleicht man nun die Ergebniswerte der einzelnen Optimierungen so fällt schnell auf, dass Hexagon Emendate mit der Spannungsbasierten Optimierungen im Schnitt schlechter abschneidet. Besonders in Punkto maximale Verschiebung hat der Hexagon Emendate Solver deutlich das Nachsehen. Mit einem Wert von 0,13 mm liegt dieser ganze 33% über dem Anfangswert. Diese Verschlechterung rührt vermutlich von der mangelnden Einstellmöglichkeit der Parameter zur Verbesserung der Steifigkeit her. Die Spannungsoptimierte Vorgehensweise des Solvers erlaubt keine genaue Einstellung der maximalen Verschiebung oder ähnlichem. Die Ergebnisse von Altair OptiStruct hingegen erzielen bei den Optimierungen bessere Ergebnisse. Die Werte der maximalen Verschiebung und der maximalen Spannung liegen bei diesen Ergebnissen, teils in ähnlichen oder gar besseren Bereichen als Hexagon Emendate. Zurückzuführen ist dies auf die vielseitigen Einstellmöglichkeiten für die Optimierungen, die es ermöglichen abseits von den Restriktionen Anpassungen vorzunehmen, die die Endergebnisse maßgeblich beeinflussen.

7.3.2 Rohr-Konstruktion

Im folgenden Abschnitt wurde eine Rohr-Flansch-Konstruktion analysiert, um die spezifischen Schwächen des Hexagon-Solvers zu untersuchen. Der Solver zeigt, zumindest laut Herstellerangaben, Schwierigkeiten bei der Optimierung besonders dünner Strukturen. Daher wurde die Konstruktion so gewählt, dass sie lediglich ein Rohr mit anpassbarem Durchmesser und Wandstärke umfasst. Dieses Anwendungsbeispiel ist nicht darauf ausgelegt eine besondere Leistungsverbesserung durch die Optimierungen zu erreichen, sondern ist dazu da mögliche Schwächen bzw. auch potentielle Verbesserungen der Algorithmen zu identifizieren. Es geht also darum möglichst ein Ergebnis mit den Solvern Altair OptiStruct und Hexagon Emendate zu erreichen und anschließend, die Problematiken zu evaluieren.

Beginnend für die Bewertung der Spannungsverteilung und Steifigkeit wurde die FEA der ursprünglichen Konstruktion durchgeführt und in Abbildung 74 dargestellt. Die Analyse zeigt, dass die Spannung entlang des Rohrverlaufs in Richtung des Flansches ansteigt und ihren maximalen Wert im Übergangsbereich zwischen Flansch und Rohr erreicht. Die Verschiebung beziehungsweise Biegung des Rohrs nimmt kontinuierlich in Richtung der Rohrspitze zu, bleibt jedoch insgesamt gering. Der Designraum wurde auf den zylindrischen Hohlkörper beschränkt, da der Flansch als funktionskritisch angesehen wird und daher unverändert bleiben muss.

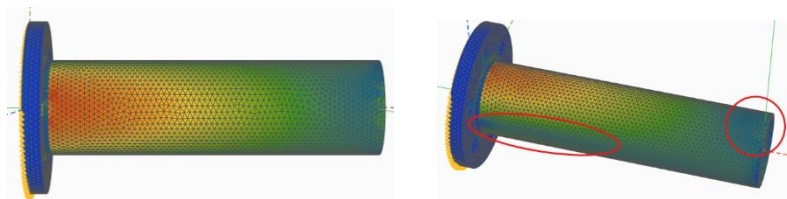


Abbildung 74 Rohrflansch FEA

7.3.2.1 Altair OptiStruct Struktur additive Fertigung

Wie in der Beschreibung des Anwendungsfalls dargelegt, bestand das Ziel darin, die Grenzen der beiden Solver auszuloten. Zu diesem Zweck wurde die Dicke des Rohrblechs bei jeder Optimierung schrittweise reduziert, um zu prüfen, ab wann der Solver keine sinnvollen Ergebnisse mehr liefern kann. Die Randbedingungen mit den zugehörigen Werten sind aus dem Anhang zu entnehmen. Die erste Optimierungsiteration, deren Ziel die Maximierung der Steifigkeit und die Minimierung der Masse war, ist in Abbildung 75 dargestellt. Aufgrund des begrenzten Designraums musste der Algorithmus Bereiche auswählen, die einerseits kaum bis gar essenziell für die Steifigkeit waren und andererseits eine geringe Belastung aufwiesen. Das erste Ergebnis zeigt, dass der Algorithmus bei einem niedrigen Iso-Wert vorrangig Material in Bereichen mit der geringsten Belastung entfernt hat. Unter normalen Umständen würde Material über den gesamten Designbereich verteilt abgetragen werden. In diesem Fall jedoch konzentrierte sich die Materialreduktion ausschließlich auf die zuvor genannten Bereiche. Dies deutet darauf hin, dass der begrenzte Designraum bei einer Blechdicke von fünf Millimetern die Optimierungsmöglichkeiten bereits erheblich einschränkt. Der Solver versucht dabei, unter

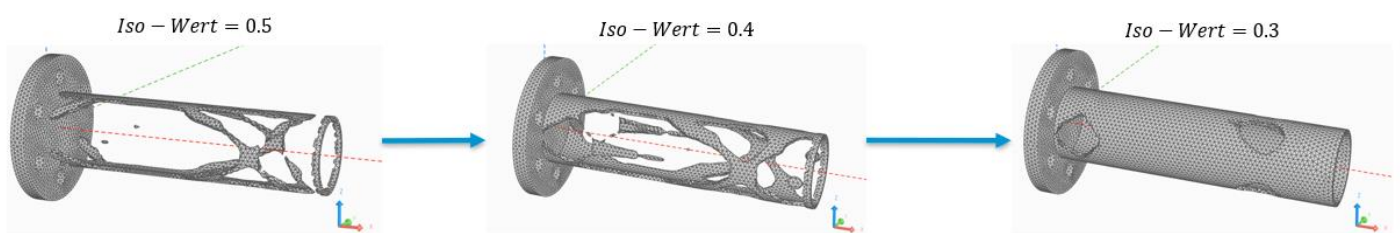


Abbildung 75 OptiStruct Rohrflansch Beispiel Optimierung AM

der Vorgabe maximaler Steifigkeit, die ursprüngliche Struktur so weit wie möglich beizubehalten.

Die vorherige FEA zeigt, dass aufgrund der vorhandenen Last nur wenig Spielraum für eine Variierung der Dichte besteht. Betrachtet man das Ergebnis bei einem Iso-Wert von 0,5, bestätigt sich diese Annahme. Dieser Wert liefert erfahrungsgemäß, natürlich in Abhängigkeit vom Anwendungsfall, robuste Ergebnisse, die sich gut für eine weitere Verarbeitung eignen. In diesem Fall jedoch erwies sich das Ergebnis als so fragil, dass es nicht in ein „Solid“ für die weitere Verarbeitung umgewandelt werden konnte. Es würde eine zusätzliche Nachbearbeitung, durch das Auftragen von Materialschichten erfordern, was den Designraum

verletzen würde. Dies wirft die Frage auf, warum das Ergebnis so ungewöhnlich instabil erscheint.

Um diese Fragestellung zu beantworten, muss der SIMP-Ansatz (siehe 3.2.1) betrachtet werden. Dieser optimiert die Steifigkeit durch Anpassung der Dichte- bzw. Materialverteilung. Jedes Element wird hierbei mit einem Dichtewert zwischen 0 und 1 belegt. Ein Dichtewert von 0 bedeutet, dass das Element nicht existiert oder nicht fest ist, während ein Wert von 1 auf ein festes, notwendiges Element hinweist. Wie in Kapitel 6.1.4 Punkt 7 erläutert, lässt ein höherer Iso-Wert nur Elemente mit einer höheren Dichte zu bzw. setzt den Schwellwert für diese höher an. Das bedeutet, dass die Strukturen mit einem Iso-Wert von 0,5 nahezu ausschließlich eine Dichte von 1 haben sollten. Dies deutet darauf hin, dass die gezeigte Struktur bereits die essenziellen Bestandteile darstellt, die für die Integrität des Bauteils unerlässlich waren.

Es lies sich zudem beobachten, dass eine nennenswerte Veränderung der Struktur erst bei einer Absenkung des Schwellwerts auf 0,3 bis 0,4 auftrat. Erst bei einem Iso-Wert von 0,3 wurde eine Struktur dargestellt, die sich in ein „Solid“ umwandeln und weiter analysieren ließ.

Was bedeuten diese Erkenntnisse für die Optimierungen? Aufgrund des eingeschränkten Designraums war der Solver gezwungen, drastischere Entscheidungen bei der Dichteverteilung zu treffen, um die Vorgaben einzuhalten. Dadurch wurde stärker zwischen den Dichtewerten 1 und 0 differenziert, was zur Folge hatte, dass geringfügige Änderungen des Schwellwertes kaum Auswirkungen auf die Materialverteilung zeigten. Heißt der Solver nähert sich unter den gegebenen Randbedingungen verstärkt der RAMP Methodik mit einer strengeren Dichtedifferenzierung.

Um die Optimierung für die additive Fertigung (AM) anzupassen und sicherzustellen, dass sie den bestehenden Lastanforderungen entspricht, waren mehrere Änderungen erforderlich. Zunächst wurden die minimalen und maximalen Elementgrößen angepasst, um sicherzustellen, dass die resultierenden Streben zum einen den Designraum einhalten können und zum anderen

die Fertigungsrestriktionen und Zielvorgaben erreichen. Darüber hinaus wurden die Symmetriebedingungen erweitert. Die neuen Symmetrien, XY und XZ gaben dem Solver mehr Möglichkeiten die Strukturen im Rotationssymmetrischen DS besser anzupassen und ermöglichten es eher eine sinnvolle Struktur zu bilden. Das Ergebnis dieser Anpassungen ist in Abbildung 76 veranschaulicht. Die Struktur war nun deutlich klarer definiert und wies eine so effiziente Spannungsverteilung auf, dass die Skalierung für die Einfärbung der Spannungsbereiche hochgesetzt werden musste um diese sichtbarer zu machen.

Doch auch hier machte sich die Problematik des Altair OptiStruct Solvers hinsichtlich der Nachbearbeitung bemerkbar. Nur nach einer mehrfachen Anpassung der Parameter und einer intensiven Nachbearbeitung durch einen speziellen Workflow konnte das Modell in ein Solid umgewandelt werden. So scheint Altair OptiStruct ebenfalls mit sehr dünnen Strukturen Probleme zu bekommen. Während Räume mit genügend Designraum sich meist problemlos nachbearbeiten und formatieren lassen ist es für diesen Anwendungsfall mehrfach nur unter bestimmten Umständen möglich gewesen.

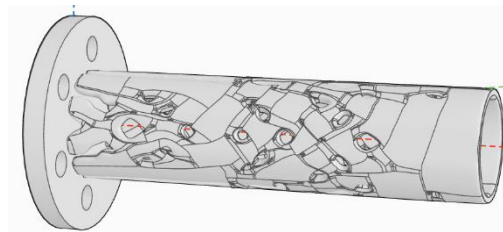


Abbildung 76 OptiStruct AM Optimierung

7.3.2.2 Hexagon Emendate Struktur additive Fertigung

Im Fall von Hexagon erwies sich die Situation deutlich anders. Während der Altair-Solver noch in der Lage war, mit einer Blechdicke von fünf Millimetern zu arbeiten, stieß der Hexagon-Solver bei dieser Dicke an eine Grenze mit den Grundeinstellungen. In der Optimierung wurden

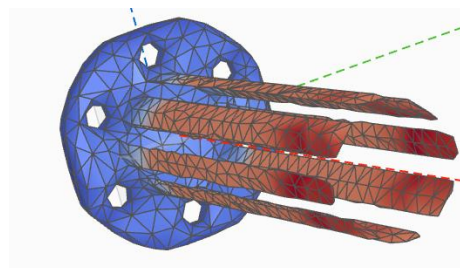


Abbildung 77 Hexagon Emendate Auflösungsfehler

nur noch der Flansch und ein grober Umriss des Rohres dargestellt. Der restliche Bereich des Teils wurde, vermutlich aufgrund des zu groben Meshings, zu Beginn der Analyse nicht mehr abgebildet. Damit das gesamte Material hier sichtbar wird musste über die „Advanced User Settings“ die Auflösung des Meshings manuell angepasst werden. Jedoch kam hier dann die Frage auf weshalb dies nicht automatisch passiert ist. Die Auflösung wird vom Solver im Laufe der Optimierung immer weiter verfeinert. Dabei wird zu Beginn auch die Komplexität des Problems berücksichtigt und die Auflösung am Anfang entsprechend normalerweise angepasst. In diesem Fall geschah diese Anpassung nicht. Vermutlich verwendet der Solver für die Auflösung lediglich den Input und berücksichtigt dabei nicht ob das Modell vollständig abgebildet wird bzw. ob das Meshing dafür passend ist. Die Folge daraus ist, dass die Berechnungen, ab etwa der siebten bis zehnten Iteration „feststecken“ und die Optimierung

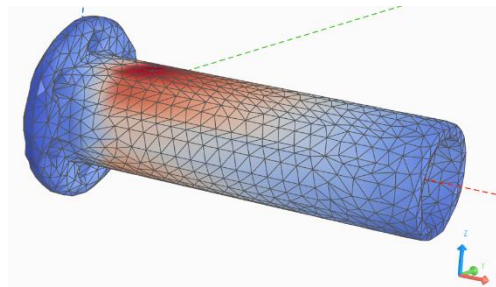


Abbildung 78 Hexagon Emendate FEA

nicht vorgenommen werden konnte. Damit dieses Problem behoben werden konnte, musste wie bereits erwähnt die Auflösung angepasst werden (siehe Abbildung 78). Als Alternative kann dem Solver ein größerer Designraum zur Verfügung gestellt werden, sofern das Bauteil dies zulässt.

Letztendlich ist diese Problematik, dass der Solver dieses Rohr nicht einfach bearbeiten kann, eine Problematik des Solvers, die ggf. noch verbessert werden kann. Die Einstellung der Auflösung müsste, wenn der Solver dem „Nutzerfreundlichen“ Weg folgen soll, eine automatisierte Logik beinhalten, die die Abbildbarkeit des Bauteils ebenso gewährleistet.

Die Vorgehensweise, wie Hexagon Emendate arbeitet wurde hier nochmals deutlicher gezeigt. Es wird in den ersten Iterationen damit begonnen Material zu entfernen und keines hinzuzufügen. Damit spart der Solver einiges an Zeit, da der Designraum bis auf die kritischsten Bereiche (siehe Abbildung 79) hin reduziert wurde und dann damit begonnen wird, sich von diesem Bereich hin zum Optimum voran zuarbeiten. Ab diesem Punkt setzt erst der bi-direktionale Ansatz von BESO wirklich ein. Die mechanischen Spannungen bei einer solchen Struktur sind natürlich weit über dem ertragbaren, weshalb nun damit begonnen wird neues

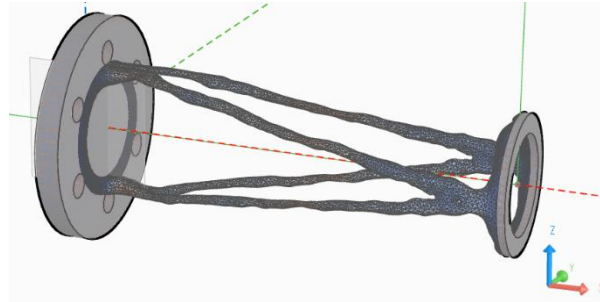


Abbildung 79 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 1

Material um die vorhandenen Elemente herum hinzuzufügen. Bezieht man diesen Aufbau nun auf das anfängliche FEA Modell so ist erkennbar, dass bei diesem Ansatz die Elemente entfernt wurden, die unterbelastet wurden. Die Struktur in dieser Abbildung folgten also den Wegen der mechanischen Spannungen und erreicht durch das Hinzufügen von neuem Material eine wesentlich bessere Verteilung der mechanischen Spannungen.

Es stellt sich die Frage bei einer solchen Vorgehensweise, ob denn nicht eine andere Methodik effizienter wäre. Bei dem Entfernen des Materials hin bis zum Kern der Verlaufswege wurde ebenso Material entfernt, das für eine stabilere Struktur geeignet gewesen wäre. In diesem Fall würde das Design ähnlich einem von Altair OptiStruct sehen. Doch hier unterscheiden sich die beiden Ansätze gänzlich. Mit dem reinen Entfernen von Material wird der Algorithmus eingeschränkt durch die vorher definierte Auflösung aus der FEA. Bedeutet, wenn zum Beispiel eine Elementgröße von zwei vorgegeben wurde, muss der Algorithmus von Altair OptiStruct einen Weg finden mit dieser Auflösung eine effiziente Materialverteilung zu erreichen. Wenn dann also scharfe Kanten oder zu wenig Designraum vorhanden sind, muss der Algorithmus in diesen Bereichen Abstriche machen. Das hat zur Folge, dass die Spannungen nicht ideal verteilt werden können. Hexagon Emendate hingegen besitzt hier den „Luxus“ radikal, unnötiges, Material zu entfernen und Schritt für Schritt während der Optimierung die Auflösung

anzupassen. Dadurch werden besonders kritische Kerben oder scharfe Kanten, die oftmals bei Altair OptiStruct auftreten und aufwendig nachbearbeitet werden müssen, verhindert und eine glatte Struktur erreicht. Zum Abschluss einer Optimierung wendet der Solver noch eine Art geometrischen Radierer an. Der geometrische Radierer dient der Verfeinerung der Optimierung und entfernt unerwünschte oder instabile Strukturen. Dabei analysiert dieser kontinuierlich die Geometrie der optimierten Struktur und eliminiert kleine, ineffiziente Elemente, die die Fertigungsfähigkeit oder die strukturelle Integrität beeinträchtigen könnten. Dies verbessert die Qualität der finalen Geometrie, indem er eine robustere und fertigungsgerechtere Form sicherstellt. Genauer geht der Algorithmus dabei vor, wie es bei einer Konstruktionszeichnung von Hand getan werden würde. Die Überhänge der entstandenen Struktur werden durch den Algorithmus analysiert. Sind dann Elemente vorhanden, wohlgeachtet bei sehr hoher Auflösung des Meshings, die gegen die vorgegebenen Restriktionen verstoßen oder auch für eine unsaubere Spannungsverteilung in den Randzonen sorgen, so werden diese entfernt. Dabei muss der Algorithmus auch die Folgen dessen berücksichtigen, wenn das Material entfernt wird. Daher ist die Auflösung des Meshings in dieser Phase besonders wichtig. Bei einer größeren Auflösung kann der Radierer zwar Material entfernen, jedoch wird damit eine Verschlechterung der Struktur riskiert.

Mit veränderten Randbedingungen, genauer einer „high“ Support-Strategie, einem globalen Sicherheitsfaktor von 6 und einer dichten Struktur entstand mit diesem Designraum ein deutlich komplexeres Problem für den Solver. Das Design in Abbildung 80 stellt dieses nach einer Berechnungszeit von 2,5 Stunden dar. Also weit über der „normalen“ Berechnungsdauer von 45 Minuten bis 1 Stunde.

Betrachtet man diese Struktur genauer so fällt auf, dass eben dort Materialansammlungen vorhanden waren, wo es bei dem Lastfall dieses Anwendungsfalls nicht erwartet werden würde.

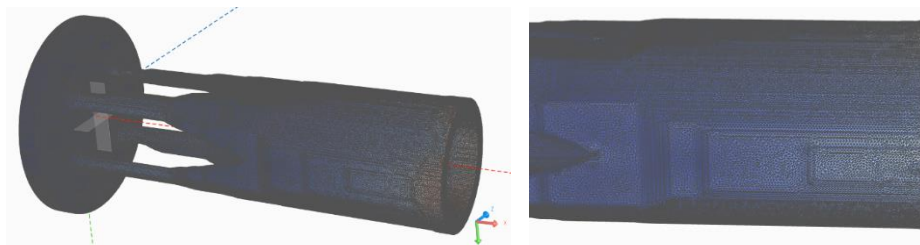


Abbildung 80 Hexagon Emendate, Optimierungsfehler 2

Die maximale Spannung des Teils verläuft eher Richtung Flansch. Wieso also, hat Hexagon

Emendate diese Materialverteilung gewählt? Aller Wahrscheinlichkeit nach arbeitet der Algorithmus mit irgendeinem gearteten Bewertungssystem, wann welche Randbedingungen oder Restriktionen zu priorisieren sind. In diesem Fall ist die Support Strategie wohl vorrangig gegenüber einer idealisierten Spannungsverteilung. Ansonsten hätte die Materialverteilung umgekehrt sein müssen und vom Flansch aus immer weniger werden.

Auf den zweiten Blick gibt es hier noch eine weitere Besonderheit. Es haben sich während der Optimierung rechteckige Materialanhäufungen (rechts) gebildet. Diese Ausbildung ist ein Novum in den bisherigen Anwendungen und scheint mit der eingeschränkten Designfreiheit und den Restriktionen des Verfahrens zusammenzuhängen. Am wahrscheinlichsten handelt es sich dabei um eine Art von numerischen Artefakten. Also unerwünschte Strukturen, die in einer Optimierung oder Simulation entstehen können, ohne dass sie eine reale, funktionale Bedeutung haben. Sie resultieren häufig aus den Grenzen oder der Ungenauigkeit der numerischen Methoden, die bei der Berechnung verwendet werden, und spiegeln nicht zwangsläufig eine optimale oder realistische Lösung wider. Die rechteckigen Strukturen könnten auch direkt mit den eingeschränkten Freiheitsgraden und den Designrestriktionen des Verfahrens zusammenhängen. Wenn die Freiheitsgrade des Designs stark eingeschränkt sind, etwa durch Vorgaben hinsichtlich der Fertigbarkeit oder geometrische Restriktionen, kann der Solver gezwungen sein, auf weniger optimale Materialverteilungen zurückzugreifen. In solchen Fällen gibt es oft wenig Spielraum, was zu geometrischen Mustern wie in diesem Fall führen kann. Regularisierungsmethoden, wie der geometrische Radierer, die verwendet werden, um glattere Ergebnisse zu erzielen, können diese rechteckigen Muster nochmals verstärken, insbesondere wenn die Parameter dafür nicht optimal sind oder die geometrischen Einschränkungen, wie der verringerte Designraum stark wirken.

Diese Art der Struktur ist im Endeffekt nicht sonderlich vorteilhaft. Eine Beschädigung von nur einer der dünnen Streben würde die Integrität der gesamten Konstruktion gefährden und wäre daher nicht für einen realen Anwendungsfall geeignet.

Verglichen zu Altair OptiStruct verursachte dieser Anwendungsfall deutlich mehr Probleme für den Hexagon Emendate-Solver als erwartet. Dieser versucht partout Strukturen zu erzeugen, die so nicht nutzbar oder gar fertigbar sind. In einer erneuten Anpassung trat ein weiteres Novum auf, das es in keiner bisherigen Simulation gab. Nach etwa einer Stunde begann der

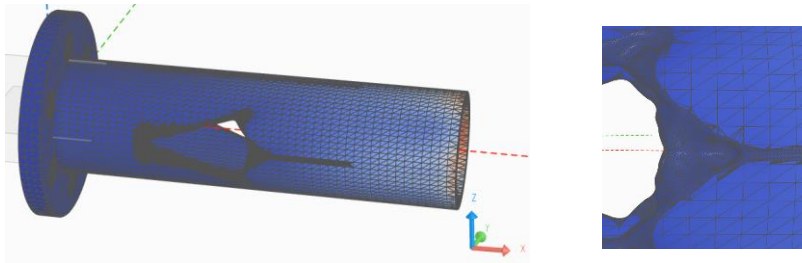


Abbildung 81 Hexagon Emendate Optimierungsfehler 4

Algorithmus das Meshing Element für Element wieder größer zu gestalten. Dies scheint eine gesonderte Funktion innerhalb des Algorithmus zu sein, dass wenn eine Struktur bei einer feinen Auflösung keine nennenswerten Ergebnisse nach einer bestimmten Zahl von Iterationen mehr liefert, diese wieder in ein grobes Meshing übersetzt, wird um ggf. neue Ansätze zu finden. Interessant dabei war, dass die Randzonen an den Löchern das feine Meshing behalten. Die wahrscheinlichste Erklärung dafür ist, dass trotz des erneuerns der anderen Bereiche, dieser Bereich der Struktur Potential beherbergt. Auch kann eine Ursache dafür der Spannungs-Algorithmus sein. Wenn eine Struktur in einem so weitem Iterationsstadium bereits entstanden ist, gilt für diese eine optimierte Spannungsverteilung. Würden nun auch diese Bereiche einem größeren Meshing wieder unterzogen werden, dann würde die optimierte Spannungsverteilung dort wieder zunichte gemacht werden und die ganzen vorherigen Iterationen vergeblichste sein. Aus diesen Gründen entstehen dann wahrscheinlich diese „vernarbte“ Struktur.

Wie wird nun für einen solchen Anwendungsfall eine Struktur erreicht, die sinnvoll optimiert ist. Nun die Antwort darauf ist nicht einfach. Der Designraum des Anwendungsfalls bereitete dem Solver solche Probleme, dass auch die Anpassung der zur Verfügung stehenden Parameter

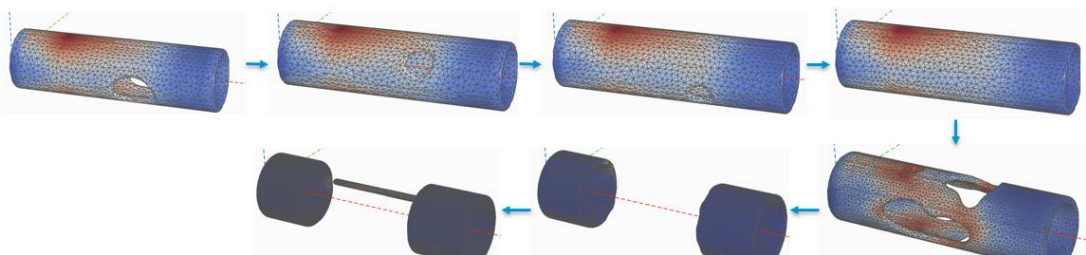


Abbildung 82 Hexagon Emendate Optimierungsfehlerkette

unter diesen Voraussetzungen keine Lösung lieferten. Der Solver erreicht entweder Strukturen wie aus den vorherigen Abbildungen, die nicht nutzbar sind oder verstrickt sich in ein lochartiges Entfernen und wieder Hinzufügen von Material bis hin zur 24. Iteration (siehe Abbildung 82), die etwas Hoffnung auf eine verbesserte Struktur macht. Mit Iteration 25 scheint der Solver doch auch diese verworfen zu haben. Der gesamte mittlere Bereich wurde entfernt und durch eine einzelne Strebe ersetzt die in den folgenden Iterationen nicht mal die gegenüberliegende Seite der Struktur erreicht. Die Problematik des Solvers bei einem eingeschränkten Designraum eine sinnvolle Struktur zu erreichen scheint deutlich gravierender zu sein. Die wahrscheinlichste Lösung wäre es dem Solver eine andere Zielrestriktion als die Spannungsverteilung zu geben. Durch die Spannungsrestriktion und den eingeschränkten Raum zur Verteilung des Materials wird dem Solver die Möglichkeit genommen ein Ergebnis zu liefern. Bezogen auf den theoretischen Hintergrund über die Dimensionierung des Designraumes, verdeutlicht dies nochmals die Wichtigkeit dessen. Eine ausreichend große Dimensionierung ermöglicht es dem Algorithmus

7.3.3 Schadensfallanalyse

Nachdem nun die Analyse der Ergebnisse aus den Optimierungen erfolgt ist und passende Designs ausgewählt wurden, soll hier noch ein weiterer wichtiger Aspekt besprochen werden. Es geht dabei um die Frage was passiert, wenn Teile der optimierten Struktur versagen oder beschädigt werden. Hintergrund dessen ist, dass topologische Optimierungen oftmals nicht aus einer einzigen dicken Strebe bestehen, sondern aus „Verästelungen“ bestehen, die einzeln zwar den Lasten nicht standhalten würden, aber im Verbund mit anderen, diesen doch gewachsen sind. Sollte jedoch eine dieser Verästelungen versagen, gilt es zu überprüfen, ob das Bauteil

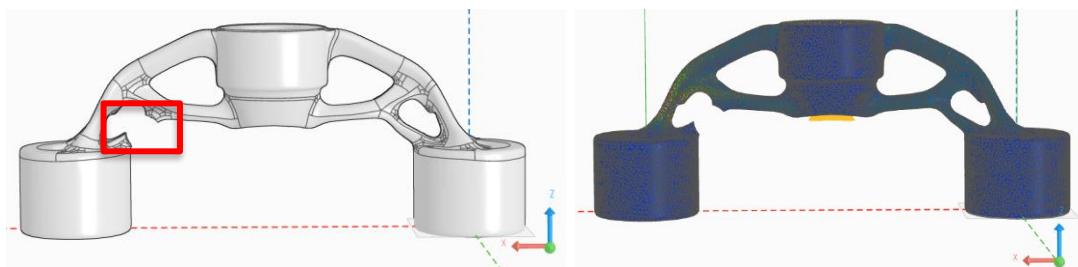


Abbildung 83 Schadensanalyse Hexagon Emendate

dennoch standhalten würde. Für diese Schadensfallanalyse wurden die zwei favorisierten Designs aus der Struktur-Analyse für das additive Fertigungsverfahren ausgewählt. Da es in der Arbeit darum geht die beiden Solver Altair OptiStruct und Hexagon Emendate zu vergleichen werden auch hier vergleiche dahingehend gezogen wie robust die Strukturen bei den ähnlichen Schadensfällen sind. Für die Analyse wurden, manuell, die jeweiligen Streben beschädigt, die bei der FEM- Analyse mit die höchste mechanische Spannung aufzeigten und daher am wahrscheinlichsten versagen würden. Es wurden also zwei Schadensfälle geprüft unter den gleichen Bedingungen. Nach der manuellen Beschädigung wurden die Modelle einer erneuten FEM-Analyse unterzogen um evaluieren zu können, wie sich die mechanischen Spannungen neu verteilen und ggf. neue Spannungsherde bzw. überlastete Stellen auftreten.

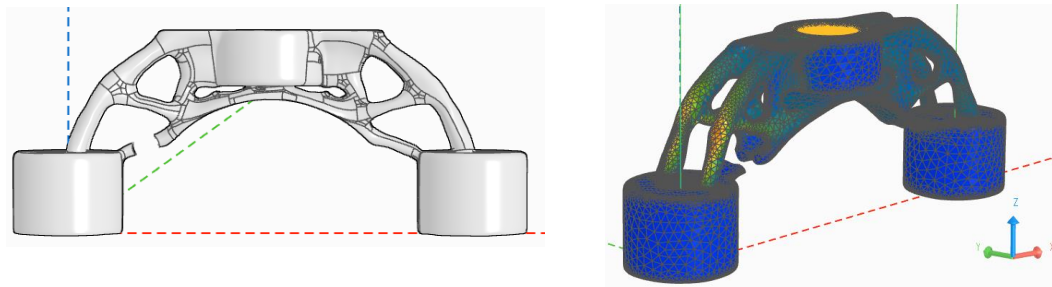


Abbildung 84 Schadensanalyse Altair OptiStruct

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Entfernung der Streben zu einer signifikanten Umverteilung der mechanischen Spannungen geführt hat. Vor der Modifikation waren die Spannungen im Bauteil gleichmäßig verteilt, wobei die Topologieoptimierung bereits die Hauptspannungsbereiche minimiert hatte. Nach der Entfernung der Streben kam es jedoch zu einer deutlichen Erhöhung der Spannungen in den verbleibenden Bereichen des Bauteils. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die ursprüngliche Lastverteilung durch das Fehlen der Streben nicht mehr optimal unterstützt wird. Besonders ausgeprägt waren die erhöhten Spannungen an den Verbindungsstellen und in den benachbarten Bereichen, die zuvor durch die entfernten Streben stabilisiert wurden. Betrachtet man nun den Vergleich der Tabelle... zwischen den mechanischen Werten der beiden Fälle, so zeigt sich bereits ein Unterschied. Die Schlussfolgerung aus dieser Analyse ist, dass das Beschädigen bzw. Entfernen von Streben in einem topologisch optimierten Bauteil erhebliche Auswirkungen auf die Spannungsverteilung hat. Die ursprüngliche Optimierung wird durch die Modifikation beeinträchtigt, was zu einer

ungleichmäßigen Lastverteilung und der Entstehung neuer Spannungsherde führt. Vergleicht man nun anhand der nachfolgenden Tabelle so ist Altair OptiStruct für einen Schadensfall, zumindest in diesem Anwendungsfall, besser gewappnet. Unter den gleichen Bedingungen hatte die Beschädigung deutlich geringere Auswirkungen. Aber dennoch lagen die neuen Spannungen weit über dem für das Material ausgelegt ist. Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Bedeutung einer sorgfältigen Prüfung und gegebenenfalls Anpassung bei Änderungen an topologisch optimierten Bauteilen. Es ist entscheidend, solche Änderungen zu berücksichtigen und zusätzliche Optimierungsmaßnahmen in Betracht zu ziehen, um die strukturelle Integrität und Leistungsfähigkeit des Bauteils sicherzustellen. Für solche Fälle bietet es sich an die Lastfälle genauestens zu überprüfen und entsprechend eine Sicherheit aufzubringen. Diese Sicherheit kann an Hand der Überprüfungs-FEA gewählt werden.

Tabelle 6 Gabelkrone Schadensanalyse neue FEA Werte

Neue FEA Werte		
Werte	Hexagon Emendate	Altair OptiStruct
Max. Verschiebung [mm]	1,13	0,322
Max. Von Mises Spannung [$\frac{N}{mm^2}$]	873,1	646,48

7.4 Ergebniszusammenfassung

Tabelle 7 Ergebniszusammenfassung Gabelkrone

Gabelkrone			
Solver	Fertigungsverfahren	Methode	Ergebniszusammenfassung
Altair	Additive Fertigung	SIMP	• Erreicht sowohl Spannungs- als auch Steifigkeitsbasiert sehr gute Ergebnisse. • Einschränkungen bei der Einhaltung von Fertigungsrestriktionen. Hoher „Penalty“ Faktor liefert kaum Mehrwert in diesem Fall. • Restriktionen wurden auf Grund der Geometrie des Bauteils teilweise missachtet
Altair	Additive Fertigung	RAMP	• Erreicht vergleichbare Ergebnisse wie SIMP. • Vorteile gegenüber SIMP bei der Einhaltung von Fertigungsrestriktionen der additiven Fertigung. • Dauer der Berechnungen ist auf Grund der strikteren Anforderungen etwa 50% länger. • Liefert in diesem Anwendungsfall schwer Ergebnisse durch die vorgegebene Geometrie • Hoher „Penalty“ Faktor liefert kaum Mehrwert in diesem Fall
Hexagon Emendate	Additive Fertigung	BESO	• Erreicht durch spannungsbasierte Optimierung sehr gute Spannungsverteilungen und fertigbare Ergebnisse • Einhaltung von Fertigungsrestriktionen wird stärker forciert • Mangelhafte Steifigkeit
Altair	Gussfertigung	SIMP	• Erreicht spannungsbasiert gute Ergebnisse.

			• Steifigkeitsbasiert verliert sich der Algorithmus, je nach Anwendungsfall in stundenlangen Berechnungen. • Parameter für die Gussfertigung sind beschränkt. Lediglich zwei Einstellmöglichkeiten.
Altair	Gussfertigung	RAMP	• Erreicht sowohl Spannungs- als auch Steifigkeitsbasiert sehr gute Ergebnisse.
Hexagon Emendate	Gussfertigung	BESO	• Erreicht durch spannungsbasierte Optimierung sehr gute Spannungsverteilungen. • Einhaltung von Fertigungsrestriktionen wird stärker forciert. • Gussergebnis weist bessere Spannungsverteilungen als Altair OptiStruct auf. • Steifigkeit ist nicht als Ziel formulierbar, sondern nur über die zulässige Spannung erreichbar • Keine eindeutigen Hinweise ob die Entformungsrichtung funktioniert • Behindert sich selbst mit dem Hard-Kill bei zu schnellem Voranschreiten des Entfernens von Material

Tabelle 8 Ergebniszusammenfassung Rohrflansch

Rohrflansch			
Solver	Fertigungsverfahren	Methode	Ergebniszusammenfassung
Altair	Additive Fertigung	SIMP	• Ergebnisse sind bei dünnem DS nur schwer zu erreichen. • Viel Nachbearbeitung erforderlich • Erfordert eine genaue definierung der Parameter für dünne DS um ein Ergebnis zu erreichen.
Altair	Additive Fertigung	RAMP	• Kein Ergebnis erreicht. • Die strenge Dichte Differenzierung verhindert ein sinniges Ergebnis
Hexagon Emendate	Additive Fertigung	BESO	• Keine Ergebnisse erreicht. • Der Solver war nicht in der Lage eine sinnvolle Optimierung vorzunehmen. Vermutete Schwäche bei eingeschränktem Designraum wurde bestätigt. • Der BESO Ansatz benötigt für eine Optimierung deutlich mehr Freiheiten, besonders bezüglich des Volumens des Designraumes. • Die beschränkten Restriktions- und Zielformulierungen erschweren eine Lösung verstärkt in diesem Anwendungsfall.

Die Untersuchung zeigt, dass sowohl die spannungs- als auch die steifigkeitsbasierte Optimierung beeindruckende Ergebnisse liefern.

Altair OptiStruct überzeugt durch hohe Flexibilität und Anpassungsmöglichkeiten. Die SIMP-Methodik bietet präzise Ergebnisse, doch die Einhaltung von Fertigungsrestriktionen ist oft schwierig. Die Verwendung der RAMP-Methode ist erforderlich, um saubere Ergebnisse für die additive Fertigung zu erzielen. Die Notwendigkeit umfangreicher Kenntnisse und Geduld ist ein Nachteil.

Hexagon Emendate punktet mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche und integriert die FEM-Analyse direkt in den Optimierungsprozess. Dadurch können mechanische Spannungen in Echtzeit überwacht werden. Die Optimierung für Guss- und additive Fertigungsprozesse ist gut implementiert, jedoch mangelt es an Anpassungsmöglichkeiten im Vergleich zu Altair.

Insgesamt ist die Wahl des Solvers abhängig von den spezifischen Anforderungen: Altair eignet sich für komplexe Projekte mit vielen Randbedingungen, während Hexagon ideal für schnelle Prototypen ist.

8 Fertigungsanalyse

Im Anschluss an die Strukturanalysen wurde eine qualifizierte Fertigungsanalyse anhand von zwei Beispielen aus der Optimierung durchgeführt. Genauer handelt es sich dabei um die Gabelkrone, die sowohl mit Hexagon Emendate als auch mit Altair OptiStruct für die additive Fertigung optimiert wurde (siehe Abbildungen 85+86). Für Altair OptiStruct wurde die SIMP-Optimierung verwendet, um gleiche Bedingungen für die Analysen zu schaffen, da Hexagon Emendate eine „Medium Support Reduction Strategy“ zugrunde hatte..

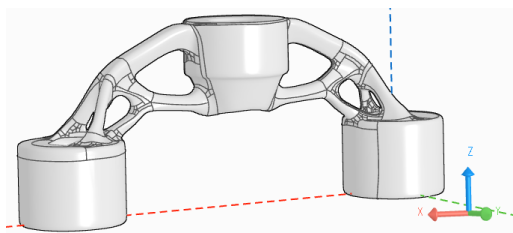


Abbildung 85 Hexagon Emendate AM, Support red.
Medium

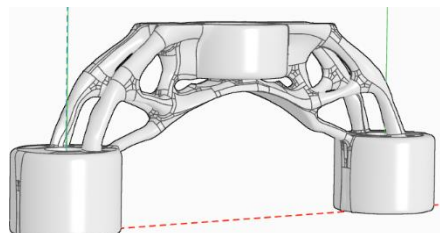


Abbildung 86 OptiStruct Penalty Medium
SIMP

Das Ziel dieser Analyse ist es, die entstandenen Strukturen hinsichtlich ihrer Fertigbarkeit unter Berücksichtigung der optimalen Bauteilausrichtung genauer zu betrachten und einen Vergleich zwischen den beiden verwendeten Tools zu ziehen.

Um die Fertigbarkeit zu beurteilen, werden zwei Tools verwendet. In Synera steht dazu das „Additive Design Tool Kit“ für die additive Fertigung zur Verfügung, das in verschiedene

Nodes für unterschiedliche Darstellungen der Stützstrukturen unterteilt ist. Es handelt sich dabei um ein Werkzeug zur Bewältigung der Herausforderungen im Bereich der additiven Fertigung. Das Tool dient dazu, das Design von Bauteilen für den 3D-Druck zu optimieren und die Position sowie das Volumen von Stützstrukturen zu schätzen. Synera bietet als Ergänzung eigene Nodes für die Analyse von Guss-, Fräs- und auch LBM- (Laser Based Melting) basierten Herstellungsverfahren (siehe Abbildung 87). Diese Nodes dienen der Kostenabschätzung durch die Anpassung verschiedener Parameter, die die Fertigungszeit beeinflussen.

Zusätzlich zu diesen Tools wird die browserbasierte Anwendung 3D-Spark verwendet, um Analysen durchzuführen, die weitere Optionen und Informationen für die Fertigung liefern. Dazu gehört ein Abgleich mit bestehenden Fertigungsverfahren, um zu prüfen, ob das optimierte Bauteil tatsächlich mit dem jeweiligen Verfahren herstellbar ist oder ob gegebenenfalls ein alternatives Verfahren besser geeignet wäre.

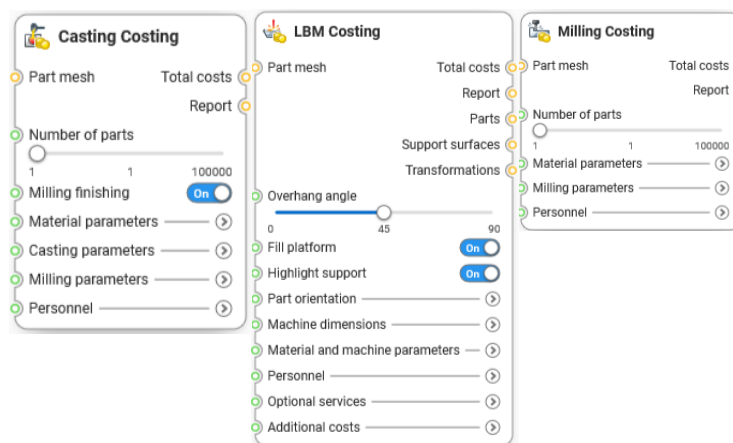


Abbildung 87 Fertigungsanalyse Tools Syner, Screenshot Synera, Version
Judicious Juracan

Der Unterschied zwischen dem Additive Design Tool Kit und 3D Spark liegt hauptsächlich in ihren Funktionen und Schwerpunkten. Das Additive Design Tool Kit konzentriert sich auf den Designprozess und die Optimierung von Bauteilen für die additive Fertigung, indem es Methoden, Richtlinien und Werkzeuge zur Verbesserung des Designs bereitstellt. Im Gegensatz dazu fokussiert sich 3D Spark auf die automatisierte Analyse und Kostenoptimierung von Bauteilen für additive Herstellungsverfahren. Es nutzt KI-gestützte Algorithmen, um Bauteile hinsichtlich ihrer Druckbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Während das Additive Design Tool Kit eher Designentscheidungen unterstützt, liegt der Schwerpunkt bei 3D Spark auf Effizienz und Kostenbewertung.

8.1 Fertigungsanalyse Synera

Synera bietet verschiedene Tools zur Analyse der Fertigbarkeit von Bauteilen an. Diese Tools können Überhänge analysieren und potenzielle Problemstellen identifizieren, die bei den jeweiligen Fertigungsverfahren Schwierigkeiten verursachen könnten. Genauer gesagt ist es sogar möglich, Bereiche zu identifizieren und zu visualisieren, die beim Gussverfahren Hinterschnitte erzeugen und entsprechend der Fertigungsrestriktionen Kerne für den Guss erforderlich machen.

Das Additive Design Toolkit, kurz ADT, bietet für die Analyse von additiv gefertigten Bauteilen die folgenden Nodes: „Mesh Angle“, „Feature Distance“, „Feature Thickness“ und „Support Zones“. Mit Hilfe des „Mesh Angles“ kann die Neigung der einzelnen Flächen zur Bauplatte analysiert werden. Diese Flächen werden entsprechend des eingestellten Winkels eingefärbt, wodurch sichtbar wird, welche Flächen beispielsweise eine Stützstruktur benötigen. Der Node „Feature Thickness“ visualisiert die Durchmesser der einzelnen Strukturen und zeigt an, welche dieser Strukturen Maße aufweisen, die möglicherweise nicht gefertigt werden können. Mit dem Node „Feature Distance“ lassen sich die Abstände zwischen einzelnen, sich gegenüberstehenden Strukturen oder Elementflächen darstellen und auswerten. Dabei wird von der Mitte einer Elementfläche bis zur anderen gemessen. Diese Funktion ist hilfreich, um zu prüfen, ob Strukturen zu nah beieinander liegen, da bei der additiven Fertigung ausreichende Abstände zwischen den einzelnen Strukturen vorhanden sein sollten. Zuletzt bietet das ADT noch den Node „Support Zones“, der dazu verwendet wird, die Stützstrukturen selbst zu visualisieren. So kann beurteilt werden, ob das gegebene Bauteil die Vorgaben, wie das Minimieren von Stützstrukturen, eingehalten hat oder ob Stützstrukturen an Stellen benötigt werden, an denen sie im ungünstigsten Fall nicht entfernt werden können, ohne die bestehende Struktur zu beschädigen.

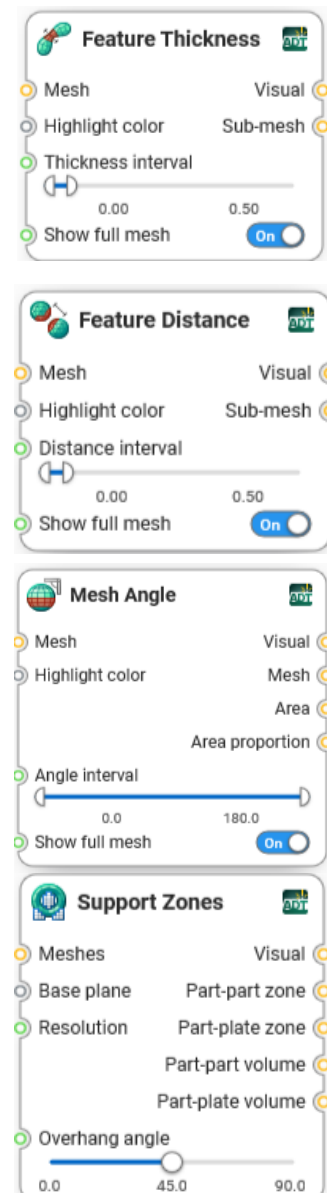


Abbildung 88 ADT Nodes
Synera, Screenshot Judicious
Juracan

Support Zones:

Die erste Abbildung der Analyse zeigt die Stützstrukturanalyse. Die Restriktionen hierfür basierten auf einer mittleren Stützstrukturstrategie mit einer Druckausrichtung entlang der Z-Achse. Stützstrukturen sind also zugelassen, da ein Druck entlang der Z-Achse aufgrund der Geometrie bereits erforderlich ist. Ein optimiertes Ergebnis mit einer zu hoch eingestellten Strategie würde Vollmaterial bedeuten. Mit Hilfe des ADTs können die dafür notwendigen Strukturen in Abbildung 89 visualisiert werden: die Stützen innerhalb der Struktur werden rot und die von der Platte ausgehenden Stützen blau eingefärbt.

Das Volumen der Stützstrukturen innerhalb des Bauteils ist dabei besonders relevant. Mit einem Volumen von 2992 mm³ ist die Menge an Stützstrukturen, auch wenn sie in der Abbildung umfangreicher aussieht, tatsächlich sehr gering.

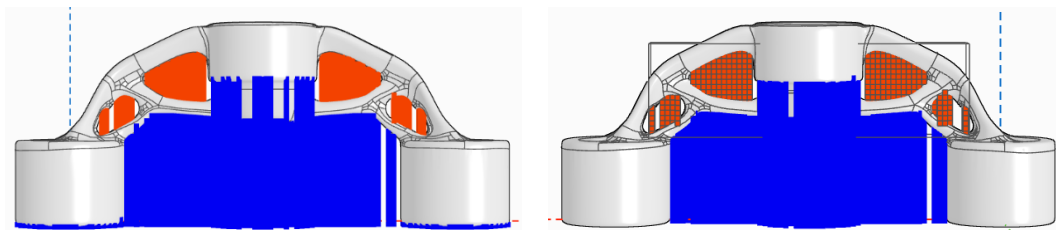


Abbildung 89 Emendate AM Stützstrukturen/Voxel Volumen

Die Supportstruktur wird durch einen vorgegebenen Überhangswinkel analysiert. Dieser Winkel dient als Referenz und wird mit der Neigung der Überhangsflächen in diesem Winkelbereich abgeglichen. Das Volumen der Stützstrukturen wird über Voxel, kleine Pixel, bestimmt (siehe Abbildung 89 rechts). Es ist zu beachten, dass das berechnete Volumen und die Positionen der Stützstrukturen nicht exakt sind, sondern lediglich eine Schätzung darstellen. Die Positionen können beim tatsächlichen Druck abweichen.

Bezüglich der Struktur durch die Optimierung ist eindeutig erkennbar, dass der Solver Hexagon Emendate mit einer mittleren Reduktionsstrategie die Grenzen des Möglichen ausreizt. Ist für eine Optimierung eine tatsächliche Minimierung der Stützstrukturen gewünscht, sollten mindestens zwei Simulationen durchgeführt werden, um zu prüfen, ab welcher Intensität der Reduzierung tatsächlich eine Minimierung eintritt. In diesem Fall beschränkt sich der Solver auf recht kleine Flächen für die Stützstrukturen.

Verglichen mit der Altair OptiStruct Optimierung weist dieses Ergebnis deutlich mehr Stützstrukturen auf. Auf den ersten Blick scheint die Menge nahezu identisch. Die Analyse zeigt jedoch, dass das Volumen der Altair OptiStruct Struktur mit 6270 mm^3 deutlich über der von Hexagon Emendate liegt. Damit wird nochmals die bereits besprochenen Aussage bestätigt, dass die Fertigungsrestriktionen von Altair OptiStruct deutlich stärker gebeugt werden als von Hexagon Emendate. Nun würde sich hier die Vermutung äußern lassen, dass eine Optimierung mit RAMP doch bessere Ergebnisse erzielen würde. Leider ist dem nicht der Fall. Diese würde lediglich eine geringe Reduzierung des Volumens bewirken, da, wenn Ergebnisse mit RAMP möglich sind, diese oftmals der von SIMP ähneln und lediglich feinere Übergänge besitzen. Hexagon Emendate hingegen richtet gar die Querschnitte auf eine Optimierte Struktur für die additive Fertigung aus

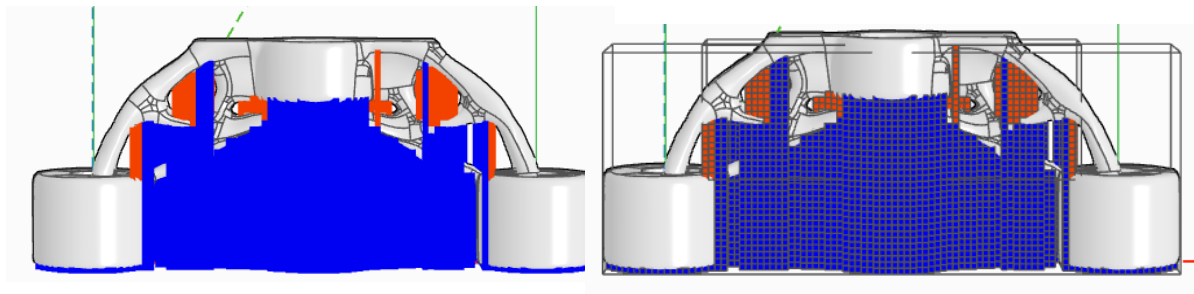


Abbildung 90 OptiStruct AM Stützstrukturen/Voxel Volumen

Mesh Angle:

Die Funktion „Mesh Angle“ stellt die Flächen für die Stützstrukturen besonders gut dar. Die roten Bereiche repräsentieren alle Elementflächen, die laut der Analyse gegen die Überhangsrestriktion verstoßen. Bei genauerer Betrachtung wird ein Detail deutlich, das ohne diese Analyse möglicherweise nicht aufgefallen wäre. Interessant für die Hexagon Emendate-Optimierung ist, dass besonders die Bereiche nah am Lager in der Mitte Stützen benötigen. Erwartungsgemäß hätte der Solver bei einer mittleren Reduktionsstrategie zumindest versuchen

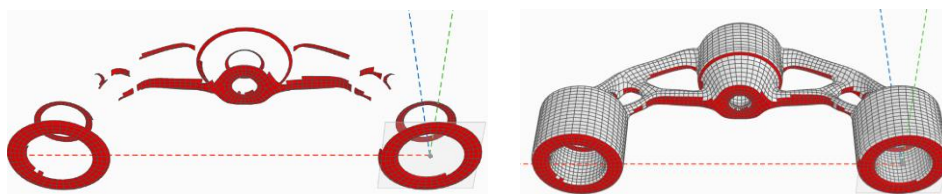


Abbildung 91 Emendate AM Mesh Angle

müssen, solche Ansammlungen zu reduzieren und das Material so zu verteilen, dass ein besserer Winkel für die Fertigung erreicht wird.

Die Streben der Struktur besitzen einen Reuleaux-Dreieck-ähnlichen Querschnitt. Betrachtet man diesen genauer in einer separaten Analyse, wird deutlich, weshalb diese Struktur so gestaltet wurde. Die Form lässt nur minimalste Stützstrukturen an der unteren Rundung zu und sorgt dafür, dass das restliche Material durch die unteren Schichtebenen ausreichend gestützt wird.

Jedoch gilt auch hier, dass die Abbildungen nicht exakt sind, sondern nur die wahrscheinlichsten Flächen abbilden, die in der additiven Fertigung mit einer Stützstruktur versehen werden müssten. In Abbildung 92 ist nochmals genauer zu sehen, warum es zu den massiven Stützstrukturen kommt. Die Kontaktflächen zur primären Struktur sind vergleichsweise deutlich größer und verursachen dadurch mehr Stützen, als möglicherweise notwendig gewesen wären

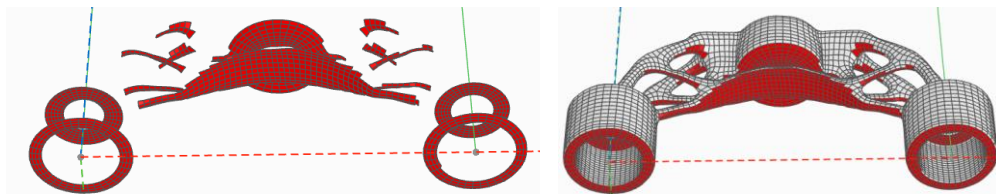


Abbildung 92 Altair OptiStruct Mesh Angle

Feature Thickness:

Die Feature Thickness bezieht sich auf die Dicke von Strukturen in einem Bauteil. Sie ist ein wesentlicher Parameter in der additiven Fertigung, da sie sicherstellt, dass die Strukturen stabil

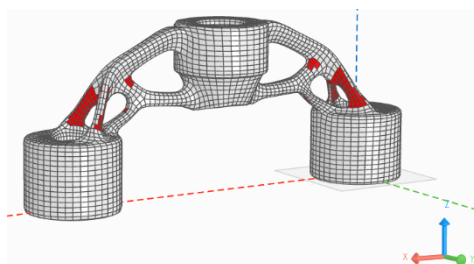


Abbildung 94 Emendate AM Feature Thickness

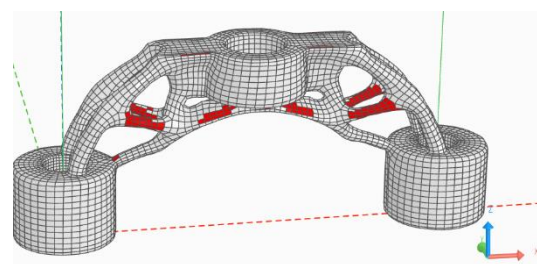


Abbildung 94 Altair OptiStruct Feature Thickness

genug sind, um gedruckt zu werden, ohne dass es zu Fehlern oder strukturellen Schwächen kommt. Für diese Strukturen ist die Feature Thickness entscheidend, um sicherzustellen, dass alle Teile die minimal notwendige Dicke aufweisen, die für den gewählten additiven Fertigungsprozess geeignet ist.

Die Analyse zeigt, dass die Dicken der Strukturen den Anforderungen der additiven Fertigung entsprechen. Bei einer Dicke von unter 0,5 Millimetern wäre eine Anpassung notwendig, da bei der Herstellung sonst Ungenauigkeiten oder sogar Fehler auftreten könnten. Durch die dickeren Strukturen wird eine ordnungsgemäße Fertigung und strukturelle Integrität gewährleistet.

Ein weiterer Nutzen dieses Tools liegt in der Schadensanalyse. Durch die Identifikation potenziell zu dünner Strukturen können diese genutzt werden, um zu prüfen, was passieren würde, wenn sie beschädigt oder gar entfernt werden. Entsprechend lassen sich vorab Maßnahmen erarbeiten um einen solchen Fall zu berücksichtigen

Feature Distance:

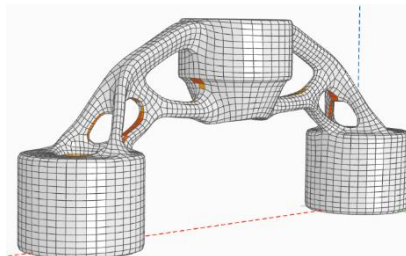


Abbildung 96 Emendate AM Feature Distance/ Distanz Analyse

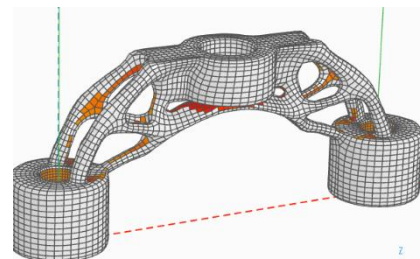


Abbildung 96 OptStruct Feature Distance

Feature Distance beschreibt den Abstand zwischen verschiedenen Strukturen oder Komponenten eines Bauteils in der additiven Fertigung. Dieser Parameter ist entscheidend für die Druckbarkeit und die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts. Zu geringe Abstände zwischen den Strukturen können zu Problemen wie unvollständigen Verbindungen oder unerwünschten Verbindungen führen, während zu große Abstände den Materialverbrauch erhöhen und die Fertigungszeit verlängern können.

Für die Struktur war die Feature Distance so eingestellt, dass alle Strukturen farblich markiert werden, die in einem Abstandsintervall von 0 bis 20 Millimetern zueinander positioniert sind. Damit lassen sich jene Bereiche identifizieren, die bei einer Fertigung potenziell Probleme verursachen können. In Bezug auf das Hexagon Emendate-Ergebnis wird auch deutlich, weshalb ein zusätzlicher Node für die Optimierung so wichtig ist. Dieser enthält die für die Fertigung relevanten Standardparameter, einschließlich des Mindestabstands zwischen den Strukturen, um eine Fertigbarkeit zu gewährleisten.

Die Analyse zeigt, wie erwartet, dass die Abstände zwischen den Strukturen innerhalb der empfohlenen Toleranz von etwa 0,5 Millimetern liegen. Die Altair OptiStruct-Struktur hingegen weist deutlich mehr Distanzen auf, die innerhalb des kritischen Bereichs liegen, was für die Fertigung problematisch sein kann. Besonders die Stelle, die auch für die Stützstrukturen problematisch ist, wird hier hervorgehoben. Unterhalb des Lagers ist schlichtweg zu wenig Raum, um eine saubere Struktur für den Druck zu bilden. Hier liegt der Abstand mit etwa 1,2 Millimetern gerade noch im zulässigen Bereich, ist jedoch alles andere als ideal.

8.2 Fertigungsanalyse 3D-Spark

Das 3D Spark-Tool ist eine leistungsstarke Browseranwendung, die speziell für die additive Fertigung und weitere Fertigungsverfahren konzipiert wurde. Diese webbasierte Plattform ermöglicht die Verwaltung und Optimierung von 3D-Druckprojekten direkt aus dem Browser heraus. Sie bietet Funktionen zur Visualisierung und Analyse von Druckmodellen, einschließlich der Simulation von Druckprozessen und der Überprüfung von Designfehlern. Durch die Integration von Echtzeit-Datenanalysen unterstützt 3D Spark die effiziente Planung und Steuerung von Druckaufträgen. Weiterhin kann sie Kosten und Auftragszeiten basierend auf implementierten Erfahrungswerten berechnen. Das Tool kann ebenso wie das „Additive Design Tool Kit“ die eingespeisten Strukturen auf ihre Fertigbarkeit hinsichtlich ihrer Dicken und Anordnung analysieren.

Betrachtet man nun die Ergebnisse aus 3D Spark, so ist die Durchführbarkeit mit dem SLM-Verfahren zu 98 Prozent möglich. Es wird schnell auffällig, dass die Restriktionen der

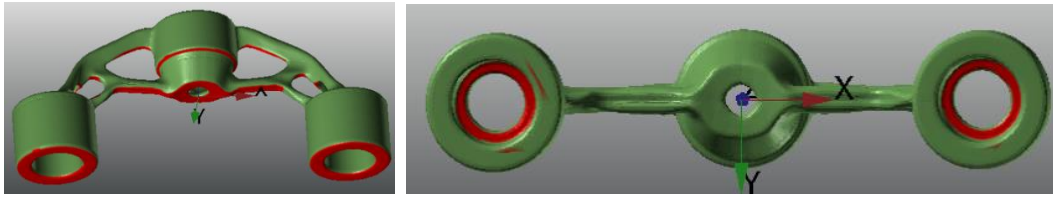


Abbildung 98 Gabelkrone 3D Spark Hexagon Emendate

additiven Fertigung doch mehr „gebeugt“ wurden als erwartet. Die Stützstrukturen sind, besonders im Bereich „Part-Part“, sehr ausgeprägt, obwohl genügend Spielraum für entsprechende Anpassungen vorhanden gewesen wäre. Die Auswertung der Struktur durch 3D Spark ergibt eine Masse von lediglich 47 Gramm Stützstrukturen, was etwa 6 % der

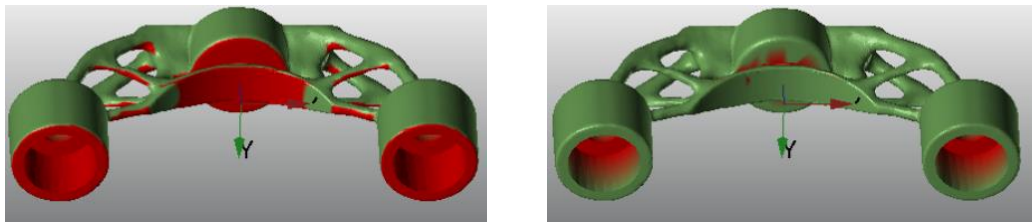


Abbildung 97 Gabelkrone 3D Spark Altair OptiStruct

Gesamtmasse ausmacht und damit trotz der stark ausgeprägten Kontaktflächen zum Bauteil noch im Rahmen liegt.

Das Tool bietet zusätzlich zu der Stützstrukturanalyse eine weitere Möglichkeit, Probleme zu identifizieren. So ist es möglich, das Entfernen von Stützstrukturen zu beurteilen. Dabei identifiziert 3D Spark Bereiche, die unter Umständen zu eng oder schwer zu erreichen sind und damit Probleme bei der Nachbearbeitung verursachen können. Bezogen auf dieses Fallbeispiel scheinen lediglich die Bereiche problematisch zu sein, die durch den Solver gar nicht bearbeitet werden durften, da sie einen Funktionsbereich abbilden. Eine weitere, durchaus sinnvolle Funktion ist die optimierte Ausrichtung der Bauteile in einem vorgegebenen Druckraum. Zwar ermöglicht das Tool eine bessere Ausrichtung, in diesem Fall von der ZX-Ebene ausgehend, doch wurde die Optimierung von der XY-Ebene ausgehend vorgenommen. Daher wurde hier die gleiche Ausrichtung gewählt. Im folgenden sind die Ergebnisse der Analyse tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 9 Gabelkrone Fertigungsanalyse

Gabelkrone Analyse Additive Fertigung 3D Spark		
Ergebnis	Altair OptiStruct	Hexagon Emendate
Menge pro Druck	14	14
Support Masse [$\frac{g}{Stck}$]	118	47
Max. Wanddicke [mm^2]	21,4	28,27
Min. Strebenabstand [mm]	0,64	8,31
Fertigungskosten [€]	1542	1348

9 Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Leistungsfähigkeit der beiden Solver Hexagon Emendate und Altair OptiStruct an vereinfachten Lastfällen (Fahrradgabelkrone und Rohrflansch) verglichen. Der OptiStruct Solver von Altair ist bereits seit vielen Jahren auf dem Markt wohingegen der Hexagon Solver Emendate erst seit ein paar Jahren erhältlich ist. Beide Solver wurden unter identischen Bedingungen getestet. Für eine fundierte Analyse wurden die Optimierungsparameter mehrfach variiert und spezifische Kriterien festgelegt, um die Ergebnisse objektiv zu bewerten. Diese Methode ermöglicht einen umfassenden Vergleich der beiden Optimierungsansätze. Die Analyse erfolgte anhand folgender Kriterien: Ausnutzung des verfügbaren Designraums, Orientierung der Strukturen im Designraum, Durchmesser der Strukturen, Volumen- und Massenänderung, Steifigkeit/Nachgiebigkeit und Spannungsverteilung, Herstellbarkeit mit den betrachteten Fertigungsverfahren, nutzlose freistehende Strukturen, sowie Einfluss der Nachbearbeitung auf das Endergebnis.

Im Laufe der Untersuchung haben die Solver unterschiedliche Stärken und Schwächen offenbart. Altair OptiStruct profitiert von vielen Jahren iterativer Weiterentwicklung und bietet eine breite Palette an einstellbaren Parametern, die Ingenieur*innen umfangreiche Möglichkeiten zur Optimierung von Bauteilen nach spezifischen Anforderungen und Wünschen bieten. Durch die Anpassbarkeit von insgesamt 36 Parametern lassen sich Strukturen mit komplexen Randbedingungen gestalten. Altair verwendet für ihren OptiStruct Solver die nach wie vor sehr zuverlässige und effiziente SIMP Methodik mit der Möglichkeit auf RAMP umzuschalten, wenn die additive Fertigung bessere Ergebnisse erfordert. Sie liefert bei richtiger Einstellung der Parameter saubere und gut verwendbare Ergebnisse. Altair OptiStruct ermöglicht es viele verschiedene Feinheiten separat einzustellen. Winkel, Orientierungsebene, Extrusionspfade, Symmetrien mit frei gewählten Ebenen und einigem mehr. Dadurch ist es dem Konstrukteur möglich seine Optimierung möglichst frei zu gestalten und Anpassungen vorzunehmen, die kleinste Details wie die minimalste Größe von Strukturen ermöglichen. Das hat den Vorteil, dass das Ergebnis sehr flexibel auf die Anforderungen des Bauteils angepasst werden kann. Daher eignet sich der Altair OptiStruct Solver sehr gut für Optimierungen die Anpassungen mit einem hohen Detailgrad erfordern. Hinsichtlich der Optimierung für die additive Fertigung und für Gussverfahren hat dieser leider das Nachsehen. Auch wenn viele Anpassungen möglich sind, fällt es dem Solver schwer Ergebnisse zu erzielen, die so direkt

fertigbar wären. Beispielsweise ist es zwar möglich die Optimierungsparameter so einzustellen, dass kaum bis keine Stützstrukturen für die additive Fertigung notwendig sind, jedoch bedarf es dafür der Verwendung der RAMP Methode, da SIMP diese Ergebnisse nicht immer sauber erzielt. Durch das Einstellen des maximalen Überhangs und der Überhangsorientierung müsste der Solver normalerweise einen Weg finden können, damit diese Vorgabe eingehalten werden kann. Doch auch nach vielen Iterationen fällt es dem Solver schwer diese Vorgabe vollends zu erfüllen. Es braucht Knowhow und Geduld um Optimierungen zu erreichen die so direkt durch additive Fertigung oder Guss herstellbar sind.

Beim Hexagon Solver Hexagon Emendate ist der anwenderfreundlichen Aufbau des Solvers hervorzuheben. Es ist dadurch möglich, Workflows aufzubauen die übersichtlicher und einfacher zu bedienen sind. Es bedarf keiner separaten FEM Analyse um die Belastungen des am Bauteil zu simulieren. Diese wird stattdessen direkt in die Optimierung integriert. Das macht es möglich die Entwicklung der Verteilung der mechanischen Spannungen Echtzeit zu beobachten, während das Bauteil mehr und mehr optimiert wird. Die Visualisierung allgemein hat den Vorteil gegenüber Altair OptiStruct, dass Optimierungen rechtzeitig abgebrochen werden können, da Fehler in der Parametrisierung frühzeitig erkannt werden können. Der größte Vorteil ist jedoch die Einstellbarkeit nach dem Fertigungsverfahren und der Meshing Ansatz. Für die Fertigung liefert Hexagon Emendate zur Zeit zwei Nodes die dem Solver Vorgaben machen wie die Optimierung durchzuführen ist. Dadurch lassen sich Guss und AM Teile besonders gut und fast schon direkt aus der Optimierung heraus herstellen. Mit Blickt auf die additive Fertigung lässt sich gar eine Strategie einstellen, wie stark Stützstrukturen vermieden werden sollen und von welcher Ebene aus gedruckt werden soll. Die Strukturen, die dabei entstehen, sind je nach Strategie ideal für die additive Fertigung. Ein weiterer Vorteil von Hexagon Emendate ist, dass durch die spezielle Vorgehensweise, das Meshing iterativ zu verfeinern, die Optimierungsdauer reduziert und der Nachbearbeitungsaufwand dadurch verringert wird. So sind die Ergebnisse aus Hexagon Emendate in der erfahrungsgemäß leichter zu fertigen und benötigen seltener noch eine gesonderte Nachbearbeitung durch zusätzliche Workflow-Elemente. Hinzu kommt, dass diese Vorgehensweise für besonders feine Ergebnisse mit weichen Übergängen und einer besseren Einhaltung der Restriktionen sorgt. Neben diesen diversen Stärken zeigt der Hexagon Emendate aber auch Schwächen, die wohl teils dessen geschuldet sind, dass der Solver noch relativ neu in Synera ist und noch nicht mit entsprechend vielen Funktionen vertreten ist. So ist es zwar möglich diverse Einstellungen wie die

Stützstrukturstrategie, einen globalen Sicherheitsfaktor oder auch ein entsprechendes Fertigungsverfahren mit den dazugehörigen Standardrestriktionen vorzunehmen, jedoch sind es wie, der Name schon sagt, Standardeinstellungen die durch den Node vorgegeben werden. Es mangelt bei diesem Solver noch an der Freiheit der Parameter die den Altair OptiStruct Solver zur besseren Variante machen, wenn es um komplexe Optimierungen geht. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Hexagon Emendate eine vergleichsweise neue Software auf der Synera-Plattform ist und noch nicht die gleiche Erfahrung wie Altair OptiStruct vorweisen kann.

Es lässt sich festhalten, dass beide Solver spezifische Stärken und Schwächen zeigen. Während Hexagon Emendate anfänglich deutliche Vorteile in der Benutzerfreundlichkeit und der schnellen Ergebnisgenerierung gegenüber Altair OptiStruct aufwies, zeigte sich im Laufe der vertieften Auseinandersetzung mit der Funktionsweise von Altair OptiStruct dessen Überlegenheit in bestimmten Bereichen.

Dennoch haben beide Solver ihre individuellen Vorzüge, die je nach Anwendungsfall und den spezifischen Anforderungen des Optimierungsprozesses einen entscheidenden Vorteil bieten können. Soll eine Entscheidung zwischen den beiden Solvern für einen spezifischen Workflow getroffen werden, empfiehlt es sich, eine detaillierte Analyse der geforderten Restriktionen und Optimierungsziele vorzunehmen. Geht es um eine einfache und effiziente Lösung, die keine umfangreiche Parametrisierung erfordert oder nur geringe Anforderungen an spezielle Restriktionen stellt, ist Hexagon Emendate die empfehlenswertere Wahl. Dieser Solver liefert schnell hochwertige Ergebnisse, insbesondere im Bereich der Fertigung. Obwohl nur zwei Fertigungsverfahren zur Auswahl stehen, machen diese einen signifikanten Unterschied. Die Ergebnisse, die durch die iterative Anpassung des Meshings und die präzisen Fertigungsrestriktionen auf Knotenebene erzielt werden, sind so fein aufgelöst und genau, dass sie in vielen Fällen direkt produziert werden können, ohne eine umfangreiche manuelle Nachbearbeitung zu erfordern.

Im Gegensatz zeigte sich Altair OptiStruct als das bevorzugte Werkzeug, wenn Optimierungen unter sehr spezifischen Restriktionen durchgeführt werden müssen. Durch die Flexibilität, Ziele und Einschränkungen variabel zu kombinieren und Parameter wie Durchmesser, Abstände zwischen Strukturen, Symmetrieachsen, Rotationssymmetrien und vieles mehr anzupassen, bietet dieser Solver Fähigkeiten, die Hexagon Emendate derzeit nicht bereitstellt. Wenn das

Ziel eine Struktur ist, die beispielsweise Mindestabstände, bestimmte Dimensionen oder vorgegebene Extrusionspfade einhalten muss, erweist sich Altair OptiStruct als die bessere Wahl.

In Bezug auf die Fertigungsverfahren zeigt Altair OptiStruct jedoch Schwächen im Vergleich zu Hexagon Emendate. Die Gussrestriktionen können nur durch die Definition der Trennebene und die Zugrichtung für die Entformung beeinflusst werden. Einstellungen wie "No Holes" verhindern zwar, dass Löcher in ungünstigen Positionen entstehen, aber diese Restriktionen werden nicht immer vollständig eingehalten. Immer wieder treten sogenannte „Violations“ auf, also Verstöße gegen die Fertigungsanforderungen, die die einfache Produktion der Bauteile behindern können. Ebenso zeigten die Fertigungsanalysen durch 3D Spark und das ADT, dass OptiStruct im Vergleich zu Hexagon Emendate deutlich schlechter abschneidet. Restriktionen die, normalerweise, leicht einzuhalten gewesen wären, wie Hohlräume unter der Lagerung, wurden durch den Solver deutlich häufiger und massiver unberücksichtigt gelassen als mit Hexagon Emendate

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beide Solver spezifische Vor- und Nachteile bieten. Der Entscheid für einen der Solver hängt von den Bedürfnissen des Anwenders ab. Für den Fall, dass man einfach gute Ergebnisse für Prototypen erreichen will bietet sich Hexagon Emendate sehr gut an. Es ist anwenderfreundlich und ermöglicht es auch die Ergebnisse direkt in ein passendes STL Format für den 3D Druck zu formatieren. Für den Anwender, der viele Anforderungen und Randbedingungen hat, die separat eingestellt und eingehalten werden müssen, bietet sich eher Altair OptiStruct mit seiner freieren Modellierung der Strukturen an.

Für die eigene Optimierung sollten im Vorfeld die wesentlichen Restriktionen und Zielvorgaben klar definiert werden, um entscheiden zu können, welcher Solver die Anforderungen am besten erfüllt. Eine fundierte Auswahl zwischen Altair OptiStruct und Hexagon Emendate sollte auf dieser Grundlage getroffen werden.

10 Fazit

Der Vergleich der beiden Strukturoptimierungs-Solvern Altair OptiStruct und Hexagon Emendate ergab keine eindeutige Überlegenheit eines der beiden Solver. Verglichen zu Hexagon Emendate bietet Altair OptiStruct eine tiefere Funktionalität, insbesondere für komplexe Optimierungen, bei denen spezifische Randbedingungen erfüllt werden müssen. Mit der Vielzahl an anpassbaren Parametern ist Altair OptiStruct besonders wertvoll, wenn Optimierungsziele und -restriktionen sehr präzise definiert werden müssen, wie etwa Mindestabstände zwischen Strukturen, Symmetrieanforderungen oder spezifische Extrusionspfade. Im Vergleich zu Hexagon Emendate sind die Fertigungsrestriktionen allerdings weniger präzise umsetzbar. Hexagon Emendate überzeugt insbesondere durch seine Benutzerfreundlichkeit, der Schnelligkeit der Optimierung und der hohen Qualität der Ergebnisse. Besonders im Bereich der Fertigung bietet dieser Solver durch seine iterative Meshing-Anpassung und die präzisen Einhaltung der Fertigungsrestriktionen ein hohes Maß an Genauigkeit und die Fähigkeit, schnell Ergebnisse zu liefern. Allerdings ist zu beachten, dass Hexagon Emendate derzeit nur zwei Fertigungsverfahren unterstützt, was seine Flexibilität im Vergleich zu Altair OptiStruct einschränkt. Ebenso ist die Leistung durch die mangelnde Erfahrung hinsichtlich der Parameter deutlich benachteiligt.

Für Anwendungen, bei denen eine schnelle, unkomplizierte Optimierung ohne tiefgehende Parametrisierung erforderlich ist oder nur geringfügige Anforderungen an spezielle Restriktionen gestellt werden, ist Hexagon Emendate deshalb eine hervorragende Wahl. Für komplexe, hochgradig parametrische Optimierungen, bei denen die strenge Berücksichtigung zahlreicher Randbedingungen erforderlich ist, bietet Altair OptiStruct jedoch klare Vorteile.

Es empfiehlt sich, im Vorfeld die wesentlichen Restriktionen und Zielvorgaben für die eigene Optimierung klar zu definieren, um entscheiden zu können, welcher Solver die Anforderungen am besten erfüllt.

11 Ausblick

Mit beiden Solvern, sind je nach Fragestellung, schon heute gute Ergebnisse zu erzielen. Für eine bestmögliche Effizienz, Qualität und Geschwindigkeit, wäre aber ein Solver mit verbesserter Leistungsfähigkeit wünschenswert. Ein Solver, der die Stärken beider Solver kombiniert, wäre sicher eine vielversprechende Entwicklung. Ein Hexagon Emendate mit erweiterten Fertigungs- und Strukturparameter wie Altair OptiStruct würde deutlich an Flexibilität gewinnen und in vielen Anwendungsfällen zur ersten Wahl werden. Ebenso würden damit womöglich Schwächen ausgemerzt werden, die bei dem zweiten Anwendungsfall zum Vorschein kamen. Beim Altair OptiStruct wäre eine Verbesserung der Fertigungsverfahren anzustreben, insbesondere bei der additiven Fertigung und Gussverfahren. Eine Zwangsrestriktion für Flächenkontakte könnte beide Solver noch einen Schritt nach vorne bringen.

Daneben wäre eine Funktion zur manuellen Nachbearbeitung von losen Enden innerhalb von Synera wünschenswert, um bestimmte Optimierungsschritte zu vereinfachen. Beispielsweise könnten solche Enden bei der Optimierung von Bauteilen wie der Gabelkrone effizient „getrimmt“ werden, ohne dass kleine Workflows erstellt werden müssen. Auch eine Erweiterung der Schadensfallanalyse in der FEA könnte entscheidende Vorteile bieten. Hier könnte ein Ansatz entwickelt werden, bei dem man beschädigte Bereiche oder stark belastete Strukturen manuell verstärken kann, ohne den gesamten Workflow erneut anpassen zu müssen.

Neben diesen Aspekten wäre die Integration der Level-Set-Methode als zusätzliche Optimierungsmöglichkeit zumindest eine Überlegung wert. Diese Methode könnte vor allem für komplexere Geometrien und präzisere Strukturen genutzt werden, da sie es ermöglicht, Grenzflächen kontinuierlich anzupassen und glatte Formen zu generieren. In Kombination mit den bestehenden Stärken von Hexagon Emendate könnte dies zu noch genaueren und effizienteren Ergebnissen führen, besonders wenn es um anspruchsvolle Fertigungsanforderungen oder detaillierte Strukturanpassungen geht.

Strukturoptimierungssolver werden schon heute im Ingenieurwesen immer wichtiger. Mit weiterer Optimierung der Solver werden Ingenieure ein Werkzeug in die Hand erhalten, dass eine wesentlich Rolle bei der Verbesserung der Effizienz und der Fertigung von hoch qualitativen Bauteilen spielen kann.

12 Literaturverzeichnis

Andreas Gebhardt, J. K. A. S., 2019. *Produktgestaltung für die Additive Fertigung*. 1 Hrsg. München: Carl Hanser Verlag München.

Chen, J. et al., 2022. *An additive manufacturing-oriented structural optimization design method to eliminate sacrificial support*, s.l.: Springer Verlag.

Fritz, A. H., 2012. *Fertigungstechnik*. 10 Hrsg. Berlin: Springer Verlag.

Gebhardt, A., Kessler, J. & Schwarz, A., 2019. *Produktgestaltung für die Additive Fertigung*. 1 Hrsg. München: Carls Hanser Verlag.

Gonçalves, F. A., 2018. *Introduction to Structural Optimization using the ESO and BESO Evolutionary Methods*, Porto (Portugal): Universidade do Porto.

Hans Albert Richard, B. S. T. Z., 2019. *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen: Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele*. 1 Hrsg. Wiesbaden: Spinger Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Harzheim, P. D. L., 2014. *Struktur Optimierung: Grundlagen und Anwendungen*. 42781 Haan-Gruiten, Düsseldorf Straße 23: Europa-Lehrmittel. Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG.

Junk, S., Klerch, B. & Hochberg, U., 2019. *Structural Optimization in Lightweight Design for Additive Manufacturing*, s.l.: Elsevier B.V..

Lange, F. & Emmelmann, C., 2021. *Prozessgerechte Topologie Optimierung für die Additive Fertigung*. 1 Hrsg. Berlin: Springer Verlag.

Plocher, J. & Panesar, A., 2019. *Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures*, s.l.: Elsevier Ltd. .

Sauer, P. D.-I. A., 2018. *Bionik in der Strukturoptimierung: Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau*. 1 Hrsg. Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG.

Schumacher, A., 2020. *Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen*. 3 Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Shao, G., 2020. *Comparison of BESO and SIMP to Do Structural Topology Optimization in Discrete Digital Design, and then Combine Them into a Hybrid Method*, Singapur: Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020.

Vaneker, T. et al., 2020. *Design for additive manufacturing: Framework and methodology*, s.l.: Elsevier Ltd on behalf of CIRP.

Xie, Y. M. & Huang, X., 2010. *Recent developments in evolutionary structural optimization (ESO) for continuum structures*, Melbourne: IOP Publishing.

13 Anhang

13.1 Node Bibliothek

Hinweis: Hier werden lediglich die wichtigsten Nodes für die Workflows aufgeführt. Es wird die englische Original-Schreibweise des Herstellers verwendet. Für eine genaue Darstellung der Nodes und deren Kontakte bietet es sich an die Software parallel zu nutzen und dort die Funktion „Open Example“ zu nutzen.

1. **Solid Mesh (HM):** Create an FEM volume mesh representation of solid bodies using the HyperMesh mesher.
2. **Isotropic Material:** Isotropic material for mechanical models.
3. **Solid Part:** Define a part of an FEA model consisting of solid elements.
4. **Solid Part (HxGN):** Define a part of an HxGN Emendate model consisting of solid geometries.
5. **Interface:** Defines an Interface including Non-Design and Machining Allowance Thickness for the optimization.
6. **Connector Spider:** Create a connector element between a node and target nodes which are defined by the given geometries. The connector can be rigid or deformable.
7. **Force:** Define a force acting on the nodes of an FEA model which are defined by geometries.
8. **Fixed Displacement:** Define the geometries whose degrees of freedom shall be fixed in a mechanical loadstep of an FEA model. The degrees of freedom can either be fixed to 0 (support) or to given values (enforced displacement).
9. **Linear static mechanical:** Linear static mechanical load step for an FEA model.
10. **Contact:** Creates a contact between two parts of an FEA model.
11. **Construct Model:** Construct a model out of parts and elements and add the load steps for a simulation. Nodes that lie within the given tolerance are unified. All model entities such as parts and materials must have unique names. For example, if two different materials have the same name, an error will occur.
12. **Construct Model (HxGN):** Construct a model out of parts and elements and add the Load Steps for an HxGN Emendate optimization.

13. **OptiStruct FEA solver:** Run the OptiStruct solver for all load steps of the model. The results are imported after the simulation.
14. **Model view:** Display loads and results of an FEA model.
15. **Solid Topology Variable:** Variable for a topology optimization that can be applied to a solid part of an FEA model.
16. **Maximum von Mises Stress Response:** Define a maximum von-Mises stress response of an FEA model. A response is a specific result of a simulation that can be used as a constraint or objective for an FEA optimization such as topology or sizing optimizations.
17. **Displacement Response:** Define a displacement response of an FEA model. A response is a specific result of a simulation that can be used as a constraint or objective for an FEA optimization such as topology or sizing optimizations.
18. **Mass Response:** Define a mass response for the optimization of an FEA model.
19. **Volume Fraction Response:** Define a volume fraction response for the topology optimization of an FEA model.
20. **Weighted Compliance Response:** Define a weighted compliance response for the topology optimization of an FEA model as a weighted average of the compliances of selected loadsteps. The compliance is the reciprocal value of the stiffness, so it needs to be minimized if you want to maximize the model stiffness.
21. **FEA Constraint:** Constraint for a response of an FEA model for the usage in an optimization.
22. **FEA Objective:** Define an optimization objective based on a response of an FEA model. The objective can be used for an FEA optimization such as topology or sizing optimizations.
23. **OptiStruct Optimizer:** Perform an OptiStruct optimization on an FEA model based on design variables, constraints and objectives.
24. **Casting (HxGN):** Provides specific settings to create optimized results tailored for the Manufacturing Method "Casting"
25. **Casting Region (HxGN):** Defines a casting region which can be used for the casting manufacturing method.
26. **Additive Manufacturing (HxGN):** Provides settings for the Manufacturing Method "Additive Manufacturing".

27. **Topology Optimization (HxGN):** Perform an HxGN Emendate optimization of a model. The "Topology Optimization Achievement Index" result will provide information about the fulfillment of the goal of each element.
28. **Result Isomesh:** Create an isomesh through the result values of solid parts in an FEA model.
29. **Split Disjoint Mesh:** Split a mesh into pieces that do not have common vertices or edges.
30. **Area:** Compute the area and centroid for bodies, assemblies, meshes and closed planar curves.
31. **Sort List:** Sort a list of values in an ascending order and sort one or multiple other lists in the same order.
32. **Reverse List:** Reverse a list.
33. **List Item:** Retrieve an item at an index of a list.
34. **Convert to Quadmesh:** Remesh a triangle mesh and outputs a quad-dominant mesh.
35. **Mesh to Solid:** Create a smooth body that approximates the subdivision limit surface of the given mesh.
36. **Construct SubD:** Create a SubD from a mesh and define the hardness of all or selected edges. The edge hardness is used in the conversion of the SubD to a body and in the visualization of the SubD data type.
37. **SubD to Body:** Create a smooth body that approximates the subdivision limit surface of the given mesh.
38. **Milling Costing:** Estimates the manufacturing costs for milling.
39. **LBM Costing:** Calculates the manufacturing costs for laser beam melting.
40. **Casting Costing:** Estimates the manufacturing costs of the casting process.
41. **Support Zones:** Estimate the location and volume of support structures.
42. **Overhang Mesh:** Extract the mesh parts whose face normals form an overhang in comparison to the build direction of an additive manufacturing process.
43. **Mesh Angle:** Analyse the angle of the mesh faces relative to the build platform. Extract sub-meshes of the mesh depending on their inclination to the build platform.
44. **Feature Distance:** Analyse the distance between adjacent regions of the mesh surface. The distance is measured from the face centers in direction of the face normal to the opposite mesh surface.

45. **Feature Thickness:** Analyse the thickness of mesh features. Thickness is measured from the face centers in the inverse direction of the face normal to the opposite mesh surface.

13.2 Parametrisierungswerte

Hexagon Emendate (AM) Gabelkrone		
Klasse	Parameter	Wert
Allgemein	Complexity	4
Allgemein	Global Safety Factor	3
Symmetry	XY-Plane	Off
Symmetry	XY, XZ, YZ	XZ
Symmetry	Origin	Off
Optimization Settings	Strut Density	Medium
Optimization Settings	Shape Quality	Balanced
Optimization Settings	Unit System	mm N t
Optimization Settings	Reduced Fixation Points	Off
Optimization Settings	Advanced User Settings	None
Optimization Settings	Start Space	None
Manufacturing Method	Additive Manufacturing	-
Manufacturing Method	Build Plane	XY
Manufacturing Method	Scale Target Stress in Build Direction	1.2
Manufacturing Method	Support Reduction Strategy	Medium

Altair OptiStruct (AM) Gabelkrone		
Klasse	Parameter	Wert
Member size	Minimum diameter	7
Member size	Maximum diameter	15
Symmetries	Mirror symmetry plan	YZ
Overhang Constraints	Overhang angle	45°
Overhang Constraints	Overhang orientation	Z
Overhang Constraints	Constraint Method	Penalty
Overhang Constraints	Step length	Moderate
Overhang Constraints	Penalty factor	Medium
Overhang Constraints	Penalty Scheme	SIMP/RAMP
Overhang Constraints	Non design space supported	On
Overhang Constraints	Holes Supported	On
Overhang Constraints	Angle Tolerance	90°
Overhang Constraints	Distance Tolerance	Off
Overhang Constraints	Supported Node Indices	Off
Constraint	Volume Fraction Response	0,08
Objective	Weighted Compliance Response	minimize

Hexagon Emendate (Casting) Gabelkrone		
Klasse	Parameter	Wert
Allgemein	Complexity	7
Allgemein	Global Safety Factor	3.5
Symmetry	XY-Plane	Off
Symmetry	XY, XZ, YZ	Off
Symmetry	Origin	Off
Optimization Settings	Strut Density	Medium
Optimization Settings	Shape Quality	Balanced
Optimization Settings	Unit System	mm N t
Optimization Settings	Reduced Fixation Points	Off
Optimization Settings	Advanced User Settings	None
Optimization Settings	Start Space	None
Manufacturing Method	Casting	-
Manufacturing Method	Split Plane	ZX
Casting Region	Regional Draw Direction	Y
Casting Region	Tapering Angle	1
Casting Region	Minimum Wall Thickness	2

Altair OptiStruct (Casting) Gabelkrone		
Klasse	Parameter	Wert
Member size	Minimum diameter	7
Member size	Maximum diameter	15
Symmetries	Mirror symmetry plan	YZ
Overhang Constraints	Overhang angle	45°
Overhang Constraints	Overhang orientation	X
Overhang Constraints	Constraint Method	Penalty
Overhang Constraints	Step length	Moderate
Overhang Constraints	Penalty factor	Medium
Overhang Constraints	Penalty Scheme	SIMP/RAMP
Overhang Constraints	Non design space supported	On
Overhang Constraints	Holes Supported	On
Overhang Constraints	Angle Tolerance	90°
Overhang Constraints	Distance Tolerance	Off
Overhang Constraints	Supported Node Indices	Off
Constraint	Volume Fraction Response	0,5
Objective	Weighted Compliance Response	minimize

Altair OptiStruct (AM/SIMP) Rohr		
Klasse	Klasse	Klasse
Allgemein	Complexity	2
Allgemein	Global Safety Factor	1-2
Symmetry	XY-Plane	Off
Symmetry	XY, XZ, YZ	Off
Symmetry	Origin	Off
Optimization Settings	Strut Density	Medium
Optimization Settings	Shape Quality	Balanced
Optimization Settings	Unit System	mm N t
Optimization Settings	Reduced Fixation Points	Off
Optimization Settings	Advanced User Settings	None
Optimization Settings	Start Space	None
Manufacturing Method	Additive Manufacturing	-
Manufacturing Method	Build Plane	ZX
Manufacturing Method	Support Reduction Strategy	Off; Low; Medium; High

Altair OptiStruct (AM) Rohr		
Klasse	Klasse	Klasse
Allgemein	Complexity	2
Allgemein	Global Safety Factor	1-2
Symmetry	XY-Plane	Off
Symmetry	XY, XZ, YZ	Off
Symmetry	Origin	Off
Optimization Settings	Strut Density	Medium
Optimization Settings	Shape Quality	Balanced
Optimization Settings	Unit System	mm N t
Optimization Settings	Reduced Fixation Points	Off
Optimization Settings	Advanced User Settings	None
Optimization Settings	Start Space	None
Manufacturing Method	Additive Manufacturing	-
Manufacturing Method	Build Plane	ZX
Manufacturing Method	Support Reduction Strategy	Off; Low; Medium; High

Hexagon Emendate Tür Halterug		
Klasse	Parameter	Wert
Member size	Minimum diameter	7
Member size	Maximum diameter	15
Symmetries	Mirror symmetry plan	YZ
Overhang Constraints	Overhang angle	45°
Overhang Constraints	Overhang orientation	X
Overhang Constraints	Constraint Method	Penalty
Overhang Constraints	Step length	Moderate
Overhang Constraints	Penalty factor	Medium
Overhang Constraints	Penalty Scheme	SIMP/RAMP
Overhang Constraints	Non design space supported	On
Overhang Constraints	Holes Supported	On
Overhang Constraints	Angle Tolerance	90°
Overhang Constraints	Distance Tolerance	Off
Overhang Constraints	Supported Node Indices	Off



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: _____

Vorname: _____

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

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 _____ ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original