



Gabriel Mittich, BSc

Topologieoptimierung im Bauwesen: vom Entwurf zum 3D-Druck

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Thomas-Peter Fries
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.

Institut für Baustatik

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Graz, Jänner 2020

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Topologieoptimierung im Kontext des Bauwesens untersucht. Es soll dabei auch geklärt werden, wie sie zusammen mit der Additiven Fertigung (auch 3D-Druck genannt) praktische Anwendung finden kann. Die Arbeit umfasst einen kurzen Überblick der theoretischen Grundlagen der Topologieoptimierung und der Additiven Fertigung, sowie die Identifizierung und praktische Ausarbeitung von baurelevanten Beispielen. Diese Beispiele umfassen die Bereiche Brücken, Decken und Stahl-Verbindungsknoten. Es kann ein geeigneter Workflow vom Entwurf bis zum 3D-Druck aufgezeigt werden, der zu sparsamen, tragfähigen und produzierbaren Ergebnissen führt, die jedoch großes Verbesserungspotenzial aufweisen. Die untersuchten Beispiele geben ebenso Aufschluss über häufige Probleme und mögliche Lösungsansätze. Besonderes Augenmerk wird auf die bauspezifischen Probleme im Prozess gelegt und wie diese in Zukunft überwunden werden können.

Abstract

This thesis investigates the use of topology optimization in civil engineering including the production of optimized structures based on additive manufacturing (also called 3D printing). The work gives a short overview on the theoretical foundations of topology optimization and additive manufacturing. Typical applications in the construction industry are identified and worked out including bridges, ceilings and steel junctions. A suitable workflow from the initial design to 3D printing is demonstrated, leading to lightweight, stable, efficient and manufacturable results, but with great potential for improvement. Typical problems are identified and approaches for their solution discussed. Particular attention is paid to shortcomings of this process specific to the construction industry and how those can be overcome in the future.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Vorgangsweise	1
1.3	Aufbau der Arbeit	1
2	Tragwerksoptimierung im Bauwesen	3
2.1	Struktur der Optimierung	3
2.2	Grundsatz der Optimierung	4
2.3	Lokale und globale Optimierung	4
2.4	Optimierungsansätze	4
2.4.1	<i>Material und Fertigung</i>	4
2.4.2	<i>Kraftsystem</i>	5
2.4.3	<i>Querschnitt</i>	6
2.4.4	<i>Querschnitt entlang eines Trägers</i>	7
2.4.5	<i>Formfindung</i>	9
2.4.6	<i>Fachwerke</i>	11
2.4.7	<i>Formung nach Spannungstrajektorien</i>	11
2.4.8	<i>Formoptimierung</i>	12
2.5	Übersicht und Ausblick	12
3	Topologieoptimierung	13
3.1	Grundlagen	13
3.1.1	<i>Definition des Begriffs Topologie</i>	14
3.1.2	<i>Funktionsweise</i>	14
3.2	Die Topologieoptimierung im Designprozess	16
3.3	Mögliche Optimierungsziele und Restriktionen	17
3.3.1	<i>Mittlere Nachgiebigkeit / Steifigkeit</i>	17
3.3.2	<i>Spannungen</i>	17
3.3.3	<i>Eigenfrequenz</i>	18
3.3.4	<i>Herstellungsrestriktionen</i>	18
3.3.5	<i>Weitere Ziele und Restriktionen</i>	19
3.4	Typische Probleme	19
3.4.1	<i>Form als Designvorschlag</i>	19
3.4.2	<i>Mehrere Lastfälle</i>	19
3.4.3	<i>FE-Netzfeinheit</i>	20
3.4.4	<i>Sensitivität auf Randbedingungen</i>	21
3.4.5	<i>1/0-System des Materials</i>	21
3.4.6	<i>Vernachlässigung des Knickens</i>	22
3.4.7	<i>Materialmodellierung</i>	22
3.4.8	<i>Herstellung</i>	23
3.5	Case Studies	23
3.5.1	<i>White Magnolia Plaza</i>	23
3.5.2	<i>Qatar National Convention Centre</i>	24
3.5.3	<i>Gradientenbeton</i>	25
3.5.4	<i>Arup Stahlknoten</i>	25
4	Additive Fertigung	27
4.1	Fertigung komplexer Geometrien	27
4.2	3D-Druck	28
4.3	Verfahren	29
4.3.1	<i>Fused Deposition Modelling (FDM)</i>	30
4.3.2	<i>SLS/SLM</i>	31
4.4	Mechanische Eigenschaften des schichtweisen Aufbaus	32
4.5	Workflow eines 3D-Drucks	33

4.6	AM im Bauwesen	34
5	Praktische Anwendung der Topologieoptimierung und der Additiven Fertigung	36
5.1	Verwendete Software.....	36
5.1.1	<i>Fusion 360 (2.0.6503)</i>	36
5.1.2	<i>Rhino 5</i>	36
5.1.3	<i>SolidThinking Inspire (2019.0.1)</i>	37
5.1.4	<i>Autodesk Netfabb Premium (2020) und Meshmixer (3.4.35)</i>	38
5.1.5	<i>Cura (4.0)</i>	38
5.2	Allgemeines zur praktischen Durchführung der Topologieoptimierung	38
5.3	Materialmodell für die Topologieoptimierung	39
5.4	Allgemeines zur praktischen Anwendung der Additiven Fertigung	39
5.5	Ablauf der Topologieoptimierung und Additiven Fertigung.....	40
5.6	Größenskala, Materialien und Fertigung im Bauwesen.....	41
6	Anwendungsbereich Brücken	43
6.1	Abmessungen und Randbedingungen	43
6.2	Lasten	44
6.3	2D-Brücke	45
6.3.1	<i>Modellierung und Optimierung</i>	46
6.3.2	<i>Optimierungsergebnisse</i>	46
6.3.3	<i>Postprocessing</i>	48
6.3.4	<i>Validierung</i>	48
6.3.5	<i>Variantenvergleich</i>	50
6.3.6	<i>Erkenntnisse</i>	51
6.4	3D-Brücke	51
6.4.1	<i>Modellierung und Optimierung</i>	51
6.4.2	<i>Optimierungsergebnisse</i>	52
6.4.3	<i>Erkenntnisse</i>	56
6.5	Erkenntnisse für den Anwendungsbereich Brücken.....	57
7	Anwendungsbereich Decken	59
7.1	Abmessungen und Randbedingungen	59
7.2	Lasten	60
7.3	Modellierung und Optimierung.....	60
7.4	Ergebnisse der Optimierung	62
7.4.1	<i>40 cm Decke auf Stützen</i>	63
7.4.2	<i>80 cm Decke auf Stützen</i>	65
7.4.3	<i>40 cm Decke auf Wänden</i>	68
7.5	Validierung	71
7.5.1	<i>Vergleichsdecken</i>	72
7.6	Vergleich	72
7.7	Additive Fertigung	74
7.8	Erkenntnisse	75
8	Anwendungsbereich Stahlknoten	76
8.1	Lasten	76
8.2	Parametrische Modellierung	77
8.2.1	<i>Tragsystem</i>	77
8.2.2	<i>Statische Berechnung</i>	78
8.2.3	<i>Geometrie des Knotens</i>	79
8.3	Modellierung und Optimierung.....	81
8.4	Ergebnisse der Optimierung	82
8.5	Postprocessing	85
8.6	Validierung	87
8.7	Additive Fertigung	88
8.8	Erkenntnisse	89
9	Zusammenfassung.....	91

9.1	Einschätzung der aktuellen Umsetzbarkeit	91
9.2	Verbesserungsvorschläge	92
9.3	Ausblick	92
10	Literaturverzeichnis	94
11	Abbildungsverzeichnis.....	97
12	Tabellenverzeichnis.....	100
Anhang	101

1 Einleitung

1.1 Motivation

Optimierung ist im Bauwesen wichtiger denn je, wobei neben den ökonomischen Vorteilen auch der Umweltschutz ein zentrales Thema ist. Durch die Reduzierung des Ressourceneinsatzes und die Minimierung des Arbeitsaufwandes in der Planung und Ausführung können beide Ziele erreicht werden. Die dafür notwendigen Technologien befinden sich zum Teil noch in den Kinderschuhen bzw. in der Forschung, jedoch ändert sich dies aktuell, denn sie werden mehr und mehr praxisrelevant. Für die Topologieoptimierung stehen immer leistungsfähigere Programme zur Verfügung und mit Hilfe der Additiven Fertigung, auch unter dem Begriff 3D-Druck bekannt, lassen sich die entstehenden optimierten Strukturen automatisch realisieren. In dieser Arbeit sollen die Konsequenzen im Baubereich untersucht werden, wofür in unterschiedlichen Anwendungen der gesamte Arbeitsprozess vom Entwurf über die Optimierung bis zum fertigen Bauteil beschrieben werden soll.

1.2 Zielsetzung und Vorgangsweise

Es soll untersucht werden, in welchem Maße bzw. für welche Anwendungen die Topologieoptimierung im Bauwesen geeignet ist. Dabei soll aufgezeigt werden, in welchen Bereichen eine solche Optimierung Vorteile und neue Möglichkeiten mit sich bringen kann. Auftretende Probleme sollen identifiziert und Lösungen vorgeschlagen werden, Eigenheiten des Bauwesens sollen dabei besondere Berücksichtigung finden. Zusätzlich zur Topologieoptimierung soll auch auf die Additive Fertigung eingegangen werden, denn oft ermöglicht nur diese ein Herstellen der generierten Formen. Durch die Betrachtung dieser beiden Technologien ist es möglich, den gesamten Ablauf vom Entwurf bis zur Produktion abzubilden, um so die Umsetzbarkeit abschätzen zu können.

Diese Ziele sollen anhand von einer Literaturstudie und der Ausarbeitung mehrerer, möglichst unterschiedlicher, praxisbezogener Anwendungsbeispiele erreicht werden. Die gesamte Arbeit soll auch als Einführung in die Topologieoptimierung und die Additive Fertigung dienen und einen Workflow aufzeigen, der für den praktischen Einsatz geeignet ist.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die allgemeine Aufarbeitung und Abstrahierung der historischen Tragwerksoptimierung im Bauwesen (Kapitel 2) setzt die Topologieoptimierung in den Kontext der aktuell etablierten

Methoden und kann somit einen Vergleich erleichtern. In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten theoretischen Grundlagen der Topologieoptimierung (Kapitel 3) und der Additiven Fertigung (Kapitel 4) vermittelt. Die Überleitung vom theoretischen Teil der Arbeit in die praktischen Anwendungsbeispiele erfolgt im 5. Kapitel, es beinhaltet alle allgemeingültigen Informationen für die Ausarbeitung der Beispiele. Die weiteren Kapitel beschäftigen sich mit verschiedenen Anwendungsgebieten aus dem Bauwesen wie Brücken (Kapitel 6), Decken (Kapitel 7) und Stahlknoten (Kapitel 8). Die beispiele-spezifischen Erkenntnisse sind in den jeweiligen Kapiteln enthalten. Eine Zusammenfassung dieser und eine abschließende Einschätzung der Topologieoptimierung findet im finalen Kapitel 9 Platz.

2 Tragwerksoptimierung im Bauwesen

Historisch betrachtet begann mit der Errichtung der ersten Tragwerke auch deren Optimierung. Das Konzept der Optimierung ist in diesem Bereich nicht wegzudenken, da nur durch das kontinuierliche Verbessern immer größere, weiter spannende, langlebigere, qualitativ bessere und günstigere Bauwerke ermöglicht werden. Eine Optimierung sollte die bestmögliche Lösung anstreben, erreicht wird diese jedoch nur in der Theorie, und das auch nur für die angenommenen Zielfunktionen, Modelle und Randbedingungen [1]. In der Praxis wird dieser Prozess durch viele unbekannte Variablen, schwer vorhersagbare Auswirkungen von Entwurfsentscheidungen, Einschränkungen durch die Herstellung und vor allem durch die Findung eines Kompromisses aus Qualität und Kosten, wesentlich erschwert. Um trotzdem möglichst nahe an das Optimum heranzureichen, ist eine genaue und möglichst systematische Herangehensweise essenziell.

2.1 Struktur der Optimierung

Um eine Optimierung durchzuführen, müssen im Allgemeinen vier Hauptbestandteile definiert werden [2]:

1) Optimierungskriterium oder –ziel

Es kann sich um ein einzelnes Ziel, oder aber auch mehrere handeln, die gewichtet in eine Zielfunktion einfließen. Die Aufgabe der Optimierung ist das globale Maximum dieser Funktion zu finden. Typische Optimierungskriterien sind Masse und Kosten.

2) Entwurfsvariablen

Die gewählten Variablen definieren den Bereich und gleichzeitig die Möglichkeiten der Optimierung. Ist die ideale Lösung nicht mit diesen Parametern beschreibbar, so kann sie auch nicht gefunden werden. Typische Entwurfsvariablen sind Querschnittsformen und deren Größe.

3) Randbedingungen und Restriktionen

Die Randbedingungen, wie Material, die angreifenden Kräfte, sowie Auflagerart und -stellung, müssen möglichst realitätsgetreu abstrahiert werden.

Grenzwerte für Durchbiegung, Schwingungsanfälligkeit, aber auch Wärmeleitfähigkeit, Montagezeit und viele mehr müssen bestimmt werden, um die vorhergesehene Nutzung zu ermöglichen. Andere Restriktionen, wie zum Beispiel eine architektonisch ansprechende Form, dürfen in vielen Fällen ebensowenig vernachlässigt werden.

4) Entwurfsmodell

Durch ein möglichst gutes mathematisches Modell kann die Optimierung über Algorithmen systematisch abgewickelt werden. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die computergestützte Optimierung.

Die genaue und richtige Bestimmung dieser Bestandteile ist ausschlaggebend für den benötigten Lösungsaufwand und für die Qualität der erhaltenen Ergebnisse.

2.2 Grundsatz der Optimierung

Für jede Tragwerksentwicklung gilt, dass nicht nur die Tragfähigkeit, sondern auch die Nutzbarkeit immer gewährleistet sein müssen. Das Tragsystem muss in Kenntnis seiner Umgebung und mit dem Fokus auf Mensch und Technik entworfen werden [3]. Die Einhaltung dieser Bedingungen ist in der Optimierung besonders zu beachten, da die beste Lösung meist an den Grenzen der Nutzbarkeit liegt.

2.3 Lokale und globale Optimierung

Optimierungen erfolgen oft lokal an einem Teil des Bauwerks, ohne dabei die Auswirkungen auf die Gesamtheit zu berücksichtigen. Denn ein globales, optimales Ergebnis setzt sich nicht unbedingt aus der Summe der optimalen Einzelelemente zusammen, sondern aus einem sinnvollen Kompromiss, der die systemweiten Zusammenhänge mit einbezieht [1].

2.4 Optimierungsansätze

Oft hat die Optimierung von Tragwerken die Reduktion der Materialmasse zum Ziel, da angenommen wird, dass proportional dazu Kosten eingespart werden können. Aus diesem Grund wird im Folgenden vor allem auf die Minimierung des Materialverbrauchs eingegangen. Diese Massenreduktion beruht meist auf der besten Ausnutzung des vorhandenen Materials und auf der Minimierung der Kraftwege. Aus diesen beiden Prinzipien wurden im Laufe der Geschichte viele Optimierungsansätze gebildet, die Wichtigsten sollen im Weiteren erläutert werden.

2.4.1 Material und Fertigung

Die verfügbaren Materialien und Fertigungsmethoden definieren den Bereich des Möglichen in der Tragwerksplanung. Eine Konstruktion kann noch so effizient sein, sie ist aber nutzlos, wenn sie nicht umsetzbar ist. Aus diesem Grund beginnt der Tragwerksentwurf meist auch mit

der Wahl der Materialart. Zur Auswahl stehen im Hochbau meist Beton, Stahl, Holz, Mörtel und verschiedene Bausteine. Für die Optimierung wichtig sind vor allem folgende Kennwerte:

- Zulässige Spannung / Bruchspannung
- Steifigkeit (E-Modul)
- Rohdichte (ρ)

Aus diesen Eigenschaften lässt sich die Leistungsfähigkeit der Materialien errechnen, einerseits aus dem Verhältnis von Spannung und Rohdichte, andererseits als Verhältnis der Steifigkeit zur Rohdichte. Letzteres wird als Effizienz bezeichnet. Je nach Belastungsart können folgende Formeln als Indikatoren für die Effizienz herangezogen werden [1]:

- Zug: $\frac{E}{\rho}$
- Druck: $\frac{\sqrt{E}}{\rho}$
- Biegung: $\frac{\sqrt[3]{E}}{\rho}$

Es zeigt sich, dass eine Reduzierung der Rohdichte für alle Belastungsarten dieselbe Steigerung der Effizienz mit sich bringt, während die Steigerung des E-Moduls für Druck- und Biegebelastungen wesentlich weniger nützt. Die Materialeigenschaften und somit die Effizienz kann auf drei verschiedene Arten gesteigert werden:

1) Änderung der Stoffeigenschaften:

Durch andere Stoffzusammensetzungen oder verbesserte Herstellungsmethoden können bestimmte Eigenschaften erzielt werden.

2) Poröser Aufbau:

Um die Rohdichte zu verringern kann das Porenvolumen erhöht werden, meist aber auch auf Kosten der Tragfähigkeit und Steifigkeit.

3) Verbund mehrerer Materialien:

Durch die Kombination verschiedener Materialien können die guten Eigenschaften miteinander verbunden werden. Stahlbeton zeigt diese Synergie besonders gut, da die relativ kleine Zugfestigkeit des Betons mit Stahleinlagen kompensiert werden kann. Letztere werden im Gegenzug durch den Beton von Korrosion und Hitze im Brandfall geschützt und ermöglichen zudem ein duktiler, sich ankündigendes Bruchverhalten.

2.4.2 Kraftsystem

Das Kraftsystem beschreibt die Ableitung der Lasten in die Auflager. Eine erste Optimierung kann durch die Minimierung der Kräfte bzw. Spannungen erfolgen; möglich ist dies durch die

Verringerung des Eigengewichts und auch durch das Verhindern von unerwünschten Nutzlasten mit konstruktiven Maßnahmen.

Wichtig ist auch die Lastverteilung, besonders bei Biegeträgern. Vereinfacht gilt, dass eine möglichst gleich verteilte Last zu bevorzugen ist, da es ansonsten zu einem lokalen Maximum im Momentenverlauf führt, und dieses Moment zur Querschnittsbemessung herangezogen werden muss.

Beruhend auf dem Prinzip der Kraftwegreduzierung [3] soll die Stützweite möglichst kurzgehalten werden, ohne dabei die Nutzung zu stark einzuschränken. Bei Biegeträgern kann beobachtet werden, dass das auftretende Moment quadratisch mit der Spannweite ansteigt. Betrachtet man jedoch nicht nur einen eindimensionalen Träger, sondern ein zwei- oder dreidimensionales hierarchisches System, so muss auch die Anordnung und Anzahl der Tragelemente optimiert werden.

2.4.3 Querschnitt

Der Querschnitt ist eine geometrische Definition unabhängig vom Material. In der Praxis gilt jedoch, dass gewisse Querschnittsformen nur für bestimmte Materialien sinnvoll anwendbar sind. Die wichtigsten Kenngrößen eines Querschnitts sind:

- Trägerhöhe h cm
- Trägerbreite b cm
- Fläche A cm² → Zug/Druck
- Widerstandsmoment W cm³ → Biegetragfähigkeit
- Trägheitsmoment I cm⁴ → Biegesteifigkeit
- Trägheitsradius i cm → Knicken

Die Eignung einer Querschnittsform ist vor allem von der Belastungsart abhängig. So spielt die Form für reinen Zug und Druck (ohne Knickmoment) keine Rolle, bei Biegung hingegen können mit den richtigen Querschnittsprofilen Material eingespart werden.

Um Querschnittsformen in Ihrer Effektivität zur Abtragung von Biegelasten rational und auf rein geometrischer Basis vergleichen zu können, kann der Profilierungsfaktor $c' = \frac{i^2}{h^2}$ herangezogen werden. Die Querschnittsübersicht in *Abb. 1* zeigt, dass ein rundes Vollprofil mit $c'=0,06$ den schlechtesten und ein theoretisches I-Profil, das ohne Steg ausgebildet ist, den maximalen Wert von $c'=0,25$ erreicht. Dies entspricht auch dem Grundsatz, dass die Biegetragwirkung am größten ist, wenn sich die Querschnittsfläche nahe an den Randfasern konzentriert [3]. Eine Bemessung erfolgt nach Wahl des geeigneten Querschnitts, vereinfacht

mit der Bestimmung der Profilgröße bzw. -höhe. Dieser Wert hat auch den größten Einfluss auf die effektive Tragfähigkeit.

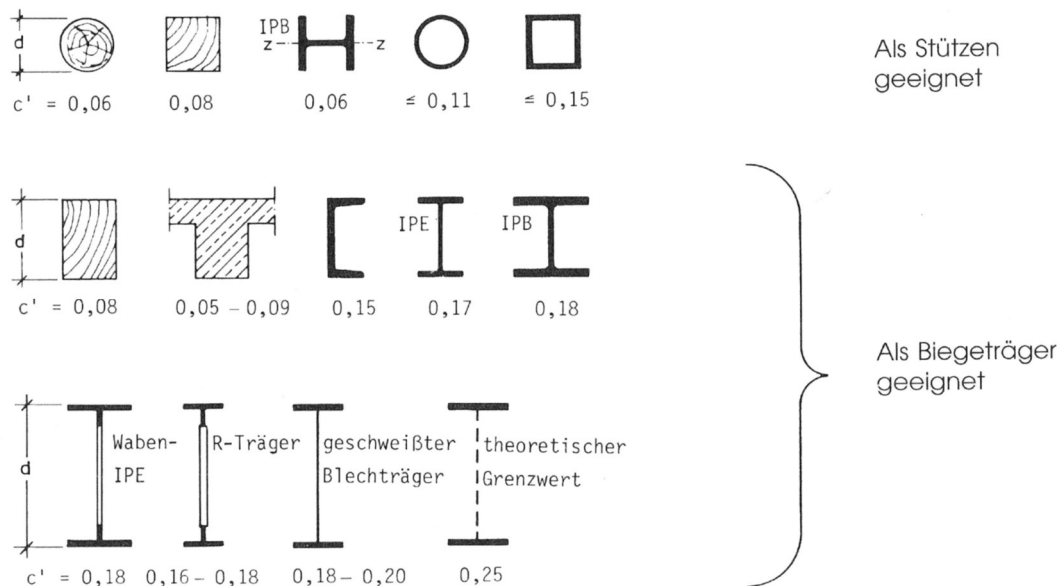


Abb. 1 Profilierungsfaktoren verschiedener Querschnitte [3]

2.4.4 Querschnitt entlang eines Trägers

Die Idee, den Querschnitt entlang der Trägerachse optimal zu gestalten, ist bereits 1638 von Galileo Galilei wissenschaftlich untersucht worden. In der Veröffentlichung „Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenschaften“ wird der optimale Querschnittshöhenverlauf für einen Kragträger gesucht [4]. Die Querschnittshöhe sollte so angepasst werden, dass in den Randfasern immer die maximale Spannung auftritt. Dies konnte Galileo Galilei mit einem parabelförmigen Träger erreichen (siehe *Abb. 2*), da das Widerstandsmoment des Querschnitts mit dem Quadrat der Höhe ansteigt [2].

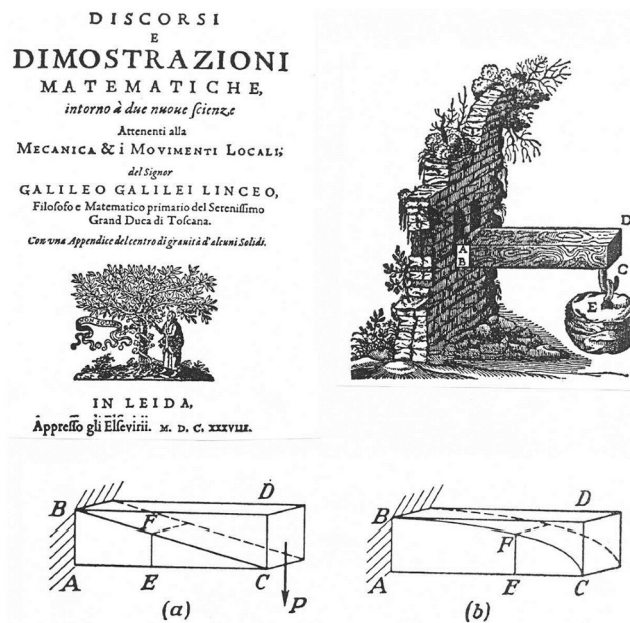


Abb. 2 Galileo Galilei: Gestaltung eines Kragbalkenquerschnitts [2]

Der von Galileo gewählte Ansatz gilt jedoch nur für statisch bestimmte Systeme, bei denen die Schnittkräfte nur von der Belastung abhängig sind. Es kann somit der Querschnitt an die ermittelten Spannungsverläufe angepasst werden.

Bei statisch unbestimmten Systemen gilt es zu beachten, dass die Spannungen der Steifigkeit des Systems folgen [3]. Wird der Querschnitt vergrößert, so wird er steifer und zieht noch größere Schnittkräfte an sich. Somit wird die Optimierung zu einem iterativen Prozess. Diese Umlagerungen können, richtig eingesetzt, zu effizienteren Bauwerken führen, gut zu sehen ist dies vor allem bei Brücken, wo in den Stützbereichen oft der steifste Querschnitt gewählt wird, einerseits um die Feldmomente in die Stützmomente umzulagern und andererseits um die für Brücken typischen, großen Eigenlasten an den Stützen zu konzentrieren. Der Unterschied zwischen statisch bestimmten und unbestimmten Systemen wird in *Abb. 3* mit Beispielen aus der Praxis verdeutlicht.



Abb. 3 Links: Statisch bestimmter Dreigelenkrahn [5], rechts: Statisch unbestimmte Autobahnbrücke A3 Passau [6]

2.4.5 Formfindung

Besonders bei kurzen Spannweiten stellt die Ausbildung eines Biegebalkens im Bauwesen den Standard dar. Die Gründe dafür sind vor allem im geringen Aufwand in der Planung und Ausführung, sowie im geringen Platzverbrauch zu finden. Bei großen Spannweiten zeigt sich die Ineffizienz, die sich durch die Momentenschnittkraft im Querschnitt ergibt. Denn durch den hohen Materialverbrauch steigt das Eigengewicht, wodurch das System zusätzlich belastet wird.

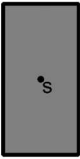


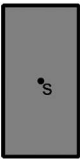
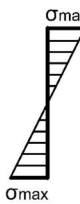
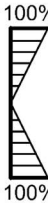
Schnittkraft	Querschnitt	Spannung	Ausnutzung	Durchschnittliche Ausnutzung
Normalkraft				100%
Moment				50%

Abb. 4 Vergleich der Ausnutzung nach Schnittkraftart (Elastisch)

Durch das Abnehmen der Spannungen zum Schwerpunkt hin kann nur die Randfaser voll ausgenutzt werden. Wie in *Abb. 4* dargestellt ist im Gegensatz dazu ein rein Normalkraft beanspruchter Querschnitt vollflächig auf 100 % ausnutzbar [7]. Es gilt jedoch zu beachten, dass bei Normalkraftbelastungen jede Exzentrizität auch zu einem Moment führt (Knicken). Daher sollte das Tragsystem so geformt werden, dass möglichst kleine Biegespannungen auftreten. Bei einfachen Systemen ergeben sich je nach Belastung typische Formen, wie Parabelkurven und Kettenlinien.

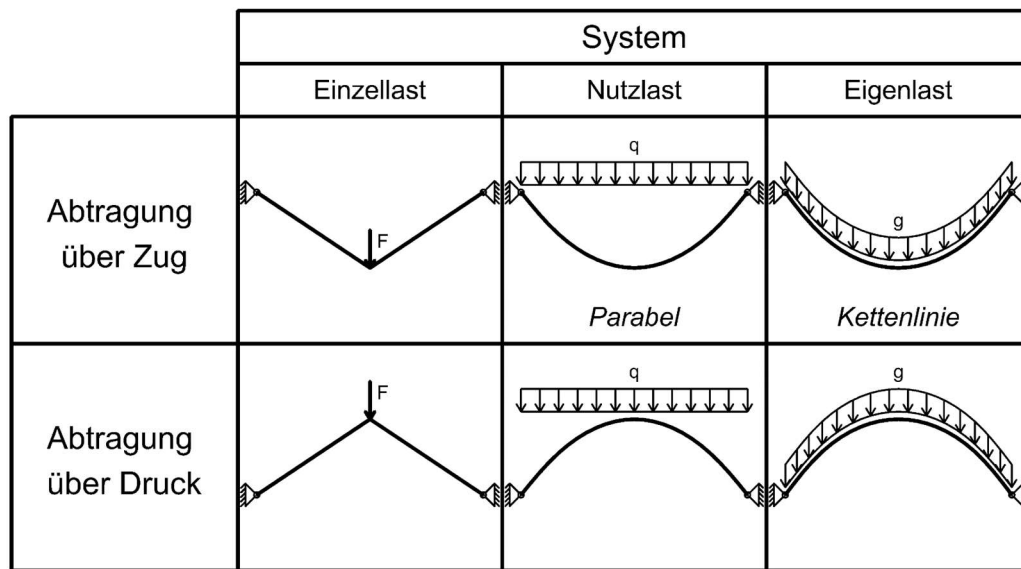


Abb. 5 Formfindung mit unterschiedlichen Lasten

Das über Zug tragende System entspricht in der Form einem belasteten Seil. Wird dieses wie in *Abb. 5* um die Horizontale gespiegelt, treten nur Druckkräfte auf. Dieses Prinzip ermöglicht die Formfindung durch die Erstellung von hängenden Modellen, bestehend aus Seilen und angebrachten Gewichten. Dies ist am Beispiel der von Antoni Gaudí entworfenen Sagrada Família in *Abb. 6* ersichtlich.

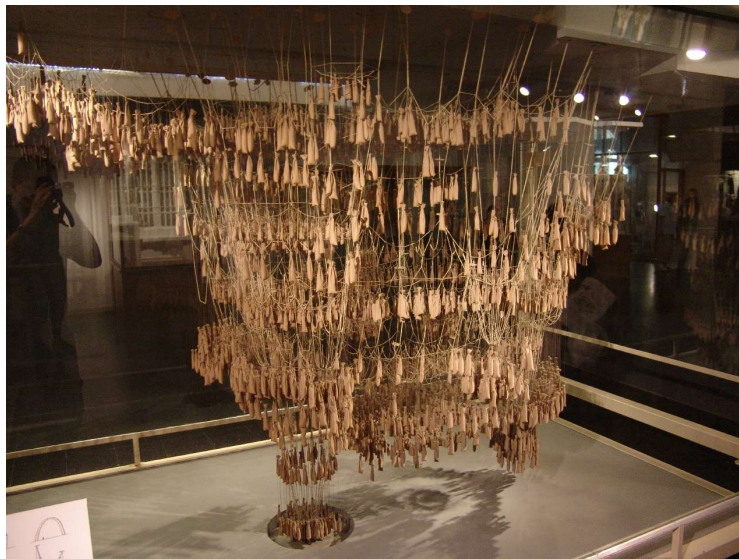


Abb. 6 Hängendes Statikmodell der Sagrada Família [8]

Das physische Modell wird mittlerweile durch spezielle Software ersetzt. Diese ermöglicht, komplexe Formfindungsprozesse schnell zu lösen und auch zu parametrisieren, beruht aber auf denselben Prinzipien.

Die Formfindung ist für die Modellierung von Seil- und Membrantragwerken unabdingbar. Für weitere Bereiche der Tragwerksplanung findet sie nur selten Anwendung, da durch das Vorhandensein einer Reststeifigkeit oft die Geometrie aus Erfahrungswerten und nicht aus mathematischen Simulationsmodellen und Optimierungsverfahren bestimmt wird [9].

2.4.6 Fachwerke

Wie bereits unter *2.4.5 Formfindung* beschrieben ist eine Lastabtragung über Normalkräfte besonders effizient. Um dies zu erreichen können Fachwerke eingesetzt werden. Sie können als Ganzes gesehen, Momente abtragen, ihre Komponenten werden dabei aber nur axial belastet. Gegenüber einem normalen Biegeträger erhöht sich die Effizienz bei weit spannenden Tragwerken, weitere Vorteile sind vor allem die einfachere und günstigere Herstellung, der erleichterte Transport als Einzelteile und die hohe mögliche Bauhöhe [10].

2.4.7 Formung nach Spannungstrajektorien

Dem Beispiel der Natur folgend, gibt es auch im Bauwesen Bestrebungen die Tragstruktur nach den Spannungstrajektorien zu formen. Wie beim Knochenwachstum soll ein Netz gefunden werden, das den Hauptspannungen folgt. Diese Methode verlangt nach einem hoch tragfähigen Material, das in möglichst kleinen Mengen eingesetzt werden muss und dazwischen Hohlräume entstehen, ähnlich der unter *2.4.1 Material und Fertigung* erwähnten Verringerung der Rohdichte eines Materials durch die Einbringung von Poren. Der Unterschied besteht aber im größeren Maßstab der Freiräume gegenüber den Poren, und der gezielten Formung des Materialnetzes [11]. Praktische Anwendung findet diese Methode nur selten und dann auch weniger wegen ihrer Effizienz, sondern vor allem aus architektonischen Gründen [12] wie in den Beispielen in *Abb. 7*.

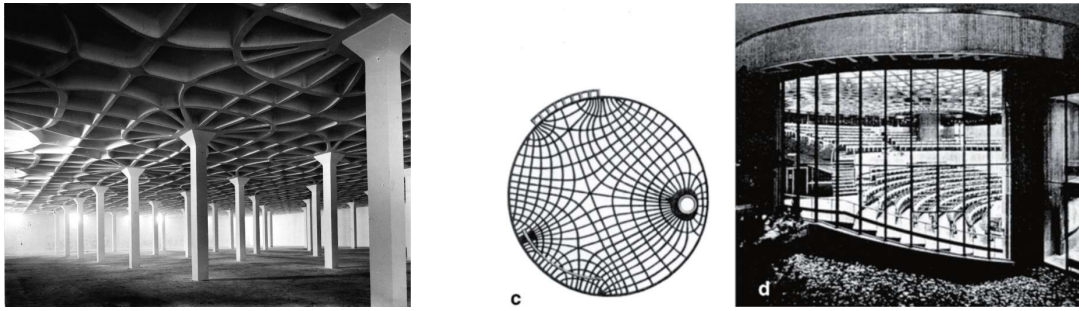


Abb. 7 Links: Decke von Pier Luigi Nervi [13], rechts: Decke des alten Biologie-Hörsaals der Universität Freiburg [11]

2.4.8 Formoptimierung

Wird eine Tragstruktur parametrisch modelliert, so liegt es nahe, den optimalen Wert dieser Parameter zu bestimmen. Die vom Konstrukteur definierten form- und querschnittssteuernden Parameter zeigen den möglichen Lösungsraum auf. Die Anzahl an Parametern sollte jedoch so gering wie möglich gehalten werden, da mit der Anzahl die Lösungsmöglichkeiten exponentiell anwachsen [14]. Diesem steigenden Rechenaufwand kann nur im geringen Maße mit der steigenden Leistung von Computern entgegengewirkt werden. Um den Prozess zu beschleunigen und nicht alle Kombinationen auszuprobieren zu müssen, werden intelligente Algorithmen (wie genetische Optimierung oder simulated annealing) eingesetzt, die versuchen das globale Maximum zu finden [15].

2.5 Übersicht und Ausblick

Die in diesem Kapitel beschriebenen Grundsätze sollen den Optimierungsprozess im Bauwesen abstrahieren und analysieren. Gleichzeitig soll der Status quo der Optimierung mit verschiedenen Ansätzen aufgezeigt werden. Beginnend mit der Basis aus Material und Fertigung bis über weitere, historisch später auftretende und immer aufwendigeren Methoden. Ein Ende dieser konstanten Evolution der Optimierungsansätze ist auch heute nicht absehbar. Mehr Rechenleistung, neue Materialien und Fertigungstechniken wie der 3D-Druck werden die Möglichkeiten in naher Zukunft erweitern und effizientere, langlebigere und umweltschonendere Bauten ermöglichen. Um das vorhandene Potenzial ausschöpfen zu können, gilt es, neue Methoden und angepasste Software zu entwickeln. Ein Ansatz, der den nächsten Schritt der Optimierung im Bauwesen darstellen könnte, ist die Topologieoptimierung, die im Zusammenhang mit dem 3D-Druck, computergenerierte Tragwerke und Bauteile für das digitale Zeitalter schaffen kann.

3 Topologieoptimierung

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Topologieoptimierung verständlich vermittelt werden. Dies umfasst Begriffserklärungen, die Funktionsweise und einen praxisbezogenen Überblick der Möglichkeiten aber auch Probleme dieser Optimierungsmethode.

3.1 Grundlagen

Die Topologieoptimierung fällt zusammen mit der Material- (2.4.1), Querschnitts- (2.4.3) und Formoptimierung (2.4.8) in die Kategorie der Strukturoptimierung [16].

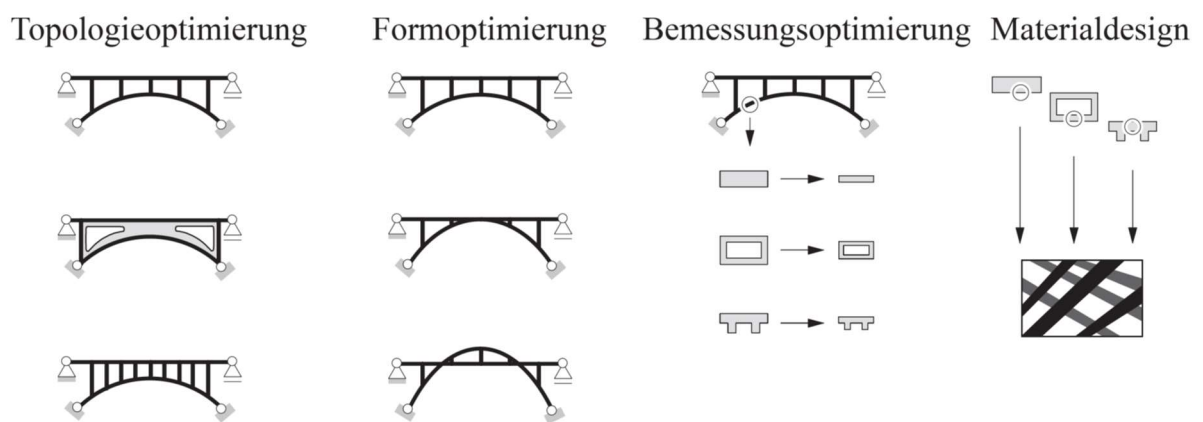


Abb. 8 Teilbereiche der Strukturoptimierung [16]

Im Gegensatz zur Form- und Querschnittsoptimierung, können sich durch die Topologieoptimierung nicht nur die äußere Form beliebig ändern, sondern auch Löcher im Inneren der Struktur ausbilden. Die Geometrie kann somit durch Algorithmen frei generiert und abgeändert werden. Damit stellt die Topologieoptimierung den freiesten und damit auch flexibelsten Optimierungsansatz dar. Dies wird durch den Vergleich in *Abb. 8* verdeutlicht. Sie treibt die Optimierungsgrundsätze der Minimierung der Kraftwege und der maximalen Nutzung des Materials, auf die Spitze [17]. Sie schafft es somit, zumindest theoretisch, alle anderen unter 2.4 erwähnten Optimierungsansätze, abgesehen von der Material- und Fertigungsoptimierung, zu vereinen und damit auch zu ersetzen.

Die Topologieoptimierung ist an Finite-Element-Berechnungen und somit Computersysteme gebunden, deshalb ist sie erst seit den Siebzigerjahren ein aktives Forschungsfeld und konnte erst nach der Jahrtausendwende in der Praxis Fuß fassen [18]. Mittlerweile konnte sie sich im Maschinenbau, besonders im Fahrzeug- und Flugzeugbau, etablieren. Durch die Produktion von hohen Stückzahlen und das verringerte Gewicht, was Treibstoff spart, kann der Mehraufwand in der Planung amortisiert werden. Im Bauwesen hingegen werden meist

Unikate errichtet und auch Betriebskosten können durch eine leichtere Struktur nicht eingespart werden [19]. Folglich ist verständlich, dass nach wie vor ein Großteil der Tragwerkskonstruktion auf Intuition und Erfahrung beruht, ohne computergenerierte Strukturen in Betracht zu ziehen.

3.1.1 Definition des Begriffs Topologie

Der Duden definiert Topologie als die „Lehre von der Lage und Anordnung geometrischer Gebilde im Raum“ [20]. Diese sehr breite Definition bedarf in Zusammenhang mit der Topologieoptimierung einer genaueren Erläuterung: In der Geometrie besitzen Flächen oder Volumen mit derselben Anzahl an Löchern, auch dieselbe Topologie, da durch ein Umformen der Konturen jede n -dimensionale Geometrie mit m Löchern in jede andere beliebige Geometrie mit denselben Parametern n und m überführt werden kann. Durch die Fähigkeit der Topologieoptimierung solche Löcher in eine Struktur einzubringen ist sie in der Lage, die Topologie im mathematisch-geometrischen Sinne zu verändern [17].

3.1.2 Funktionsweise

Ziel der Topologieoptimierung ist, Material möglichst optimal im vorgegebenen Entwurfsraum zu verteilen. Dies erfolgt beim am häufigsten verwendeten SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) Algorithmus durch ein Finite Element Netz, das ein isotropisches, linear-elastisches Material mit variabler Dichte bzw. Steifigkeit simuliert. Während der Optimierung wird die zur Verfügung stehende Masse durch Verändern der Dichte der einzelnen Finiten Elemente umverteilt. Die Steifigkeit wird mit Hilfe einer Funktion an die Dichte des Materials gekoppelt, wie in *Abb. 9* gezeigt. Dabei wird jede Dichte unter 100 % mit verhältnismäßig geringer Steifigkeit bestraft [19]. Dies soll bewirken, dass die erhaltene optimierte Dichteverteilung eine diskrete und massive Form darstellt.

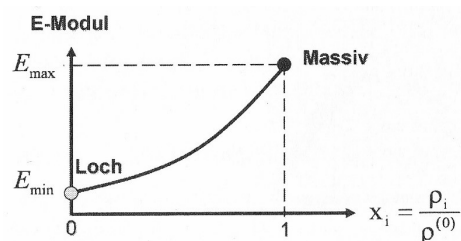


Abb. 9 Zusammenhang aus Dichte ρ und Steifigkeit E [17]

Die Berechnung startet mit einem vorgegebenen Massenziel, das mit Hilfe der Dichte auf den Entwurfsraum gleichmäßig verteilt wird. Die Optimierung erfolgt dann über eine Vielzahl an Iterationsschritten (siehe *Abb. 10*), die jeweils die statische Berechnung über FEM und die anschließende geringfügige Anpassung der Dichteverteilung beinhalten. Als Abbruchkriterium gilt die Konvergenz der Verteilung. Um dabei die FE-Berechnung über alle Iterationsschritte stabil zu halten, darf die Steifigkeit niemals null sein. Gelöst wird dieses Problem dadurch, dass für eine Dichte von $\rho = 0$ eine Mindeststeifigkeit von E_{\min} (z.B. $E_{\min} = \frac{E_{\max}}{1000}$) angesetzt wird.

Aus der erhaltenen Dichteverteilung kann im Anschluss die Form generiert werden. Alle Elemente, deren Dichte einen Schwellwert überschreitet, werden als massiv angesehen, jene die darunter liegen als Loch. Dieser Grenzwert liegt meist bei 50 % der maximalen Dichte.

Die so entstehende Geometrie ist aufgrund der binären Auswahl von Finiten Elementen nicht direkt realisierbar [17]. Die entstehende Oberfläche wird deshalb noch durch Filter- und Glättungsalgorithmen angepasst [21].

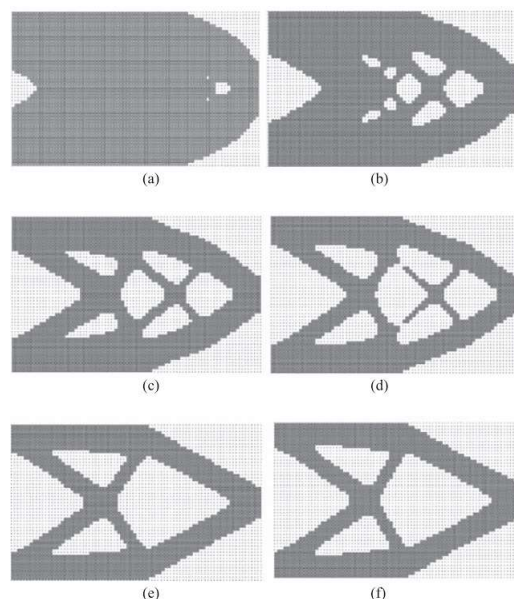


Abb. 10 Zwischenschritte einer Optimierung (a) Iteration 10, (b) Iteration 30, (c) Iteration 50, (d) Iteration 70, (e) Iteration 80, (f) Iteration 96 [22]

Die beschriebene SIMP Methode ist zwar die am weitesten verbreitete, jedoch wurden in der Forschung viele weitere entwickelt. Eine dieser Alternativen ist die BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) Methode, welche sich durch ihr striktes 1/0-System unterscheidet. Dies bedeutet, dass im FE-Modell auch in den Iterationsschritten nur Elemente mit voller oder nicht vorhandener Dichte bzw. Steifigkeit zugelassen werden. Bei jeder Iteration werden dabei die am wenigsten belasteten Elemente entfernt und an stark belasteten werden

Weitere hinzugefügt, bis die Form konvergiert. Die so entstehende Form ist damit mit dem Berechnungsnetz klar definiert, es werden jedoch auch hier Algorithmen zum Filtern von „checkerboarding“ und Glätten des Ergebnisses benötigt [21].

Verzichtet werden kann auf solche Nachbearbeitungen hingegen bei der „level set“ Methode, sie beschreibt nicht die Fläche bzw. Volumen selbst, sondern nur deren Ränder. Erzielt wird dies durch eine mathematische Funktion, deren Isoflächen die Ränder der Struktur beschreiben [23].

3.2 Die Topologieoptimierung im Designprozess

Um die Topologieoptimierung sinnvoll einsetzen zu können, muss vom konventionellen Designablauf abgewichen werden. Eine Konstruktion soll nicht erst manuell entworfen werden, um sie dann zu optimieren. Wie in *Abb. 11* ersichtlich muss die Topologieoptimierung vor dem Entwurf stattfinden, um als dessen Basis zu dienen. Auf menschliche Intuition kann dabei noch nicht verzichtet werden, da die berechnete Topologie, in eine sinnvoll umsetzbare Form überführt werden muss, welche anschließend durch etablierte Optimierungsmethoden weiter verfeinert werden sollte. [24]

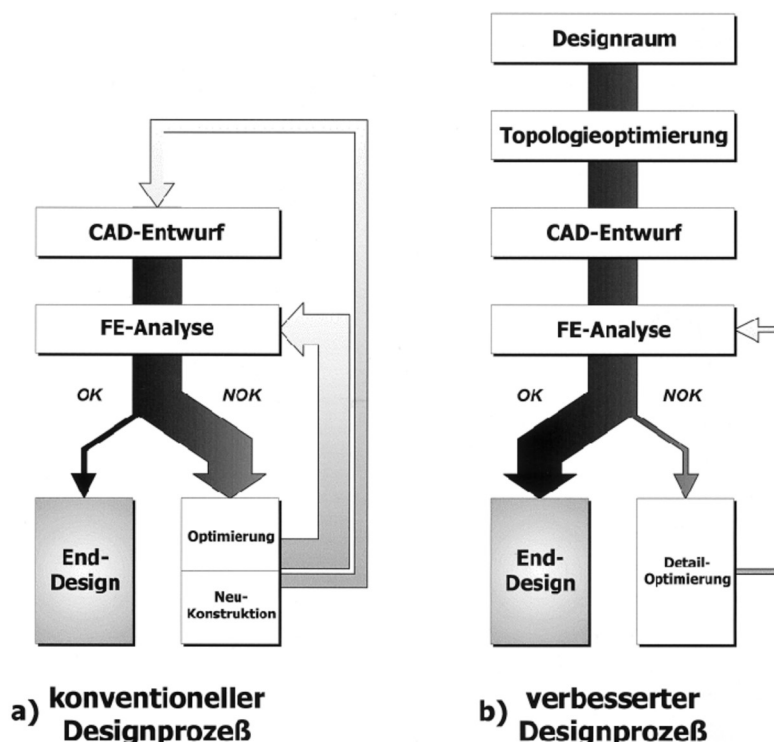


Abb. 11 Vergleich von konventionellem Designprozess und jenem mit integrierter Topologieoptimierung [24]

3.3 Mögliche Optimierungsziele und Restriktionen

Abhängig von den eingesetzten Verfahren und deren Implementierung lassen sich verschiedene Ziele und Restriktionen setzen. Unterschiedliche Optimierungsziele müssen in ihrer Bedeutung gewichtet werden, um eine einzige Zielfunktion zu ergeben, deren globale Extremwerte im Laufe der Optimierung gefunden werden sollen. Restriktionen kann es mehrere geben, ihre Aufgabe ist es, den zur Verfügung stehenden Bereich zur Findung des Optimums einzuschränken, um die Tauglichkeit des Ergebnisses zu gewährleisten.

In diesem Bereich liegen Forschung und Praxis weit auseinander, denn viele Ziele und Restriktionen wurden wissenschaftlich untersucht, jedoch haben nur sehr wenige ihren Weg in kommerzielle Software gefunden. Folgend sollen somit sowohl die aktuell zur Verfügung stehenden, sowie die zukünftig zu erwartenden Möglichkeiten aufgezeigt werden.

3.3.1 Mittlere Nachgiebigkeit / Steifigkeit

Die Maximierung der Steifigkeit bei vorgegebener Materialmenge stellt das erste und meist verwendete Ziel der Topologieoptimierung dar. Erreicht wird dies vor allem durch das Verfahren zur Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit (Compliance), es gilt als die klassische Art der Topologieoptimierung. Die mittlere Nachgiebigkeit errechnet sich dabei wie folgt:

$$C = \sum_i \vec{F}_i * \vec{u}_i$$

Dies entspricht der doppelten äußeren Arbeit (bei Abwesenheit anderer Einwirkungen wie Streckenlasten, Temperatureinflüssen etc.) und zugleich der doppelten Dehnungsenergie [17], Letztere wird in der Praxis meist als Zielfunktion angesetzt. Die verhältnismäßig leichte Implementierung hat zu einer weiten Verbreitung dieser Methode geführt. Das Hauptproblem mit der Standardimplementierung dieses Ziels liegt darin, dass die mittlere Nachgiebigkeit ein globaler Kennwert ist, Durchbiegungen an bestimmten Punkten können damit nicht minimiert werden.

3.3.2 Spannungen

Spannungen können sowohl als Optimierungsziel, als auch als Restriktion fungieren. Moderne Algorithmen sind im Stande, auf mehrere Kriterien gleichzeitig zu optimieren. Dies wird notwendig, um eine möglichst steife Struktur zu generieren, die gleichzeitig entweder ein bestimmtes Spannungsniveau nicht überschreitet, oder die Randspannungen möglichst konstant gehalten werden sollen.

Spannungsbegrenzungen sind mit Vorsicht einzusetzen, denn sie können nur ungefähre Lösungen liefern. Dies begründet sich darin, dass lokale Spannungsspitzen nicht betrachtet werden können, sondern nur ein gewichtetes Mittel von einer bestimmten Anzahl von Knoten [25]. Somit bleibt die Zielfunktion auswertbar und weist keine Singularitäten auf. Da die generierte Geometrie in einem späteren Schritt in die Entwurfsgeometrie umgewandelt werden muss, ändern sich die Spannungen wiederum und eine Feinoptimierung wird notwendig.

3.3.3 Eigenfrequenz

Ähnlich der Spannungsbegrenzung kann das Ergebnis einer Eigenfrequenzbegrenzung nicht allzu wörtlich genommen werden. Denn durch die Approximation der Form als Steifigkeitsverteilung, deren Löcher auch noch mit minimaler Steifigkeit einfließen, kann nicht die genaue Frequenz der Endgeometrie errechnet werden. Trotz dieser Ungenauigkeiten kann die Topologieoptimierung ein gutes Werkzeug sein, um ein möglichst hohes Eigenfrequenzspektrum zu gewährleisten, um so z. B. Brücken weniger schwingungsanfällig zu machen [17].

3.3.4 Herstellungsrestriktionen

Die oft komplexen Formen der Topologieoptimierung führen dazu, dass sie nicht ohne weiteres produzierbar sind. Aus diesem Grund bietet sich an, dass Optimierungsalgorithmen die Herstellbarkeit mit einfließen lassen. Je nach den Eigenschaften der Produktionsverfahren lassen sich andere Formrestriktionen definieren:

- Minimale Strukturgröße: Eine optimale Struktur kann zum Beispiel aus unendlich vielen infinitesimal kleinen Stäben bestehen. Für die Produktion müssen jedoch die Stabdurchmesser begrenzt werden. Auch ein gewisser Knickwiderstand kann damit gewährleistet werden.
- Maximale Strukturgröße: Verhindert lokale Massenansammlungen, was beim Gießen zu ungleichmäßiger Aushärtung führen kann.
- Maximaler Überhang: Restriktion für den 3D-Druck, variiert je nach Verfahren.
- Entformungsrichtung: Für ein Gussteil muss sich die Oberfläche in Entformungsrichtung stetig verjüngen.
- Extrusion: Die Form besitzt über die Länge der Extrusion denselben Querschnitt.
- Symmetrieebenen: Führt eventuell zu Einsparungen der Produktionskosten und der Berechnungszeit.

Diese Restriktionen sind nur durch wenige Softwareprodukte für die Praxis umgesetzt, weshalb die resultierende, optimierte Geometrie meist manuell angepasst werden muss, wodurch ein weiteres Abweichen von der optimalen Form notwendig ist [26].

3.3.5 Weitere Ziele und Restriktionen

Es gibt viele weitere Ziele und Restriktionen, die jedoch sehr selten ihren Weg von Forschungsarbeiten in die Praxis gefunden haben. Grundsätzlich lassen sich alle Eigenschaften einsetzen, die mit Hilfe von Finiten Elementen simuliert werden können [25]. Beispiele aus der Forschung zeigen unter anderem die Anwendung zur Optimierung von thermischen Eigenschaften (Minimierung des Wärmedurchgangs, oder die Maximierung der abgestrahlten Wärmeenergie) oder auch zur Schallabstrahlung sowie -absorption.

3.4 Typische Probleme

Durch Eigenheiten der Topologieoptimierung ist ein Umdenken im Designprozess notwendig und es gilt, die auftretenden Probleme zu identifizieren und wenn möglich zu umgehen.

3.4.1 Form als Designvorschlag

Die als Optimierungsergebnis erhaltene Form muss aus den Finiten Elementen der Simulation abgeleitet werden. Ohne Nachbearbeitung entspricht die resultierende Oberfläche dem für die Optimierung gewählten Netz. Deshalb ergeben sich nicht physikalisch begründete eckige Konturen, die nicht dem tatsächlichen Optimum entsprechen [17]. Es gilt aus diesem Grund, dass die Topologieoptimierung nur als Designvorschlag dient. Ein Planer muss die Form interpretieren und manuell in einem CAD-Programm nachzeichnen. Ansätze, diesen Prozess durch Software zu ersetzen oder zu vereinfachen, gibt es bereits, sind jedoch noch nicht ausgereift. Dies macht die Topologieoptimierung arbeitsintensiv und meist nicht vollkommen automatisch.

3.4.2 Mehrere Lastfälle

Wie auch bei vielen anderen Optimierungsmethoden ist es schwierig, mehrere Lastfälle zu berücksichtigen, da der beste Kompromiss gefunden werden muss. Viele Software-Pakete verzichten deshalb auf diese Option. Im Bauwesen jedoch ist die Betrachtung von unterschiedlichen Lastfällen meist unabdingbar, es sei denn, nur ein Lastfall ist ausschlaggebend, oder die Lastfälle unterscheiden sich nur im geringen Maße.

Bei Optimierung für mehrere Lastfälle bietet sich der Einsatz einer Spannungsrestriktion an, dies führt oft zu besseren Ergebnissen, als mit der konventionellen Methode zur Reduzierung der mittleren Nachgiebigkeit [17].

3.4.3 FE-Netzfeinheit

Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist direkt an das FE-Netz gekoppelt: Anzahl, Form, Lage und Art der Elemente kann das Resultat beeinflussen. Am wichtigsten, um die optimale Topologie zu finden, ist dabei die Anzahl der Elemente, also die Netzfeinheit. Ist sie zu niedrig, kann sich kein erkennbares, oder nur zu grob strukturiertes Tragwerk ausbilden. Ist sie zu hoch, so können sich sehr feine und damit nicht produzierbare Konturen ergeben; dem lässt sich aber mit Restriktionen auf die Optimierung entgegenreten. Visuell verdeutlicht wird dieser Einfluss der Elementgröße durch das Beispiel in *Abb. 12*. Ein bewährter Richtwert kann für biegebeanspruchte Balken- und Scheiben-Systeme mit 50 bis 100 Elementen über die Höhe, festgelegt werden [19]. In der Praxis jedoch liegt das größte Problem eines feinen Netzes in der benötigten Rechenleistung. Weshalb der Richtwert von 50 bis 100 Elementen in der Höhe nur im zweidimensionalen realistisch ist, bei dreidimensionalen Entwurfsräumen muss ein Kompromiss von Qualität und Berechnungszeit eingegangen werden.

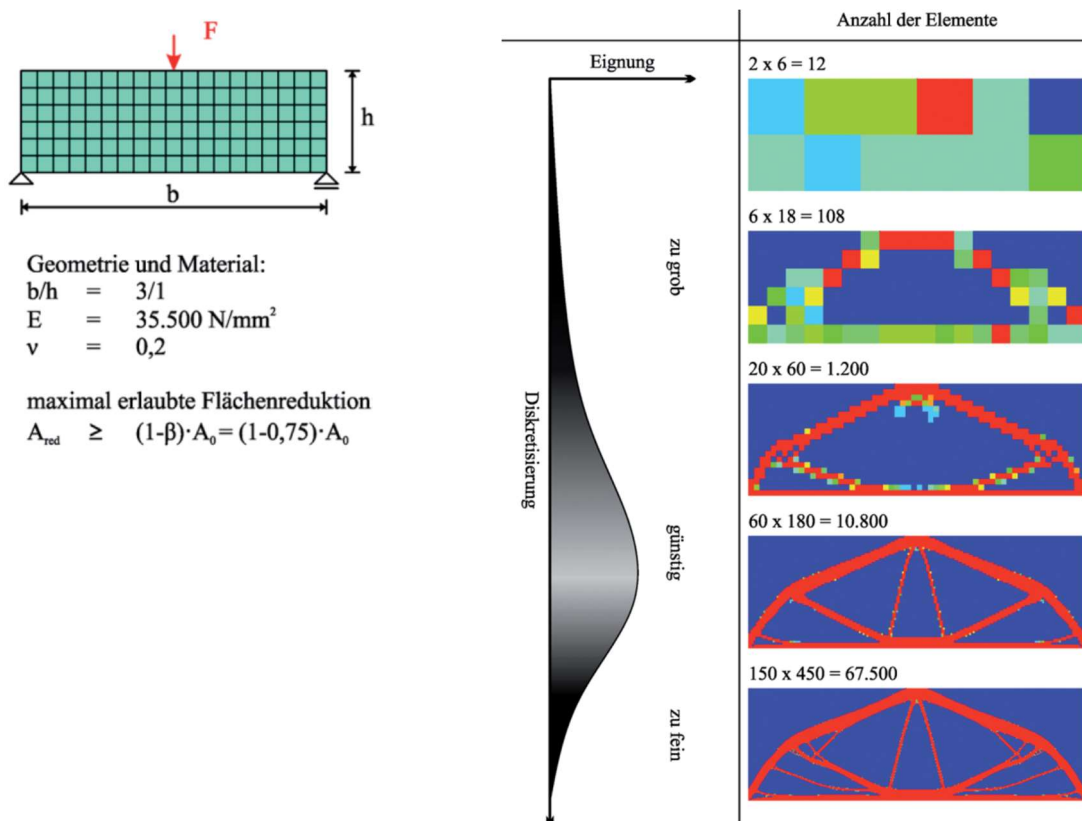


Abb. 12 Auswirkung der Netzfeinheit [19]

3.4.4 Sensitivität auf Randbedingungen

Durch die Optimierung für die definierten Randbedingungen könnte im Einzelfall schon bei geringfügiger Abweichung von diesen ein Versagen auftreten. Das Problem verschärft sich durch die Tendenz, möglichst wenige Lastfälle in die Optimierung miteinzubeziehen, einerseits aus Gründen des Rechenaufwandes und andererseits, da viele Softwarelösungen nur einen Lastfall zulassen. Ein fachkundiger Konstrukteur muss deshalb das entstehende, möglicherweise fragile System, einer Sensitivitätsanalyse unterziehen und etwaige Änderungen vornehmen. Es gilt dabei alle über die Bau- und Nutzungszeit auftretenden Kräfte mit einzubeziehen, auch jene, die in der konventionellen Tragwerksbemessung vernachlässigt werden können [27].

3.4.5 1/0-System des Materials

In der Standard-Anwendung der Topologieoptimierung wird jedes Finite Element, das am Ende der Optimierung eine größere Dichte als der festgelegte Grenzwert aufweist, in Struktur gewandelt, der Rest bleibt frei. Dies kann zur Folge haben, dass für die Stabilität wichtige Elemente wegfallen. Dieses Phänomen ist vergleichbar mit einem Nullstab in einem Fachwerk, dieser wird für die Integrität des Fachwerks benötigt, trägt selbst aber rechnerisch keine Nutzlast und nur geringe Eigenlasten ab.

Die Ursache dieses Problems ist durch intransparente proprietäre Software nicht immer einfach zu finden. Möglicherweise ist das Netz nicht fein genug, sodass sich ausbildende Stäbe nicht die volle Dichte benötigen, dasselbe kann auch durch die Festlegung einer minimalen Strukturgröße (3.3.4) auftreten. Auch zu wenige Iterationsschritte können die Ausbildung feinerer Strukturen verhindern. Ebenso ist es möglich, dass je nach Methode und Software, bevorzugt simplere Geometrien generiert werden und feinere Strukturen diesen Algorithmen zum Opfer fallen.

Oft bleiben Ansätze dieser abgeschnittenen Struktur im Optimierungsergebnis erhalten, zum Teil durch das Vorhandensein einer Ausstülpung, wie in *Abb. 13* dargestellt. Sind solche Anzeichen erkennbar, so kann problemlos eine manuelle Verbindung eingefügt werden.

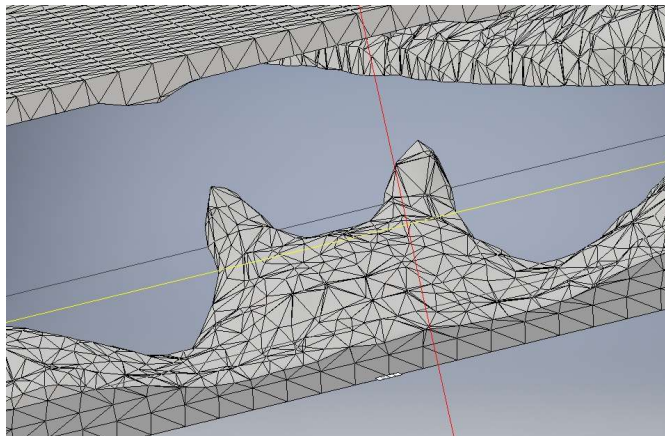


Abb. 13 Unterdrückung von weniger belasteten Strukturen

3.4.6 Vernachlässigung des Knickens

Die durch die Topologieoptimierung erhaltene Form kann schlanke Strukturen enthalten, was bei Druckspannungen zu Knickproblemen führen kann. Im Normalfall wird während der Optimierung keine Rücksicht auf diese Instabilitäten genommen und eine nachträgliche Überarbeitung der Form wird notwendig. Auch auf eine Berechnung nach Theorie 2. oder 3. Ordnung wird verzichtet, um Rechenaufwand einzusparen. Das Knickproblem fließt immerhin teilweise in die Berechnung ein, als Nebenprodukt der nicht perfekt generierten Struktur. Denn diese weist aufgrund der Netzabhängigkeit Exzentrizitäten und Krümmungen auf, wodurch eine Normalkraft nahezu immer auch zu einer Biegebeanspruchung führt, die in die Optimierung mit einfließt.

3.4.7 Materialmodellierung

Die am häufigsten eingesetzten Verfahren gehen von einem einzelnen Material aus, das isotrope Eigenschaften und lineare Steifigkeit aufweist. Dies eignet sich vor allem für metallische Erzeugnisse. In der Baubranche gibt es jedoch auch nicht isotrope Materialien wie Holz oder Mauerwerk, die somit nur begrenzt optimiert werden können. 3D gedruckte Bauteile weisen ebenfalls anisotrope Eigenschaften auf, die ihrem schichtenweisen Aufbau geschuldet sind. Kommerzielle Software geht auch nicht auf die speziellen Eigenschaften von Beton ein, schon gar nicht wenn dieser im Rahmen von 3D Druckverfahren verbaut wird.

Die übliche linear elastische Berechnung wirkt sich somit besonders nachteilig für realistische Simulationen von Beton und Stahlbeton aus, denn vor allem auf Zugbeanspruchungen nimmt die Steifigkeit durch Rissbildung stark ab [28]. Stahlbeton zeigt eine weitere Schwäche der

Topologieoptimierung auf, denn ein gleichzeitiges Optimieren von zwei verschiedenen Materialien, die ineinander liegen und sich gegenseitig ergänzen sollen, erweist sich als schwierig bzw. in den meisten Implementierungen als unmöglich.

3.4.8 Herstellung

Die von der Topologieoptimierung generierten Geometrien lassen sich oft nur schwer herstellen. Das offensichtlichste Problem ist die hohe Komplexität, die vor allem im Dreidimensionalen am sinnvollsten durch additive Verfahren umgesetzt werden kann. Die additive Herstellung oder genauer der 3D-Druck bringt jedoch andere Probleme mit sich, so kann je nach Methode nur ein bestimmter Überhangwinkel gedruckt werden, bevor Stützstrukturen benötigt werden. Ein weiteres Problem sind die Struktur厚ken: sind sie zu dünn sind sie nicht herstellbar, sind sie zu dick, dann können sie hohe Eigenspannungen durch die thermische Ausdehnung aufweisen. Diesen Herstellungsproblemen kann mit Restriktionen und Filtern während der Optimierung entgegengewirkt werden, wie unter 3.3.4 *Herstellungsrestriktionen* genauer erläutert.

3.5 Case Studies

Die Verwendung der automatisierten, computergesteuerten Topologieoptimierung im Bauwesen ist bisher eher die Ausnahme. Einige ausgewählte Projekte sollen Auskunft über mögliche Einsatzmöglichkeiten geben. Die Palette reicht dabei von Großprojekten wie Hochhäusern, bis zu kleinen Knotenausführungen, die von dieser Art der Optimierung profitieren konnten.

3.5.1 White Magnolia Plaza

Für den von Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM) entworfenen Bürokomplex, sollte die Aussteifung für Windlasten in der Fassadenebene untergebracht werden, deren Form musste jedoch unverändert bleiben. Die Struktur wurde deshalb mit Hilfe der Topologieoptimierung bestimmt und durch ein Stahl-Stabwerk abstrahiert (*Abb. 14*), um eine wirtschaftliche Umsetzung zu ermöglichen [29].



Abb. 14 Tragstruktur White Magnolia Plaza, Shanghai China [30]

3.5.2 Qatar National Convention Centre

Für ein Mehrzweckgebäude in Doha, wurde die Stützkonstruktion des Daches durch eine Topologieoptimierung gefunden. Das Design fand Anklang, da die generierte Form dem ortstypischen Sidra-Baum ähnelt. Die 250 m lange und 20 m hohe Struktur, deren „Äste“ einen maximalen Durchmesser von 7 m aufweisen, ist in *Abb. 15* dargestellt. Diese Stäbe bestehen aus einem Stahlkern, mit einer äußeren Stahlblech-Hülle. Letztere wurde durch Parametrisierung weiter optimiert, hauptsächlich, um die Paneele einfach gekrümmt zu halten [31].



Abb. 15 Qatar National Convention Centre im gebauten Zustand (Oben) [32] und das Simulationsmodell (Unten) [33]

3.5.3 Gradientenbeton

Durch Forschungsprojekte an der Universität Stuttgart wird die Möglichkeit untersucht, Betonbauteile mit graduellen Eigenschaften zu erzeugen. Das bedeutet, die Materialzusammensetzung je nach Kraftfluss lokal anzupassen. Hintergrund ist die Überlegung, dass mit geringerer Masse die Umwelt geschont werden kann. Die Topologieoptimierung wird in diesem Zusammenhang nicht verwendet, um eine diskrete Stabwerksform zu erhalten, sondern die Dichteverteilung wird als Endergebnis angewandt, um die Gradierung zu steuern. Umgesetzt wurde dies mit der SIMP-Methode, die so angepasst wurde, dass die Dichte-Steifigkeit-Kurve dem eingesetzten Gradientenbeton entspricht [28].

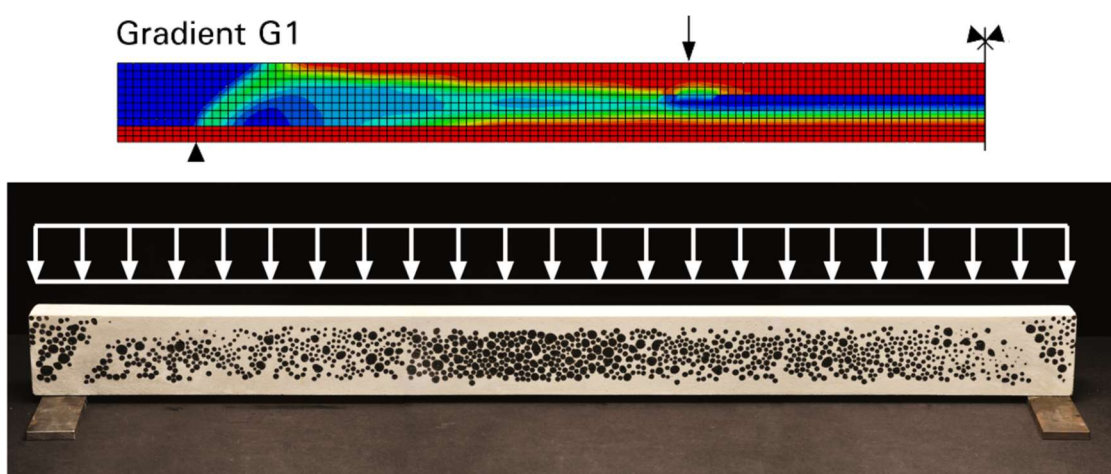


Abb. 16 Gradientenbeton [28]

3.5.4 Arup Stahlknoten

Das Ingenieurbüro Arup untersuchte im Rahmen einer Forschungsarbeit die Möglichkeit, Stahlknoten durch Additive Fertigung, genauer mit dem SLS-Verfahren, zu produzieren. Dadurch, dass bei der Additiven Fertigung im Grunde nur der Materialverbrauch den Kosten- und Zeitaufwand beeinflusst, sollte das Gewicht durch eine Topologieoptimierung reduziert werden. Die so erhaltene Form musste dann für die Produktion angepasst und mit Stützkonstruktionen ergänzt werden.



Abb. 17 Vergleich eines traditionellen Knotens (links) mit dem Topologieoptimierten (Mitte) und den für die Produktion angepassten (rechts) [34]

Der erhaltene Knoten (*Abb. 17*) konnte jedoch gegenüber einem traditionell gefertigten nur 15 % an Masse einsparen, auch die Produktionskosten betragen fast dreimal so viel. Es werden jedoch für die nahe Zukunft Verfahrensverbesserungen erwartet, die eine weitere große Gewichtsreduktionen und geringere Produktionskosten ermöglichen werden [34].

4 Additive Fertigung

In diesem Kapitel soll ein kurzer Einblick in die Additive Fertigung gegeben werden, um ihre Vorzüge und Möglichkeiten aufzuzeigen und um nahezu legen, wie im Designprozess auf diese Produktionsmethode Rücksicht genommen werden muss.

Die Additive Fertigung, im englischen Additive Manufacturing (AM), wird alternativ auch als 3D-Druck bezeichnet [35]. Darunter versteht man das computergesteuerte, direkt schichtweise Aufbauen eines Bauteils, basierend auf einem digitalen Modell [36]. Es gilt als additiv, da das Objekt durch kontinuierliches Hinzufügen von Material aufgebaut wird, im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren, die Material abtragen.

Die Topologieoptimierung und die Additive Fertigung bilden eine Symbiose, die es ermöglicht, die jeweiligen Stärken auszunutzen. Denn komplexe Strukturen, die durch die Topologieoptimierung generiert werden, können oft nur mit Hilfe der Additiven Fertigung hergestellt werden. Im Gegensatz kann mit der Topologieoptimierung die Bauteilmasse reduziert werden, was zu kürzeren und effizienteren 3D-Drucken führt.

4.1 Fertigung komplexer Geometrien

Der 3D-Druck ist nur eine von vielen Methoden zum Fertigen komplexer Geometrien, jedoch ist sie die Einzige, die durch diese Komplexität keinen Mehraufwand verursacht [37]. Beim Vergleich mit der subtraktiven Fertigung, wie Fräsen, Bohren oder Drehen, zeigt sich, dass diese stark durch die eingesetzten Maschinen eingeschränkt sind. Komplett frei generierte Formen können somit oft nicht oder nur unter besonders hohem Aufwand produziert werden. Ebenso ist nicht nur der Aufwand, sondern auch der Verbrauch des Rohmaterials hoch, besonders bei Strukturen mit einem großen Anteil an Freiräumen. Bei additiven Verfahren hingegen wird nur das benötigte Material verbraucht, was sich positiv auf die Nachhaltigkeit auswirkt.

Komplexe Geometrien können alternativ auch durch Gießen produziert werden, jedoch ist dies wiederum mit erheblichen Problemen verbunden. So muss garantiert werden, dass das flüssige Material alle Bereiche erreichen und die gesamte Form füllen kann. Ebenso muss eine Schalung erstellt werden, die häufig nicht wiederverwendbar ist. Die Komplexität einer solchen Schalung führt wiederum zum selben Problem der Fertigung. Denkbar wäre aber eine Kombination mit dem 3D-Druck, der eine solche Schalung produzieren kann. Dabei muss die Schalung nur während des Gusses die Tragfestigkeit übernehmen, was die Materialwahl erleichtert. So kann die gedruckte Schale aus einem günstigen und leicht formbaren Material

bestehen und der Guss mit hochfesten und schwer druckbaren Materialien (z. B. bestimmte Metalle oder Beton) ausgeführt werden.

Eine weitere Alternative zum Fertigen von komplexen Geometrien kann unter Umständen der Einsatz von zusammengesetzten Elementen bieten. Durch Schweißen, Löten, Kleben, Klemmen oder Verschrauben kann ein Bauteil erstellt werden, dessen Einzelteile dabei simpel oder auch komplex sein können. Deshalb bietet es sich an, die Komplexität in ein oder mehreren kleinen Elementen zu konzentrieren und diese mit großen, simplen und günstigen zu kombinieren [38]. Dies kann zu ökonomischen größeren Bauteilen führen, wie am Beispiel des Autorahmens „NextGen Spaceframe by EDAG“ in *Abb. 18* gezeigt wird, wo 3D-gedruckte Knoten mit Rechteckprofilen kombiniert werden.



Abb. 18 NextGen Spaceframe Knoten (EDAG Engineering GmbH) [38]

Die Analyse der konventionellen Fertigungsverfahren für komplexe Geometrien zeigt, dass sie meist weder ressourcenschonend, noch kosteneffizient sind, dies könnte sich in Zukunft durch den 3D-Druck ändern.

4.2 3D-Druck

Unter 3D-Druck versteht man das schichtweise Herstellen einer dreidimensionalen Struktur. Im Normalfall bedeutet dies, dass in der x - y -Ebene Flächen erstellt werden, die dann über die z -Achse aneinandergereiht zu einem Volumenkörper führen. Dies ermöglicht die computergestützte Erstellung von hochkomplexen Formen. AM kann, je nach Einsatzgebiet, in verschiedene Unterkategorien eingeteilt werden [39]:

- Rapid Prototyping (RP): Herstellung eines Prototyps, der nicht den Eigenschaften des Endproduktes entsprechen muss. Er dient meist als Größen- bzw. Formreferenz.
- Rapid Tooling (RT): Fertigung von Hilfsmitteln für die Produktion wie z. B. Gussformen.
- Direct Manufacturing (DM): Produktion des Endproduktes mittels 3D-Druck.
- Rapid Repair (RR): Reproduktion eines beschädigten Bauteils, sofern es keinen Ersatz gibt oder dieser nicht schnell genug geliefert werden kann.

Von diesen Kategorien findet aktuell vor allem das Rapid Prototyping Anwendung und stellt den Standard für das Erstellen von physikalischen Prototypen in Forschung und Entwicklung dar. Die anderen Bereiche gewinnen jedoch mit fallenden Produktionskosten und größerer Verbreitung der Maschinen kontinuierlich an Bedeutung [40].

In den vergangenen Jahren erregten vor allem günstige Drucker für den Heimgebrauch Aufsehen, wodurch die Bekanntheit vom 3D-Druck stark zunahm. Aber auch im professionellen Umfeld konnten Kosten gesenkt, Qualität gesteigert und neue Anwendungsgebiete gefunden werden. Hält dieser Trend an, so kann angenommen werden, dass in Zukunft auch Direct Manufacturing (DM) (direktes Drucken des Endproduktes) von einer Randerscheinung zu einer ökonomisch sinnvollen Alternative zu konventionellen Herstellungsverfahren werden kann. Die Umsetzung des DM ist besonders wichtig, da es die Ausbildung von innenliegenden Hohlräumen im Endprodukt erlaubt, was neue Möglichkeiten eröffnet und die Leistungsfähigkeit des Bauteils steigern kann [39].

4.3 Verfahren

Die Herstellungstechnik des 3D-Drucks ist noch relativ jung, sie hat ihren Ursprung in den 80er Jahren mit der Stereolithografie (STL). Diese erste Methode funktioniert durch die Laserbestrahlung von flüssigen Polymeren, die unter UV-Licht erhärten. Auf diese Art werden bis heute besonders hochauflösende Teile für das Rapid Prototyping hergestellt [41]. In den vergangenen Jahrzehnten wurden jedoch weitere Techniken entwickelt, die heute eine große Materialvielfalt erlauben und je nach Anforderungen schnellere, günstigere, genauere und widerstandsfähigere Teile produzieren können. Eine Übersicht der verschiedenen Methoden, deren Funktionsprinzip und der zur Verfügung stehenden Materialien wird in *Abb. 19* gegeben.

Gruppe	Basis	Prinzip	Druckverfahren (Beispiele)	Materialien (Beispiele)
Schmelzschichtung	Geschmolzene Materialien	Schmelzschichtung	Fused Deposition Modeling (FDM) Fused Filament Fabrication (FFF) Fused Layer Modeling (FLM) Layer Plastic Deposition (LPD)	Kunststoffe (z. B. ABS, PLA, Nylon, PET, ASA, POM, PP) und Kunststoffmischungen (z. B. Holz, Stein, Karbon, Kupfer)
Aushärten	Flüssige Materialien	Druckkopf	PolyJet (PJM) Multi-Jet Modeling (MJM) Wachsdruk (3DWP)	Kunstharze, UV-sensitive Flüssigkunststoffe, Wachs
		Stereolithografie mit Laser	Stereolithografie (STL, SLA)	Kunstharze, lichtempfindliche Flüssigkunststoffe,
		Stereolithografie mit Maske	Digital Light Processing (DLP) Film Transfer Imaging (FTI)	Epoxidharze, Elastomere, Acrylate
Aufschmelzen	Pulver	Sintern	Selektives Lasersintern (SLS) Selective Heat Sintering (SHS)	Kunststoffe, Metalle, Legierungen, Keramik
		Schmelzen	Selektives Laserschmelzen (SLM) Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	
Verkleben	Pulver, Papier	Schichten Verkleben Cutting	Laminated Object Modeling (LOM) Layer Laminated Manufacturing (LLM) 3DP, PLT	Gips Papier
Sonderformen	Div.	Diverse	Contour Crafting (CC) etc.	Beton, Wachs, Teig, Silikon, Schokolade, Weingummi

Abb. 19 Überblick von Druckverfahren [36]

Im Weiteren soll beispielhaft auf zwei der wichtigsten Verfahren, FDM (beim Rapid Prototyping) und SLS (beim Direct Manufacturing) genauer eingegangen werden.

4.3.1 Fused Deposition Modelling (FDM)

Das Fused Deposition Modelling, kurz FDM, ist dank der günstigen Maschinen und Materialien die am weitesten verbreitete 3D-Druck Methode. Aufgrund ihrer Erschwinglichkeit wird sie auch im privaten Bereich angewendet. Im professionellen Umfeld eignet sich FDM nur bei geringen Anforderungen an Oberflächenbeschaffenheit und Haltbarkeit, wird aber trotzdem oft neben der Stereolithografie für Rapid Prototyping eingesetzt.

Das Funktionsprinzip entspricht einer Heißklebepistole, das bedeutet, es wird ein Kunststoff (PLA, ABS, PET, Nylon, ...) geschmolzen und fadenförmig aus einer beweglichen Düse extrudiert, womit die Schichten des Modells strichförmig aufgetragen werden. Ist eine Schicht abgeschlossen, so wird die Düse angehoben und die nächste Ebene aufgebracht. Dabei verschmelzen die Stränge untereinander, jedoch nicht vollständig, sodass das entstehende Gefüge anisotropes Verhalten aufweist, darauf wird unter *4.4 Mechanische Eigenschaften des schichtweisen Aufbaus* genauer eingegangen.

Der schichtweise Aufbau führt auch dazu, dass Überhänge mit mehr als ca. 45° bezogen zur z-Richtung oft durch eine temporäre Stützkonstruktion gehalten werden müssen [41]. Die mögliche Baugröße des FDM ist stark maschinenabhängig, liegt aber meist im Bereich von einem Würfel mit einer Seitenlänge von maximal 15 bis 30 cm.

4.3.2 SLS/SLM

Das Selektive Lasersintern (SLS) gehört zu den wenigen AM-Methoden, die für das Produzieren eines Endproduktes (Direct Manufacturing) geeignet sind. Die erhaltenen Teile sind hochauflösend und mechanisch belastbar. Die kompatible Materialpalette ist relativ umfangreich, neben Thermoplasten, Keramiken und Sanden können auch Metalle verarbeitet werden. Wobei besonders die Metalle, mit ihren guten mechanischen Eigenschaften das Verfahren für die Produktion von Endprodukten im Bauwesen interessant machen kann.

Der Druck erfolgt durch das schichtweise Aufbringen von Pulver, welches dann für jede dieser Schichten durch einen Laser bis zur Sintertemperatur erhitzt wird. Da nur die laserbeschienenen Partikel aneinanderschmelzen bzw. sintern, baut sich so das Teil innerhalb eines pulvergefüllten Bauraumes auf. Dies hat den Vorteil, dass nicht unbedingt Stützstrukturen benötigt werden.

Durch die großen Temperaturunterschiede während der Produktion kommt es zu Schrumpfungen und Spannungen im Bauteil (siehe *4.4 Mechanische Eigenschaften des schichtweisen Aufbaus*). Diesen Effekten kann mit Simulationen und daraus abgeleiteten Anpassungen entgegengewirkt werden, jedoch bleibt die maximal mögliche Bauteildicke durch diese Temperaturbelastungen begrenzt [40].

Das gedruckte Bauteil besteht aus den Partikeln des Pulvers, die an ihren Kontaktflächen verschmolzen sind. Daraus folgt, dass die Oberfläche grundsätzlich rau wird und je nach Anforderungen eventuell durch Perlstrahlen glattgeschliffen werden muss. Ebenso dem Partikel-Aufbau geschuldet ist die Porosität des Endprodukts, die sich negativ auf die Tragwirkung auswirkt und keine Dichtheit gewährleisten kann.

Alternativ zum SLS-Verfahren kann das Selektive Laserschmelzen (SLM) eingesetzt werden. Die Produktion unterscheidet sich nur durch die vom Laserstrahl eingebrachte Temperatur. Dieser erhitzt das Pulver über die Schmelztemperatur, wodurch die Partikel vollflächig miteinander verschmelzen. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass keine Poren zurückbleiben und somit auch die Tragfähigkeit und Dichtheit erhöht wird. Jedoch werden auch mit SLM nicht die mechanischen Eigenschaften eines Gussteils desselben Materials erreicht, da sich zwischen den Schichten Kristallgrenzen ausbilden. Ein Beispiel für die Anwendung von SLM sind die Verbindungsknoten des „NextGen Spaceframe“ aus *Abb. 18*.

4.4 Mechanische Eigenschaften des schichtweisen Aufbaus

Der für das AM typische schichtweise Aufbau bringt je nach Druckverfahren einige negative Konsequenzen mit sich. So kann das gedruckte Material oft nicht als isotrop angesehen werden, denn die Verbindung an den Schichtgrenzen ist nicht gleichwertig zum Rest des Materials. Vor allem die Zugfestigkeit kann quer zu den Schichtgrenzen stark abnehmen. Dies liegt jedoch nicht nur an der schlechten Verschmelzung, sondern auch an den Auswölbungen, die an der Oberfläche entstehen. Diese in *Abb. 20* für FDM dargestellten Auswölbungen und die dazugehörigen Einkerbungen führen zu Spannungsspitzen an den Rändern der ohnehin schon geschwächten Schichtgrenzen. Diese Effekte sind bei FDM besonders stark ausgeprägt, jedoch lassen sie sich auch auf andere Druckverfahren wie SLS oder STL übertragen.

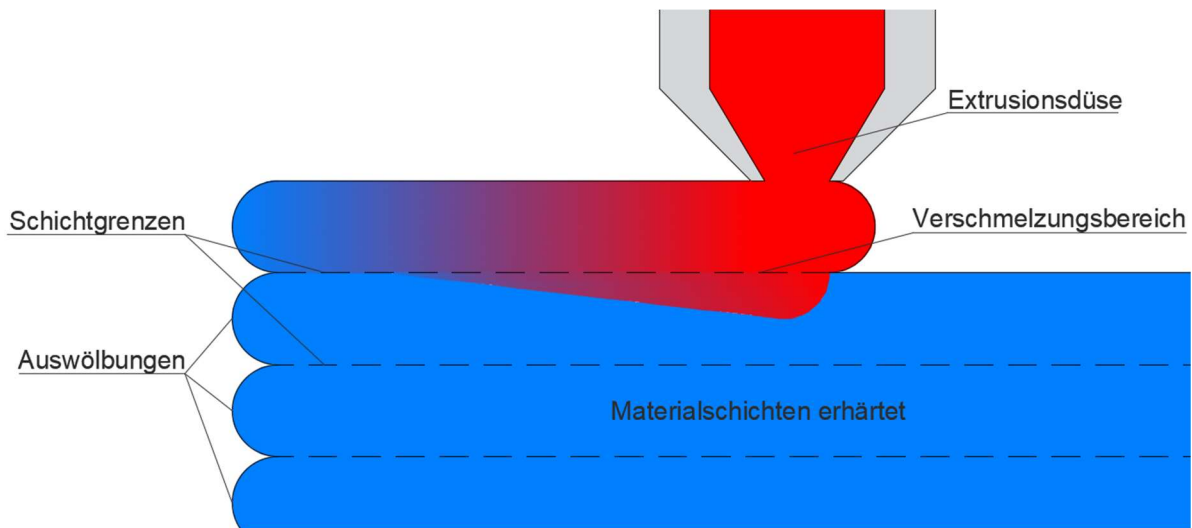


Abb. 20 Schichtenaufbau FDM

Weitere Probleme können resultieren, wenn das Material während des Druckes zum Verschmelzen erhitzt wird. Dies führt dazu, dass das Bauteil beim Abkühlen gestaucht wird, wodurch die gedruckte Form von der geplanten abweichen kann, es sei denn diesem Effekt wurde im Design Rechnung getragen. Wird das Stauchen hingegen behindert, so kommt es zu Eigenspannungen im Bauteil, die es krümmen und weniger widerstandsfähig machen können. Im Normalfall wird dieses Stauchen durch das bereits gedruckte und abgekühlte Material behindert. Das bedeutet, je größer ein gedrucktes Element, desto ausgeprägter sind diese Effekte, da sie sich über die Länge aufsummieren. Somit sind die maximal erzielbaren Elementdicken oft begrenzt, diese sind jedoch stark abhängig vom eingesetzten Material und Verfahren.

4.5 Workflow eines 3D-Drucks

Der grobe Ablauf eines 3D-Drucks ist in Abb. 21 stichwortartig aufgelistet, viele Arbeitsschritte verlangen jedoch nach einer genaueren Erläuterung.

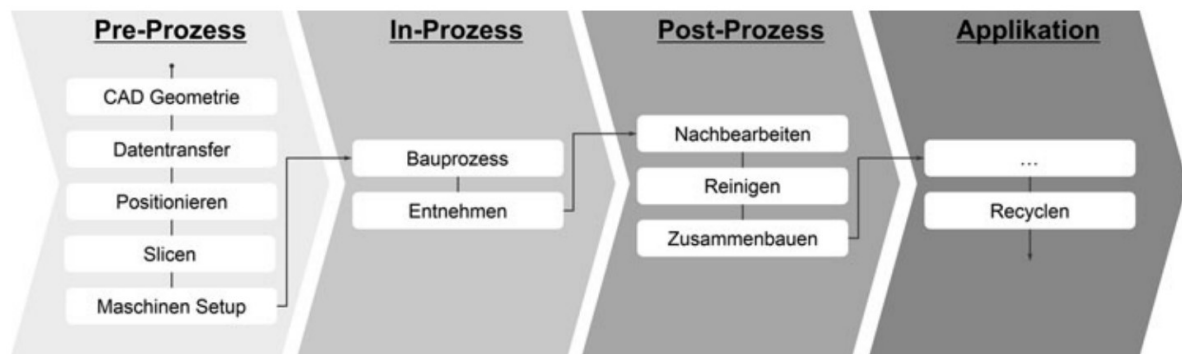


Abb. 21 Workflow des AM [39]

Das Preprocessing ist die wichtigste Phase im Workflow des 3D-Drucks, denn sie hat starken Einfluss auf die maximal erzielbare Druckqualität, weshalb sie von Erfahrung und Expertise profitieren kann. Das Preprocessing kann mit den vielen Einzelschritten sehr arbeitsintensiv und umfangreich sein, so sollte auch schon die Entwurfsphase der Geometrie dazuzählen. Druckverfahren, Material und die Eigenschaften des Druckers (maximaler Detailgrad und Bauraum) sollten dabei auf den Entwurf Einfluss nehmen, um ungünstige Kompromisse beim Druck vermeiden zu können. Die Druckrichtung ist ebenso wichtig und sollte bereits zu Beginn des Entwurfs festgelegt werden, um möglichst große Festigkeiten zu erzielen, hohen Detailgrad zu ermöglichen oder um auf Stützstrukturen verzichten zu können.

Ist die CAD Geometrie finalisiert, so muss die Oberfläche durch polygonartige Dreiecke dargestellt werden. Dabei ist auf einen ausreichenden Detailgrad Rücksicht zu nehmen, denn Ausrundungen werden mit den planaren Dreiecken nur approximiert. Der Export kann dann über verschiedene Dateiformate erfolgen, üblich ist das STL-Format, das für die Stereolithografie entwickelt wurde. STL-Dateien sind jedoch, ihrem Alter und ursprünglichen Nutzen geschuldet, sehr rudimentär. Sie beinhalten nur Geometriedaten in Form von ebenen Dreiecken, können keine Materialeigenschaften assoziieren und keine Größeneinheit festlegen. Durch diese Schwachstelle in der Schnittstelle muss darauf geachtet werden, dass keine Informationen verlorengehen, die in den nächsten Schritten benötigt werden. Dies erschwert die Arbeitsteilung auf verschiedene Personen.

Die exportierte STL-Datei dient als Schnittstelle zum Slicer, jene Software, die aus der Geometrie die Anweisungen für den 3D-Drucker ableitet. Der Slicer teilt das zu druckende Volumen in Schichten, die dann je nach Einstellungen weiterverarbeitet werden. Beispiele für

die Einstellungsmöglichkeiten sind Wandstärken der gedruckten Bauteile, Art und Dichte der Füllung, Schichtdicke, Maschinenparameter wie Temperaturen und Geschwindigkeiten und viele mehr. Auch notwendige Stützstrukturen werden nach Wunsch vom Slicer in diesem Arbeitsschritt erstellt. Die Software wandelt die erhaltenen Schichtgeometrien in Werkzeugpfade um und sendet sie zusammen mit den Einstellungen in Form von G-Code an den Drucker.

Der Druck selbst kann sehr langwierig sein, benötigt jedoch kein menschliches Eingreifen und kann vollständig automatisch ablaufen, der Drucker arbeitet dafür lediglich die Liste des erhaltenen G-Codes sequenziell ab. Im Gegensatz zum automatischen Druck erfolgt das Postprocessing meist manuell, dafür müssen Stützstrukturen entfernt, das Bauteil visuell überprüft und eventuell die Oberfläche nachbehandelt werden. Sollte das gedruckte Bauteil am Ende nicht den Anforderungen entsprechen, so muss erneut im Preprocessing angesetzt werden, entweder durch eine Anpassung der Geometrie oder durch Ändern der Einstellungen des Slicers.

4.6 AM im Bauwesen

Die typischerweise hohen Kosten zusammen mit der begrenzten Bauteilgröße und der limitierten Materialwahl führen dazu, dass die Additive Fertigung in der Praxis des Bauwesens noch nicht Fuß fassen konnte. Es gibt jedoch einige Forschungsprojekte, die versuchen, den 3D-Druck im Bauwesen zu integrieren. Vor allem hervorzuheben sind Bestrebungen, Beton zu drucken. Beispielsweise ist der unter 3.5.3 erwähnte Gradientenbeton zu nennen, auch wenn hier der 3D-Druck nicht verwendet wird, um diskrete Strukturen zu erstellen, sondern um die Dichte lokal zu variieren. Die Bestrebung mit Beton Formen zu drucken gibt es jedoch auch, ähnlich dem FDM wird hier strangweise Beton aufgetragen. Eine Auswahl an Forschungsprojekten aus diesem Gebiet findet sich in *Tab. 1*. Eines dieser Beispiele ist das Projekt „COEBRO“ der TU Graz (*Abb. 22*), wo mit Hilfe von einem Industrieroboter kleinere Fertigteile aus Beton gedruckt werden können [42].



Abb. 22 3D-Drucken von Beton, Projekt COEBRO der TU Graz [42]

Tab. 1 Internationale Forschungsprojekte zum Thema Beton 3D-Druck [43]

Projektname	Einrichtung
Contour Crafting	University of Southern California
Freeform 3D Concrete Printing	Loughborough University
3DPC	TU Eindhoven
Additive Fertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton	TU München
Minibuilders	Institute for Advanced Architecture of Catalonia
COEBRO	TU Graz

Neben dem direkten Drucken des Betons wird auch der 3D-Druck von Sonderschalungen untersucht, die mit herkömmlichen Verfahren ausgegossen werden können. Wodurch größere Freiheit bei der Formgebung und bessere Betoneigenschaften erzielt werden können [44]. Abseits vom Betonbau kann im Bauwesen für kleine Teile wie etwa Knotenverbindungen auch der bereits im Maschinenbausektor etablierte Metalldruck eingesetzt werden. Aber auch andere Verfahren könnten für Nischenanwendungen mit geringen mechanischen Belastungen in Frage kommen.

5 Praktische Anwendung der Topologieoptimierung und der Additiven Fertigung

Dieses Kapitel soll als Grundlage für die folgenden Untersuchungen verschiedener Anwendungsgebiete im Bauwesen dienen. Es sollen die Arbeitsabläufe und die verwendete Software aufgezeigt werden, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können. Ebenso kann dieses Kapitel auch als eine Anleitung für die praktische Verwendung der Topologieoptimierung und der Additiven Fertigung fungieren.

5.1 Verwendete Software

Viele Programme im Bereich der Topologieoptimierung weisen Schwächen in der anfänglichen Erstellung der Geometrie und auch in deren Weiterverarbeitung nach der Optimierung auf. Aus diesem Grund wird für die einzelnen Arbeitsschritte auf getrennte Software zurückgegriffen, die sich besonders für den jeweiligen Schritt eignet. Teilweise werden auch unterschiedliche Programme für die gleiche Anwendung verwendet, somit können Ergebnisse verglichen und validiert werden.

5.1.1 Fusion 360 (2.0.6503)

Fusion 360 dient hauptsächlich als CAD-Software der 3D-Konstruktion des Entwurfsmodells, das dann für die Optimierung als STP-Datei exportiert werden kann. Kräfte und Randbedingungen können jedoch nicht exportiert werden. Weiters kann es als Schnittstelle zum Konvertieren in verschiedene Dateiformate dienen, wie beispielsweise für STL-Dateien des 3D-Drucks.

Fusion 360 bietet zusätzlich die Möglichkeit der FE-Simulation und der Topologieoptimierung (SIMP-Methode). Letztere ist jedoch sehr limitiert, so kann nur die Maximierung der Steifigkeit als Ziel verfolgt und ein Massenziel festgelegt werden. Ein großer Vorteil und Hauptgrund, warum es trotzdem neben solidThinking Inspire (5.1.3) für die Optimierung verwendet wird, ist die Möglichkeit der Cloudberechnung. Diese ist oft wesentlich schneller als eine lokale Berechnung und kann parallel ausgeführt werden.

5.1.2 Rhino 5

Rhino 5 zusammen mit Grasshopper und diversen Add-ons findet nur Anwendung für die parametrische Erstellung des Entwurfsmodells für den Stahlknoten unter 8.2. Gleichzeitig wird

auch eine Dimensionierung der Tragstruktur vorgenommen und die Schnittkräfte für die Topologieoptimierung des Knotens berechnet.

5.1.3 SolidThinking Inspire (2019.0.1)

Die Topologieoptimierung wird für jedes behandelte Beispiel mit *solidThinking Inspire* durchgeführt. Diese Software wurde speziell für die Optimierung im anfänglichen Entwurfsprozess entwickelt und bietet mehr Einstellungsmöglichkeiten als viele andere kommerzielle Softwareprodukte. Besonders wichtig ist die inkludierte Optimierung nach zulässiger Spannung, die unter Umständen bessere Ergebnisse liefern kann als die Optimierung zur Maximierung der Steifigkeit. Einige der Einstellungsmöglichkeiten sind in den Eingabefenstern der verschiedenen Optimierungsvarianten aus *Abb. 23* ersichtlich. So ist es möglich die Eigenfrequenzen in die Optimierung mit einzubeziehen. Es lässt sich auch unter anderem eine minimale und maximale Strukturgröße definieren, die auch die Netzfeinheit beeinflussen. SolidThinking Inspire bietet neben der Größenlimitierung der generierten Struktur auch die Möglichkeit andere Formrestriktionen festzulegen, so lassen sich beispielsweise Symmetrieebenen einfügen und Überhänge für den 3D-Druck begrenzen. Ermöglicht werden diese Funktionen durch eine Kombination von etablierten Produkten die im Hintergrund laufen, so erfolgt die Simulation in einem *Siemens PLM* Kern, die Vernetzung in *HyperMesh* und *SimLab* und die Optimierung in *OptiStruct* [45].

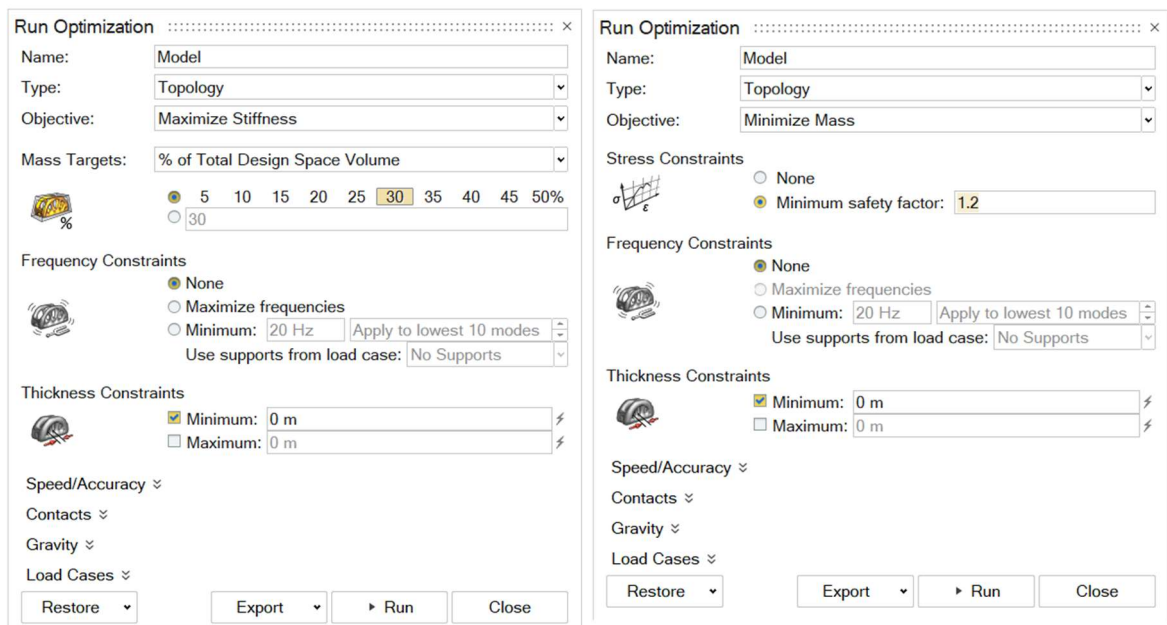


Abb. 23 SolidThinking Inspire GUI für Topologieoptimierung. Links: Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit, rechts: Massenreduktion mit Spannungsrestriktion

5.1.4 Autodesk Netfabb Premium (2020) und Meshmixer (3.4.35)

Sowohl *Netfabb* als auch *Meshmixer* werden für das Postprocessing der durch die Optimierung erhaltenen Netzoberfläche verwendet, um Fehler auszubessern und die Form druckbar zu machen. *Meshmixer* ist dabei vor allem für das manuelle Ausbessern, die Verdickung der Struktur, Glätten und neu Vernetzen der Oberfläche nützlich. *Netfabb* wird für boolesche Operationen und für die Reparatur der Oberfläche verwendet. Die Reparatur stellt sicher, dass keine Löcher, keine Verschneidungen und keine falsch orientierten Polygone im Netz auftreten.

5.1.5 Cura (4.0)

Die Software ist optimiert für den FDM 3D-Druck und eignet sich deshalb für den *Creality Ender 3*, dem für die Erstellung der Modelle verwendeten Drucker. Auch wenn *Ultimaker Cura* für andere Druckverfahren wie SLS nicht einsetzbar ist, so lässt sich damit trotzdem ersatzweise die Druckbarkeit nachweisen. Die auftretenden Probleme können ebenso auf andere Methoden und auch Slicer übertragen werden.

5.2 Allgemeines zur praktischen Durchführung der Topologieoptimierung

Um brauchbare bzw. möglichst gute Ergebnisse zu erhalten gilt es bei der Topologieoptimierung einiges zu beachten. Die Berechnungszeit bzw. die benötigten Ressourcen sind die größten limitierenden Faktoren der Topologieoptimierung, deshalb ist die durchdachte Modellierung des Design-Raums besonders wichtig. Das für die Optimierung zur Verfügung stehende Volumen soll möglichst klein gehalten werden, dies verkürzt Rechenzeiten oder ermöglicht ein feineres Netz. Erreicht werden kann ein möglichst kleines Design-Volumen vor allem durch Ersetzen von Strukturteilen mit äquivalenten Randbedingungen. Einfluss auf den Berechnungsaufwand nimmt im geringeren Maße auch die Anzahl der Lastfälle, weshalb diese so niedrig wie möglich gehalten werden sollen. Der hohe Rechenaufwand und die Komplexität können unter Umständen auch zu Instabilitäten bei der Optimierung führen, auch aus diesem Grund ist eine kürzere bzw. simplere Berechnung von Vorteil.

Beim Berechnungsmodell sollten niemals Kräfte und Randbedingungen direkt an das Design-Volumen angebracht werden, stattdessen soll an den Schnittstellen ein Streifen von der Optimierung ausgenommen werden. Wenn dies nicht oder nur sehr schwer umsetzbar ist, so kann die Ergebnisqualität darunter leiden.

Ist die Berechnung abgeschlossen, sollte bei Verwendung von Dichtegradienten, wie bei der SIMP-Methode, die Ergebnisqualität überprüft werden. Dies geschieht bei den benutzten Programmen über einen Schieberegler, mit dem der Grenzwert der Dichte bestimmt werden kann, ab dem ein Element als massiv angenommen wird. Anstrebenswert ist ein möglichst geringes Ändern der Ergebnisform bei geringem Verschieben dieses Reglers, denn dies lässt auf die korrekte Bildung einer diskreten Form schließen. Verändert sich das Ergebnis jedoch stark, so sollten entweder die Ziele angepasst oder das Netz verfeinert werden.

5.3 Materialmodell für die Topologieoptimierung

Durch die simple isotrope Materialmodellierung für die Optimierung können nur E-Modul (E), Querdehnzahl (ν), Dichte (ρ) und zulässige Spannung / Fließgrenzspannung (σ_{yk}) bestimmt werden. Materialeigenschaften des Betons, der eine geringere Zugfestigkeit aufweist, oder des Stahlbetons, der bei Rissen an Steifigkeit verliert, können nicht berücksichtigt werden. Die verwendeten Materialien mit entsprechenden Kennwerten sind in *Tab. 2* aufgelistet.

Tab. 2 Verwendete Materialien

Material	E-Modul	Querdehnzahl	Dichte	Fließgrenzspannung
Beton 35/45	34.000 MPa	0,20	24,0 kN/m ³	35,0 MPa
Stahl 355	210.000 MPa	0,29	78,5 kN/m ³	355,0 MPa

5.4 Allgemeines zur praktischen Anwendung der Additiven Fertigung

Der verwendete Slicer *Cura* bietet viele Einstellungsmöglichkeiten, die Einfluss auf die Druckqualität haben oder sogar ein Bauteil erst druckbar machen können. Jedoch erfolgen diese Einstellungen ausschließlich manuell, es gibt keine Warnung sollte ein Volumen nicht druckbar sein. Als Konsequenz muss jedes Teil vor dem Drucken individuell untersucht werden. In der Praxis bedeutet dies ein schichtweises Kontrollieren in der Druckvorschau, eine Ansicht, die jeden Werkzeugpfad visuell darstellt. Dabei ist es vor allem wichtig, ungestützte und freischwebende Bereiche zu identifizieren und diese mit Hilfskonstruktionen zu unterstützen. Sind im Modell dünnere Wände als der Extrusionsdüsendurchmesser enthalten, so ist darauf zu achten, dass diese trotzdem gedruckt werden, um die Topologie der Geometrie konsistent zu halten. Andere Einstellungen wie beispielsweise Temperaturen, Geschwindigkeiten, Schichtdicke und Füllung müssen aus Erfahrung mit dem Drucker und eingesetzten Material möglichst optimal gewählt werden.

Die Fertigung der skalierten Modelle erfolgt in den nachfolgenden Beispielen mit dem FDM-Drucker *Creality Ender 3* in PLA Plastik. Der Bauraum des Druckers ist mit 22 x 22 x 25 cm begrenzt und auch die Druckgeschwindigkeit ist gering, wodurch nur kleine Modelle angefertigt werden können. Die Fähigkeit bis ca. 70° Überhänge zu drucken liegt in einem typischen Bereich für FDM-Drucker, auch wenn die Oberflächenqualität unter solch großen Überhängen leiden kann. Bei mehr als 70° werden Stützstrukturen benötigt, die als einziger Postprocessing Schritt nach dem Druck manuell entfernt werden müssen.

5.5 Ablauf der Topologieoptimierung und Additiven Fertigung

In *Abb. 24* soll ein Überblick der benötigten Arbeitsschritte und die entsprechend verwendeten Programme gegeben werden. Es handelt sich jedoch um einen idealisierten Ablauf, sollten größere Probleme an den Schnittstellen der Programme auftreten, so muss von dieser strikten Struktur abgewichen werden. Diese Komplikationen treten besonders häufig beim Postprocessing von komplexen STL-Dateien auf und können durch das Probieren mehrerer Ansätze oder Programme behoben werden. Dieser Workflow eignet sich nicht für jedes Beispiel, die einzelnen Schritte können jedoch einen Leitfaden bilden, auch wenn andere Software verwendet wird.

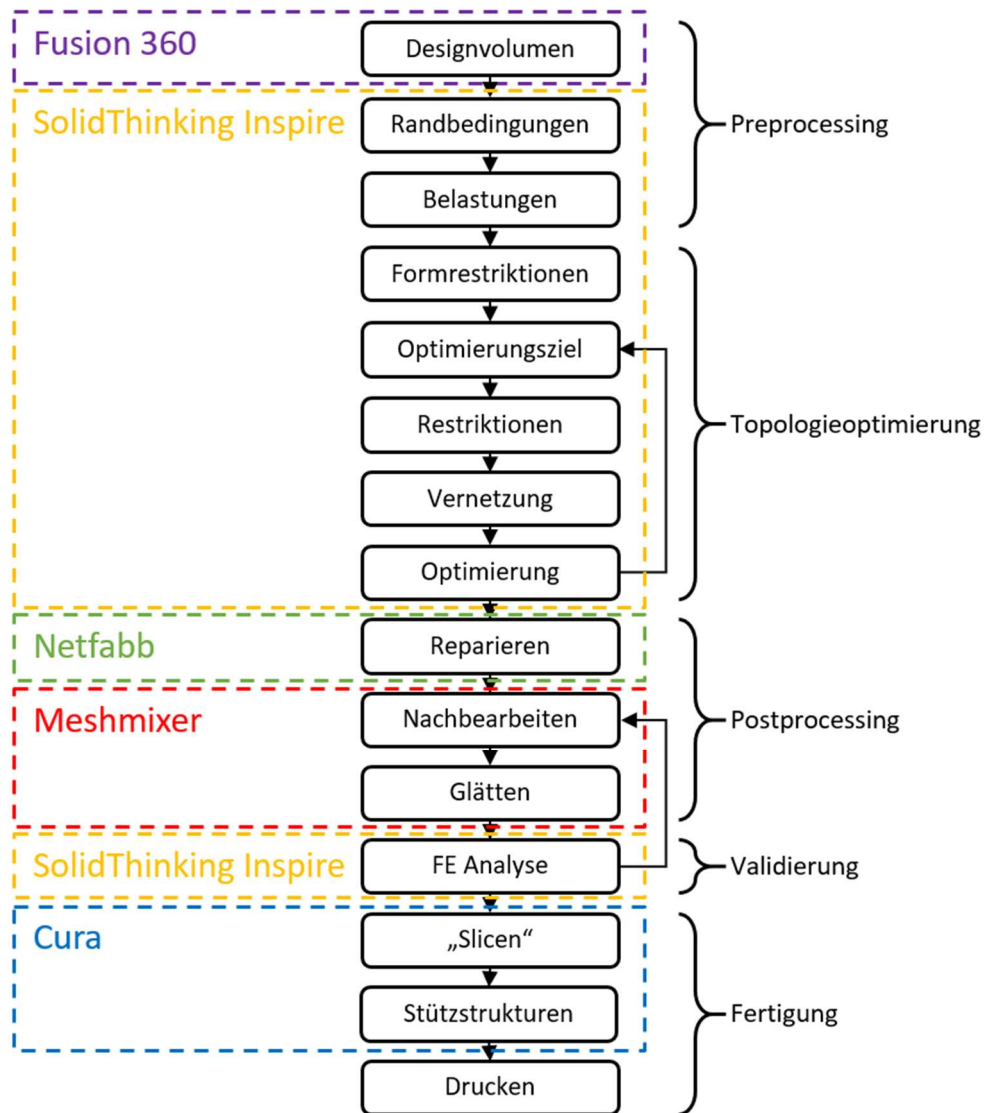


Abb. 24 Ablauf der Topologieoptimierung und Additiven Fertigung mit eingesetzter Software

5.6 Größenskala, Materialien und Fertigung im Bauwesen

Die Abb. 25 soll eine Übersicht der im Bauwesen möglichen Einsatzgebiete für die Topologieoptimierung und auch die Additive Fertigung aufzeigen. Je nach Größe wird zwischen der Optimierung einer gesamten Tragstruktur oder eines einzelnen Bauteils unterschieden. Den nach Größe sortierten Beispielen können auch Materialien und die Möglichkeit der Additiven Fertigung zugewiesen werden.

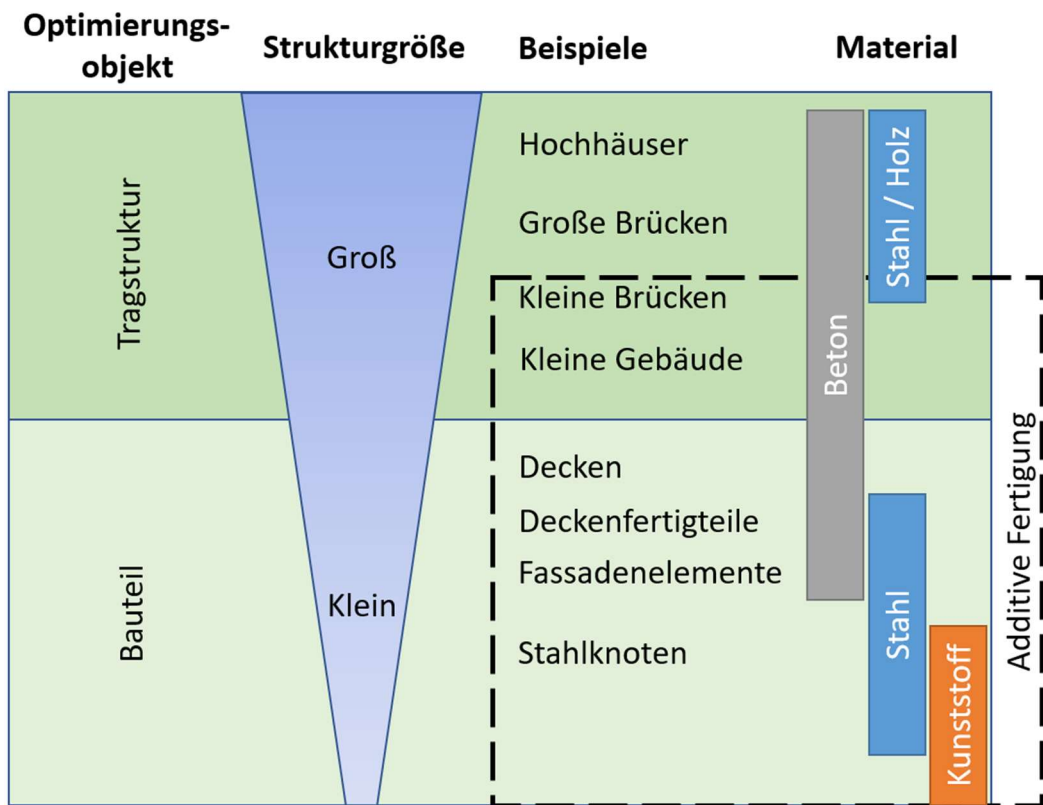


Abb. 25 Größenskala der Einsatzmöglichkeiten der Topologieoptimierung im Bauwesen

Aus den genannten Beispielen werden mit Brücken, Decken und Stahlknoten stark unterschiedliche ausgewählt und einer genaueren Untersuchung in den folgenden Kapiteln unterzogen. Die drei gewählten Anwendungsbeispiele decken somit ein breites Größenspektrum ab und mit Beton und Stahl sind auch zwei wichtige Materialien vertreten.

6 Anwendungsbereich Brücken

Brücken stellen im Bauwesen eine klassische Ingenieursaufgabe dar. Sie sind im Laufe der Geschichte genauestens untersucht und weiterentwickelt worden, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass sie von Material, Struktur und Herstellung ausgereift sind. Sie bieten daher eine sehr gute Referenz, um neue Methoden wie die Topologieoptimierung und den 3D-Druck zu untersuchen.

Brücken weisen meist klar definierte Belastungen und Lagerbedingungen auf, wodurch sie sich besonders für die Optimierung eignen. Diese klare und gleichzeitig oft simple Definition von Randbedingungen und Lasten ermöglicht weiters eine intuitive Abschätzung der optimalen Struktur (Bogen/Fachwerk), wodurch die Ergebnisse einfach verifizierbar sind.

6.1 Abmessungen und Randbedingungen

Die untersuchte Beispielbrücke soll realitätsnah sein, um daraus eine sinnhafte Evaluierung der Optimierung und Fertigung ableiten zu können. Dabei soll die Größe der Brücke so gewählt sein, dass die Optimierung noch mit einem durchschnittlichen Rechner durchgeführt werden kann. Dies ist bei der gewählten Spannweite von 15 m, Höhe von 3 m und relativ geringen Breite von 5,5 m gewährleistet.

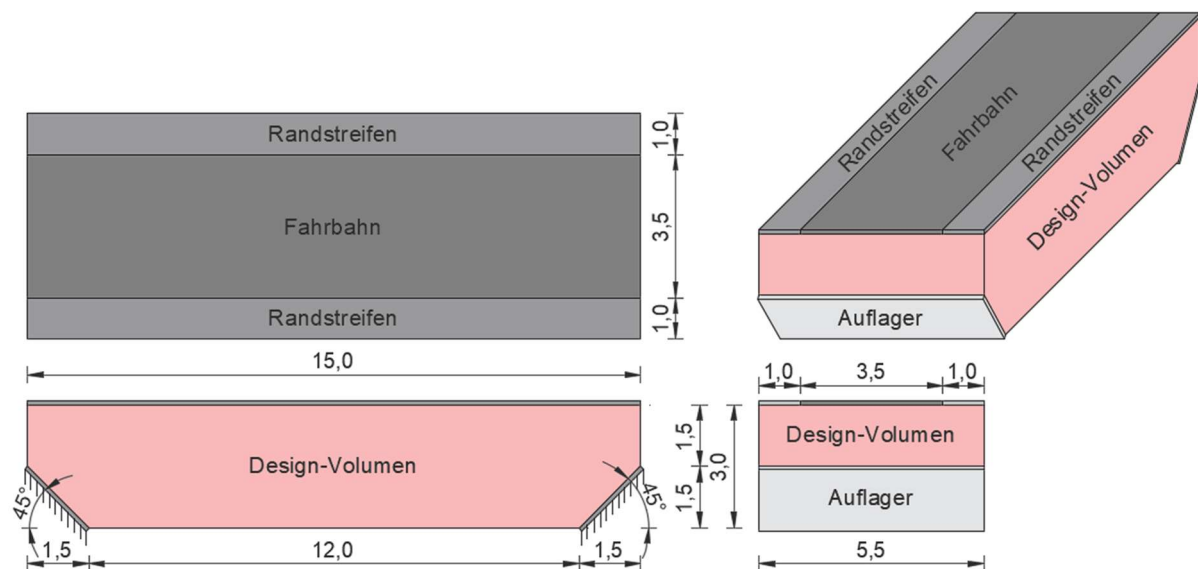


Abb. 26 Abmessungen der untersuchten Brücke (Design-Volumen) (links oben: Draufsicht, rechts oben: Isometrie, links unten: Seitenansicht längs, rechts unten: Seitenansicht quer)

In *Abb. 26* ist neben den genauen Abmessungen der Brücke auch der einzelne Fahrstreifen von 3,5 m Breite zu sehen, an dem je Seite ein 1 m breiter Randstreifen angrenzt. Die Lagerung der Brücke erfolgt durch fest eingespannte und um 45° geneigte Platten. Diese

wurden gewählt, um Spannungsspitzen möglichst zu vermeiden, die durch eine Stab- bzw. Punktlagerung im FE-Modell auftreten würden. Ebenso wird der Optimierung so ermöglicht, selbst die optimale Position der Fundamente zu bestimmen.

Diese Lager, zusammen mit der 10 cm starken Deckplatte, fließen mit ihrer Steifigkeit in die Berechnung ein, sind aber von dem für die Topologieoptimierung zur Verfügung stehenden Volumen ausgenommen. Dieses Optimierungsvolumen wird als Design-Volumen bezeichnet.

6.2 Lasten

Die Lasten sollen einer einfachen einspurigen Straßenbrücke in Österreich entsprechen. Dies bedeutet realitätsnahe Eigenlasten und Verkehrslasten; auf Einwirkungen von Temperatur, Wind, Erdbeben und jeglichen Horizontallasten wird verzichtet.

Teilsicherheitsbeiwerte

Tab. 3 Teilsicherheitswerte [46]

Ständige Einwirkungen		Veränderliche Einwirkung	
Ungünstig $\gamma_{G,j,sup}$	Günstig $\gamma_{G,j,inf}$	Ungünstig $\gamma_{Q,i,sup}$	Günstig $\gamma_{Q,i,inf}$
1,35	1	1,5	0

Eigengewicht

Das Stahlbetongewicht ($24,0 \text{ kN/m}^3$) wird in der FE-Software je nach eingesetztem Querschnitt automatisch verrechnet. Für den Fahrbahnaufbau wird eine charakteristische Flächenlast von $14,4 \text{ kN/m}^2$ angesetzt, multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert (*Tab. 3*) ergibt sich eine Last von $19,44 \text{ kN/m}^2$.

Nutzlast

Für die Optimierung wird vereinfacht das in ÖNORM EN 1991-2 [47] und ÖNORM B 1991-2 [48] beschriebene Lastmodell 1 verwendet. Es setzt sich zusammen aus Flächenlasten und punktförmigen Achslasten, die je nach Anzahl der Fahrstreifen abgestuft werden, siehe *Tab. 4*.

Tab. 4 Nutzlasten nach Lastmodell 1 [49]

	Achslast (Stützweite ≥ 10 m, $\alpha_Q = 0,8$) Q_{ik} [kN]	Gleichmäßig verteilte Last q_{ik} [kN/m ²]
Fahstreifen 1	480	9,0
Fahstreifen 2	320	2,5
Fahstreifen 3	160	2,5
Andere Fahstreifen	0	2,5
Verbleibende Restfläche Q_{rk}	0	2,5

Da es sich beim untersuchten Beispiel nur um eine einspurige Brücke handelt, sind nur die Werte für den Fahstreifen 1 ausschlaggebend. Für diesen ist eine gleichmäßig verteilte Last q_{ik} von 9,0 kN/m² (q_{1d} 13,5 kN/m²) anzusetzen. Diese Flächenlast wird mit der in ihrer Position veränderlichen Achslast kombiniert, diese beträgt 480 kN/m² (Q_{1d} 720 kN) für Brücken mit einer Spannweite von über 10 m und einem nach Norm bestimmten Faktor α_Q von 0,8. Die verbleibenden Restflächen der Brücke werden mit einer gleichmäßig verteilten Last Q_{rk} von 2,5 kN/m² (Q_{rd} =3,75 kN/m²) belastet.

Für die Berechnungen wird die Achslast als verteilte Flächenlast an 50 cm breiten Streifen auf gesamter Breite der Fahrbahn angesetzt. Diese Streifen werden alle 50 cm auf der halben Brücke angebracht, durch Symmetriebedingungen in der Berechnung wird garantiert, dass auch die andere Hälfte der Brücke diesen Belastungen standhalten kann. Jeweils nur eine Achslast wird mit den anderen Flächenlasten kombiniert, dies führt zu 14 Lastfällen, die für die Optimierung relevant sind.

6.3 2D-Brücke

Die zweidimensionale Optimierung einer Brücke stellt für die Topologieoptimierung eines der typischen und gleichzeitig simpelsten Beispiele dar. Der Verzicht auf die dritte Dimension ermöglicht eine relativ hohe Netzfeinheit, bei gleichzeitig gering bleibendem Berechnungsaufwand. Auch die Komplexität der resultierenden Geometrie sollte sich bei richtiger Wahl der Elementgröße in Grenzen halten.

6.3.1 Modellierung und Optimierung

Die verwendete Optimierungssoftware *solidThinking Inspire* ist nicht für zweidimensionale Berechnungen ausgelegt. Aus diesem Grund wird ein schmaler, 10 cm breiter, Streifen für die Simulation herangezogen, wie in *Abb. 27* ersichtlich. Dies soll eine 2D Berechnung approximieren, jedoch unter einem etwas erhöhten Rechenaufwand. Die Breite von 10 cm wird gewählt, da sie in etwa der durchschnittlichen Elementgröße der FE-Simulation entspricht.

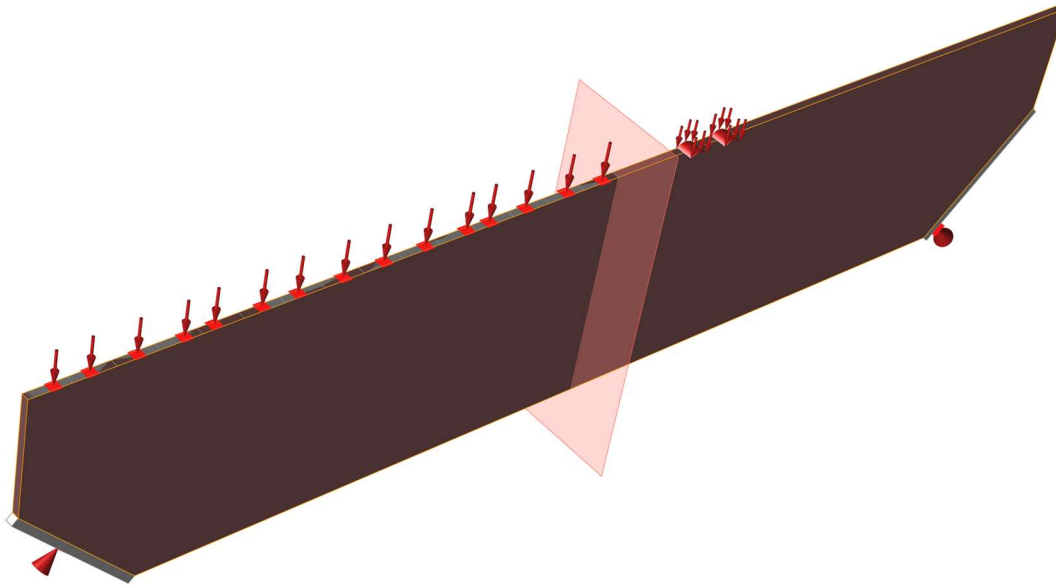


Abb. 27 Berechnungsmodell 2D-Brücke in solidThinking Inspire

Als Optimierungsziel wird die Maximierung der Steifigkeit gewählt, Spannungsrestriktionen werden keine festgelegt. Das Design-Volumen soll auf einen bestimmten Prozentsatz der ursprünglichen Masse reduziert werden, darauf wird unter *6.3.2 Optimierungsergebnisse* genauer eingegangen. Um die Optimierung realitätsnah zu halten, müssen alle Lastfälle berücksichtigt werden, sowie eine Symmetrieebene in der Mitte der Brücke angebracht werden, sodass die berechnete Form diese Symmetrie widerspiegelt. Zu feine Strukturen sollen durch die in der Software vorgegebene Mindestdicke von 20 cm unterbunden werden.

6.3.2 Optimierungsergebnisse

Durch das Probieren verschiedener Prozentsätze der Restmasse kann der sinnvollste ermittelt werden. Ziel ist ein möglichst kleiner Wert, bei dem sich noch eine klare Struktur ausbilden kann; für dieses Beispiel liegt dieser bei ca. 20 %. Die dadurch erhaltene optimierte Form entspricht einer Bogenbrücke und ist auf *Abb. 28* dargestellt.

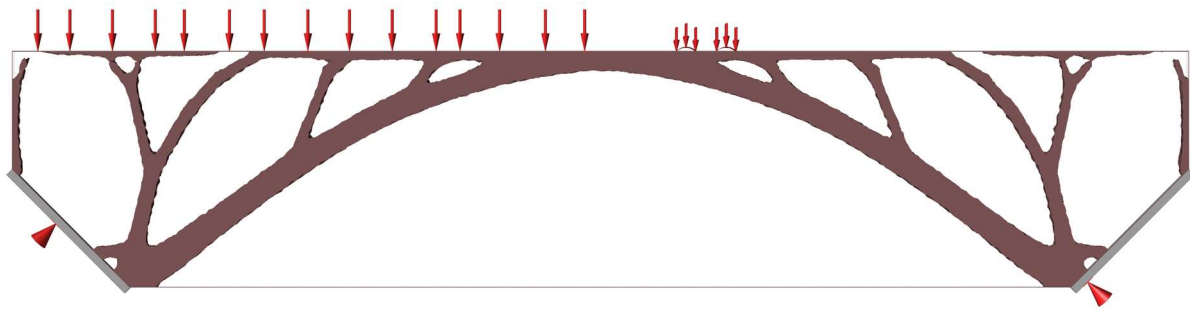


Abb. 28 Unbearbeitete optimierte Form (Steifigkeit maximieren, 20 % Restvolumen)

Es kann beobachtet werden, dass die Last der Fahrbahn in gleichmäßigen Abständen durch Stützen auf den Bogen bzw. in die Auflagern abgeleitet wird. Die Fahrbahnplatte wird nur geringfügig verstärkt und dies vor allem zur Mitte der Brücke hin. Ansonsten sind auch die zum Teil gebogenen Strukturen auffällig, so dass insgesamt der Eindruck einer bionischen Tragstruktur entsteht. Der Bogen schließt an den inneren Rändern der Auflagern an, um den Kraftweg und die Spannweite so kurz wie möglich zu halten. Etwa ein Drittel des Bogens ragt deshalb sogar über das Lager hinaus. Dies tritt ein, da die Spannung bei der Optimierung vernachlässigt wurde und die kürzere Spannweite mehr zur Gesamtsteifigkeit beiträgt als der verhältnismäßig kleine Auflagerbereich.

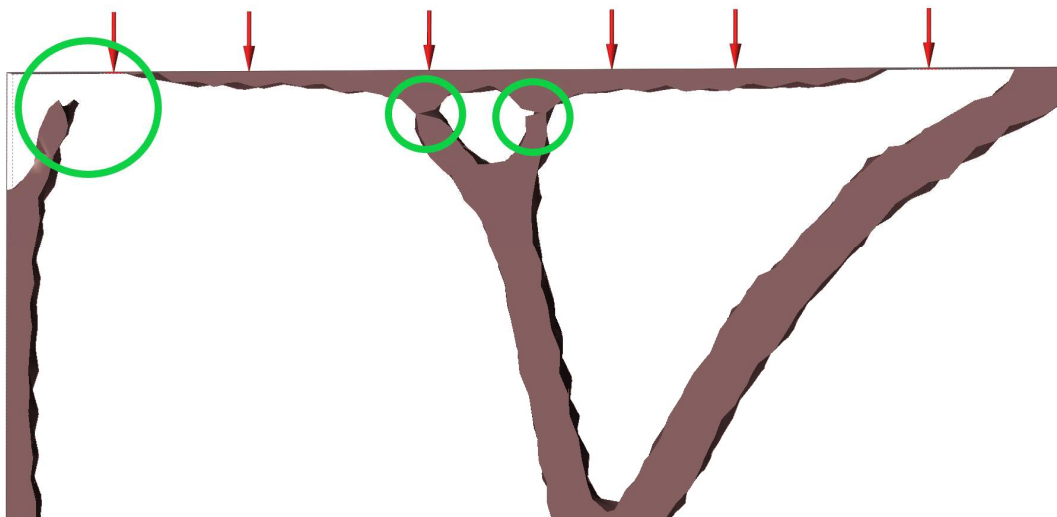


Abb. 29 Unstetigkeitsstellen (grüne Kreise)

Das erhaltene Optimierungsergebnis ist nicht an allen Stellen kraftschlüssig verbunden, wie in *Abb. 29* ersichtlich. Die errechnete Dichte hat in diesem Bereich nicht den Schwellenwert überwunden, wodurch diese Elemente im Ergebnis unterdrückt werden. Dies hat zur Folge, dass die optimierte Geometrie überarbeitet werden muss.

6.3.3 Postprocessing

Um das Optimierungsergebnis evaluieren und produktionsfähig zu machen, muss es in einem weiteren Schritt angepasst werden. Die bereits angesprochenen Unstetigkeitsstellen und die raue Oberfläche müssen ausgebessert werden. In diesem Fall erfolgt die Überarbeitung manuell. In einem ersten Schritt als reine Nachzeichnung der Geometrie mit Ausbesserung der Unstetigkeitsstellen, siehe *Abb. 30*. In einem weiterführenden Schritt die Abänderung der Geometrie, sodass sie aus Ingenieurssicht sinnvoller erscheint und auch mit herkömmlichen Methoden errichtet werden könnte. Dafür werden gebogene Strukturen begradigt, Querschnitte einheitlich gewählt und der Bogen etwas aufgeweitet, sodass er vollkommen auf den Lagern aufliegt. Diese Überarbeitung ist in *Abb. 31* dargestellt.

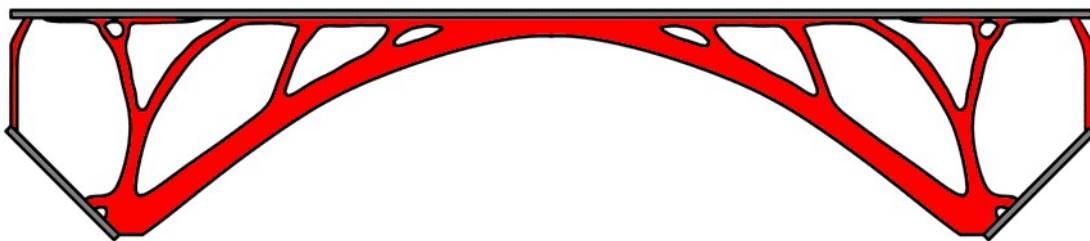


Abb. 30 Optimierte Form nachgezeichnet

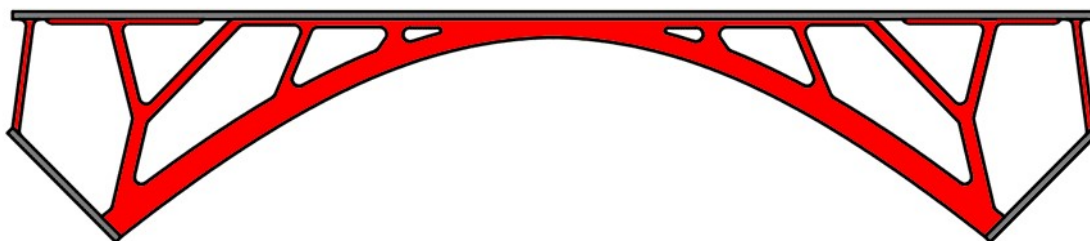


Abb. 31 Optimiertes Volumen manuell überarbeitet

Das Postprocessing bringt eine Veränderung der Masse und Steifigkeit mit sich, wie sich dies qualitativ auf die Tragstruktur auswirkt ist unter *6.3.5 Variantenvergleich* nachzulesen.

6.3.4 Validierung

Um die optimierte Form und deren überarbeitete Varianten vergleichen zu können, müssen objektive Kennwerte herangezogen werden. Für eine Brücke eignet sich hierfür besonders die maximale Durchbiegung. Die Berechnung erfolgt ebenso wie bereits die Optimierung in *solidThinking Inspire*. Alle Randbedingungen und Belastungen bleiben unverändert und werden berücksichtigt. Nachfolgend werden die maximalen lokalen Verformungen als

Ergebniskombination aufgezeigt, dies führt in der Darstellung teilweise zu knicken, da Verformungsfiguren aus den verschiedenen Lastfällen gleichzeitig abgebildet werden:

Nicht bearbeitete Form

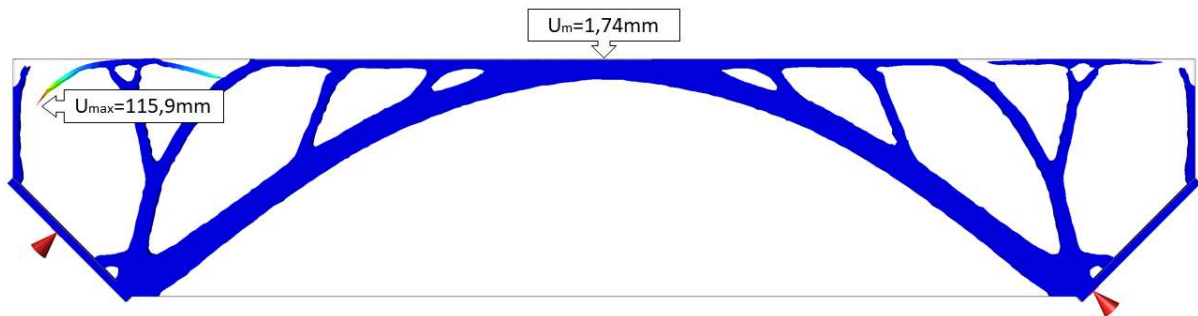


Abb. 32 Verformung der optimierten Form, nicht bearbeitet (5x Überhöhung)

In Abb. 32 ist klar zu erkennen, dass die nicht bearbeitete Form sich in einigen Orten nicht eignet die auftretenden Kräfte zu tragen. Verformungen am Rand der Brücke sind aufgrund der fehlenden Kraftschlüssigkeit mit ca. 12 cm enorm. In der Brückenmitte halten sie sich jedoch mit 1,74 mm in Grenzen.

Manuell nachgezeichnete Form

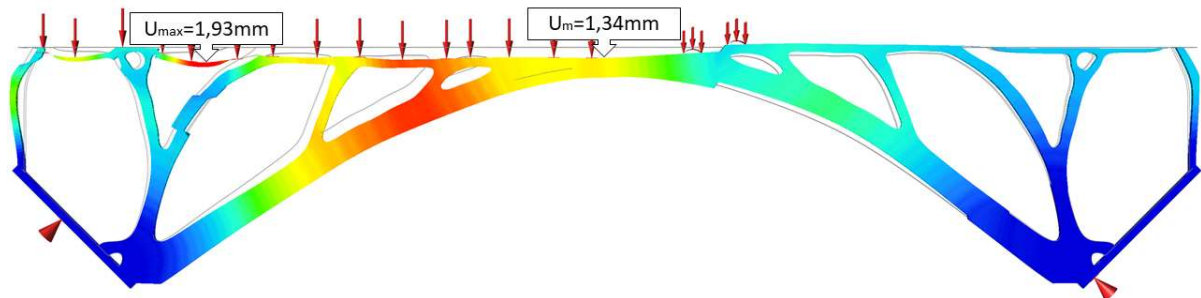


Abb. 33 Verformung der optimierten Form, manuell nachgezeichnet (100x Überhöhung)

Die Probleme der nicht bearbeiteten Form können mit der manuellen Ausbesserung umgangen werden. Somit liegt die maximale Verschiebung bei 1,93 mm an der Fahrbahnplatte und 1,34 mm in der Brückenmitte (Siehe Abb. 33).

Manuell überarbeitete Form

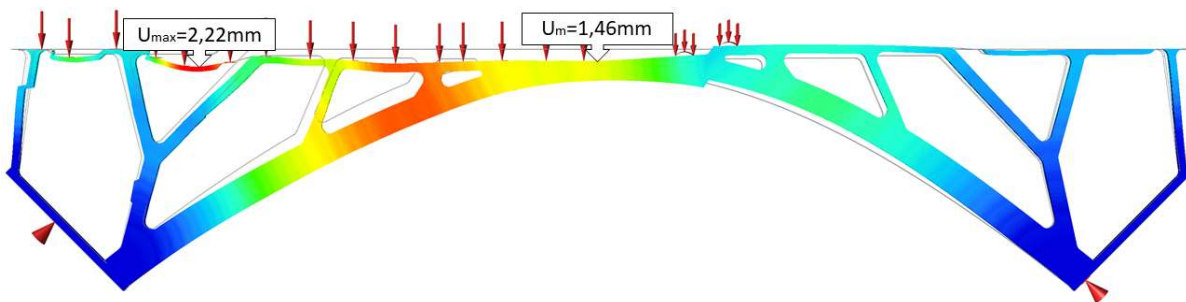


Abb. 34 Verformung der optimierten Form, manuell überarbeitet (100x Überhöhung)

Die weitere Überarbeitung führt zu geringen Änderungen der Verformungsfigur in *Abb. 34*. Die maximale Durchbiegung steigt mit 2,22 mm leicht an, ebenso erhöht sich die Verschiebung in Brückenmitte durch den etwas flacheren Bogen auf 1,46 mm.

6.3.5 Variantenvergleich

Als Vergleichskriterium wird die errechnete maximale Verschiebung in der Brückenmitte herangezogen, dies soll die Gesamtsteifigkeit der Brücke repräsentieren. Um den Vergleich möglichst objektiv zu gestalten, wurde die relative Leistungsfähigkeit, in Relation zur unveränderten optimierten Form, wie folgt bestimmt:

$$Relative\ Leistungsfähigkeit\ [\%] = \frac{Masse_{Referenz}}{Masse_i} * \frac{Verformung_{Referenz}}{Verformung_i}$$

Somit wird die Steifigkeit im Verhältnis zur Masse gewertet, der resultierende Vergleich ist in *Tab. 5* abgebildet.

Tab. 5 Variantenvergleich

	Masse [t/m]	Verformung Brückenmitte [mm]	Relative Leistungsfähigkeit
Optimiertes Oberflächen-Mesh aus Inspire	18,17 (100%)	1,74 (100%)	100%
Manuell nachgezeichnet	19,46 (107%)	1,34 (77%)	121%
Manuell überarbeitet	18,69 (103%)	1,46 (84%)	116%

Es zeigt sich, dass allein das Nachzeichnen die Steifigkeit im großen Maße verbessert. Selbst wenn man die Massenzunahme berücksichtigt. Zurückzuführen ist dieser Zuwachs der Steifigkeit vor allem auf das Glätten der Oberfläche, denn die vielen Einkerbungen in der unbearbeiteten Form stellen lokale Schwachstellen im Querschnitt dar, an denen es zu Spannungsspitzen kommt. Die komplett überarbeitete Brücke ist ebenso wesentlich besser als der unbearbeitete Optimierungoutput, jedoch schlechter als die nachgezeichnete Struktur.

6.3.6 Erkenntnisse

Wie zu Beginn des Kapitels angesprochen ist die Struktur von Brücken bereits sehr ausgereift, wodurch es Sinn macht, dass die optimierte Form einer typischen Bogenbrücke entspricht. Dies kann als Validierung für die Topologieoptimierung im Allgemeinen, den angewendeten Workflow, sowie für die eingesetzte Software angesehen werden. Es ermöglicht deshalb auch die Annahme, dass die erhaltenen Ergebnisse sinnvoll sind und dass sie nahe am Optimum liegen werden.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass sowohl die Optimierung selbst, wie auch das Postprocessing im zweidimensionalen Raum relativ schnell und einfach vonstattengehen. Auch die Berücksichtigung vieler Lastfälle sorgt zumindest mit der verwendeten Software (*solidThinking Inspire*) für wenig Mehraufwand und nur für eine geringfügige Steigerung des Rechenaufwandes.

Das wohl größte Problem der Methode in diesem Beispiel wird durch den Variantenvergleich offengelegt. Eine Nachbearbeitung des rohen Optimierungsergebnisses ist unabdingbar, nicht nur aus ästhetischen Gründen, sondern auch um das Maximum aus der Struktur herauszuholen und die Produktionsfähigkeit sicherzustellen.

6.4 3D-Brücke

Nachdem die Topologieoptimierung im Zweidimensionalen nahezu problemlos funktioniert und eine nicht zu komplexe Tragstruktur generiert, soll nun überprüft werden, inwieweit sich dies beim Wechsel in die dritte Dimension ändert.

6.4.1 Modellierung und Optimierung

Die Brücke wird in ihrer vollen Breite von 5,5 m modelliert, dies gilt für das Design-Volumen, für die Deckplatte von 10 cm und für die Auflagerplatten, die über die gesamte Breite verlaufen.

Die Belastung der Deckplatte erfolgt in ähnlichen 50 cm Streifen, wie bei der 2D-Brücke, jedoch erstrecken sich diese nur über die Ausmaße der Fahrbahn. An den Rändern bleiben die 1 m breiten Randstreifen mit wesentlich geringerer Belastung übrig.

Die Optimierung erfolgt wie bei der 2D-Brücke durch die Maximierung der Steifigkeit bei gleicher festgelegter Restmasse von 20 %. Auch in diesem Beispiel wird dafür keine Spannungsrestriktion vorgegeben und alle Lastfälle müssen berücksichtigt werden. Zur Symmetrieebene quer zur Brücke aus dem 2D-Beispiel wird eine weitere in Brückenlängsrichtung angesetzt, wie in *Abb. 35* dargestellt.

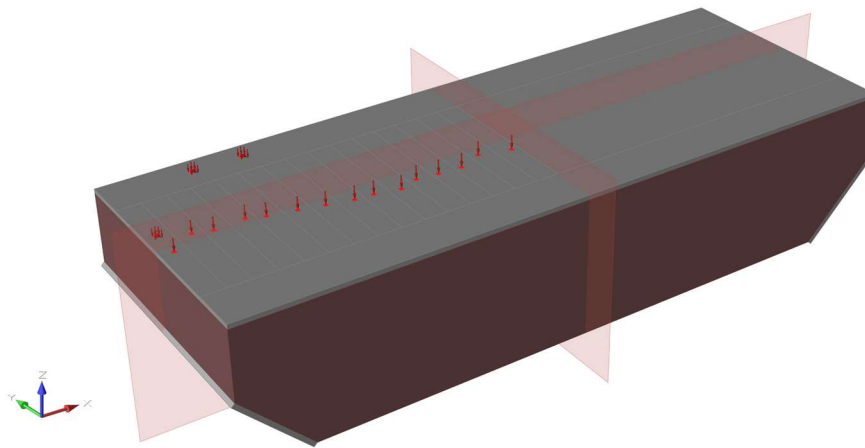


Abb. 35 Berechnungsmodell 3D-Brücke mit Lasten, Auflagern und Symmetriebedingungen

6.4.2 Optimierungsergebnisse

Wie in den nachfolgenden Abbildungen des Optimierungsergebnisses (*Abb. 36* bis *Abb. 39*) ersichtlich bildet sich im dreidimensionalen ebenso eine Bogenbrücke aus. Die generierte Geometrie wirkt sehr komplex, ähnelt jener der 2D-Brücke bei genauerer Betrachtung jedoch durchaus. Dies fällt besonders beim Betrachten von Längsschnitten auf. So ist der Bogen ebenso teilweise außerhalb vom Lager, die Abstützungen werden in etwa in den gleichen Lagen generiert und bilden sich zum Teil ebenso Y-förmig aus.

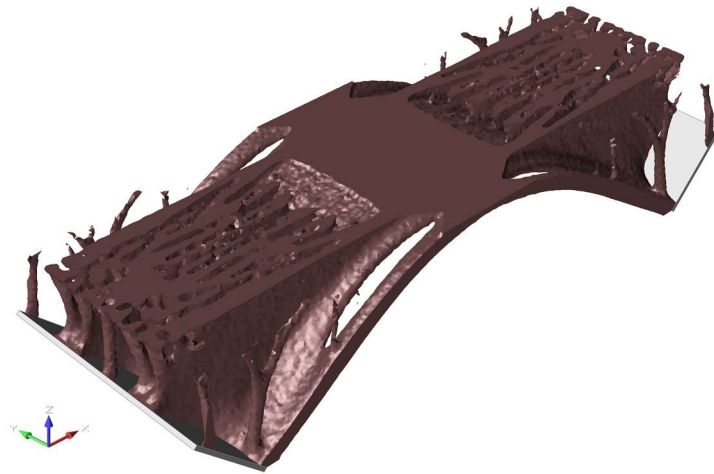


Abb. 36 3D-Brücke isometrische Perspektive (ohne Deckplatte)

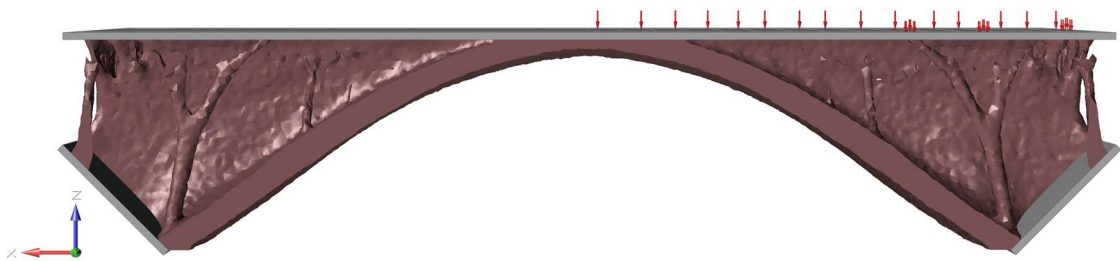


Abb. 37 3D-Brücke Ansicht Seite längs

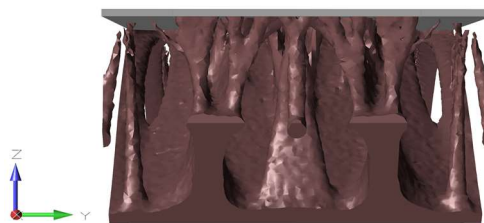


Abb. 38 3D-Brücke Ansicht quer (ohne Auflageplatte)

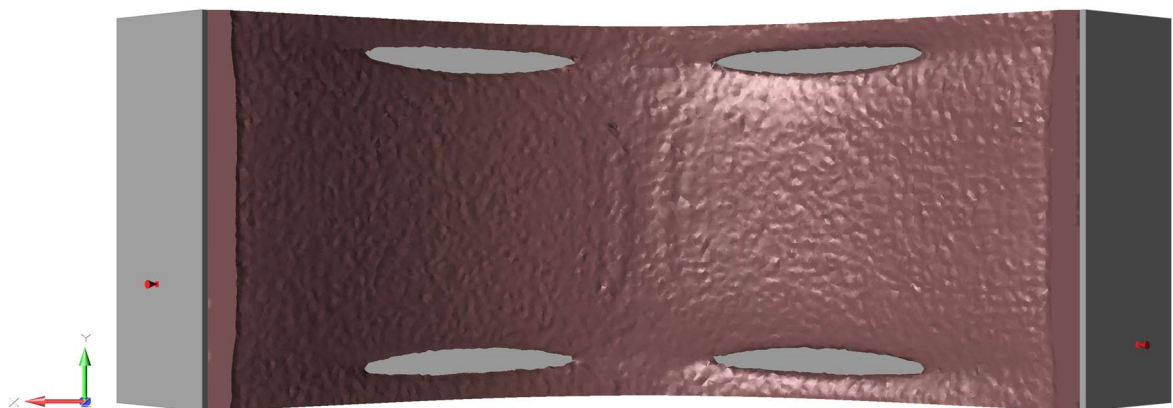


Abb. 39 3D-Brücke Ansicht unten

Erwartungsgemäß führen die weniger belasteten Randstreifen zu einer grazileren Struktur an den Außenseiten, wie in *Abb. 36* und *Abb. 40* ersichtlich ist. Die geringere Last reicht hier nicht aus, um kraftschlüssige Verbindungen herzustellen, zum Teil deutet sich die Struktur sogar nur an.

Bei Betrachtung des Ausschnitts der Brückenmitte in *Abb. 42* fällt wiederum die Ähnlichkeit mit der 2D-Brücke auf, die Strukturen sind lediglich dicker. Noch dicker sind die generierten Strukturen an den Rändern der stark belasteten Fahrbahn, wie in *Abb. 37* und *Abb. 41* zu sehen ist, bildet sich sogar eine Scheibe aus, die zusätzliche Steifigkeit beisteuert.



Abb. 40 3D-Brücke Schnitt Randstruktur (Grün = Schnittfläche)

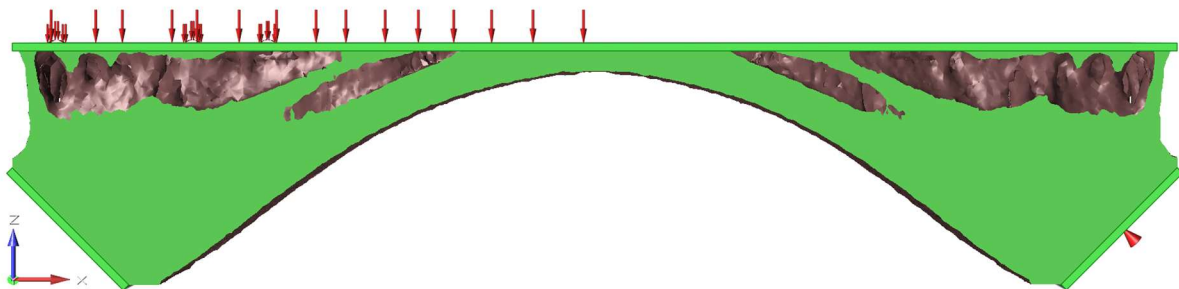


Abb. 41 3D-Brücke Schnitt Fahrbahnrand (Grün = Schnittfläche)

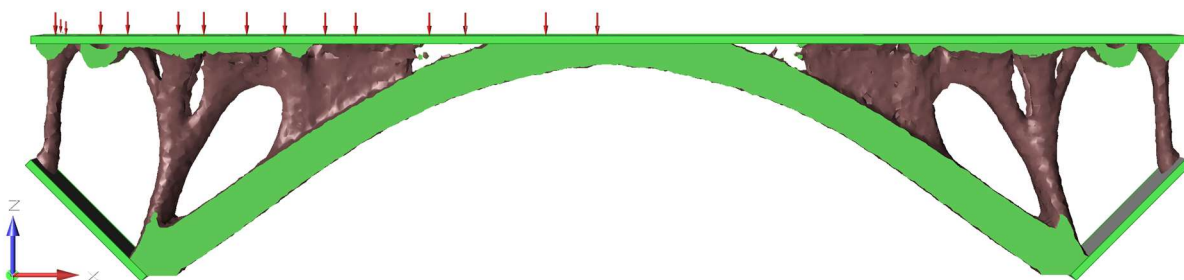


Abb. 42 3D-Brücke Schnitt Zentrum (Grün = Schnittfläche)

Durch diese Schnitte (*Abb. 40* bis *Abb. 42*) ist klar ersichtlich, dass die Lastabtragung längs erfolgt und in verschiedene Bereiche unterteilt werden kann: zwei filigrane Ränder, zwei Scheiben an den Fahrbahnrandern und die aufgelöste Mittelstruktur. Wie sich diese Strukturen über die Höhe verändern ist durch die horizontalen Schnitte in *Abb. 43* bis *Abb. 46* besser

einsehbar. In *Abb. 43* zeigen sich in Auflagernähe wenige, dafür massive Strukturelemente. Die scheibenartigen Ausprägungen sind gut zu erkennen, ebenso wie der Bogen, der sich aufgrund der geringeren Belastungen am Rand voneinander trennt, um Gewicht einzusparen. In den höher liegenden Schnitten von *Abb. 44* bis *Abb. 46* steigt die Komplexität mit der Höhe bzw. Nähe zur Deckplatte an. Dies geschieht, da sich die relativ dicken Strukturen aus *Abb. 43* verzweigen, um die dünne Fahrbahnplatte gleichmäßig zu stützen.

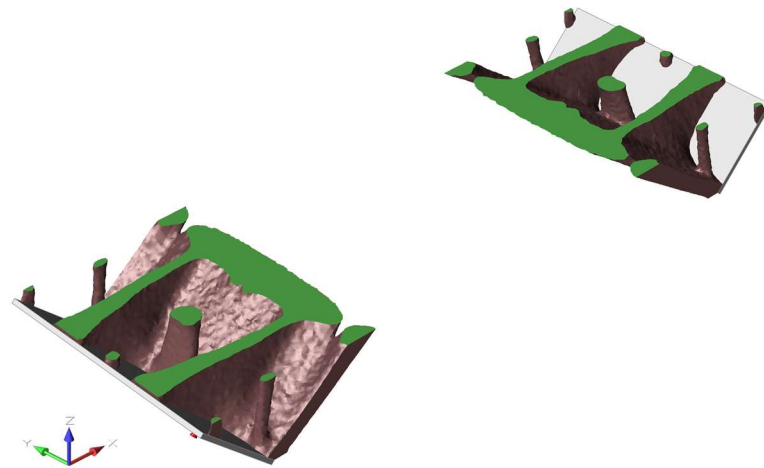


Abb. 43 3D-Brücke horizontaler Schnitt -1,5 m

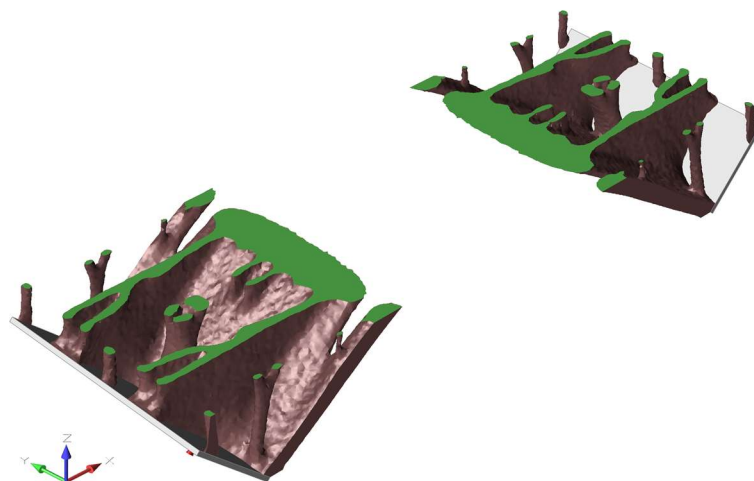


Abb. 44 3D-Brücke horizontaler Schnitt -1,0 m

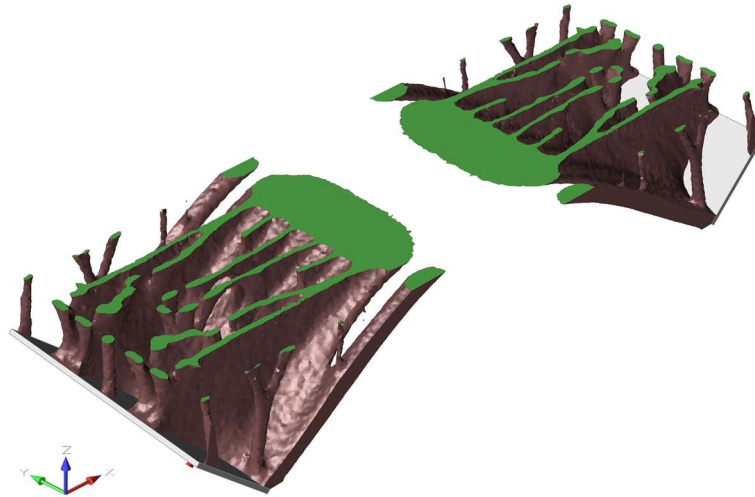


Abb. 45 3D-Brücke horizontaler Schnitt -0,5 m

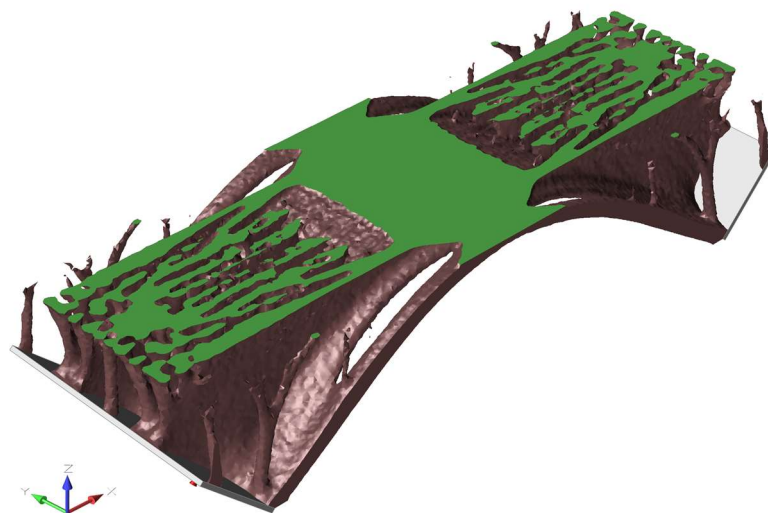


Abb. 46 3D-Brücke horizontaler Schnitt -0,1 m

Auf das Postprocessing und die Validierung wurde in diesem Beispiel verzichtet, da der enorme Aufwand einer manuellen Bearbeitung voraussichtlich wenig Mehrwert bieten würde. Es ist anzunehmen, dass ähnliche Verbesserungen wie bei der 2D-Brücke möglich sind, diese jedoch keine neuen Erkenntnisse bringen würden.

6.4.3 Erkenntnisse

Der Schritt in die dritte Dimension bringt für die anfängliche Modellierung nur einen unwesentlichen Mehraufwand. Dies kann jedoch nicht auf die Optimierung selbst und die weitere Verarbeitung des erhaltenen Volumenkörpers übertragen werden. Allein die Dauer des

Optimierungsprozesses steigt von wenigen Minuten auf mehrere Stunden. Das iterative Finden der idealen Optimierungsparameter wird dadurch wesentlich erschwert, wobei Erfahrung mit der Methode vorteilhaft ist. Das Vorhandensein von unterschiedlich stark belasteten Regionen zeigt ein weiteres Problem der Topologieoptimierung auf, denn die Strukturen in diesen Bereichen können nicht immer kraftschlüssig verbunden werden. Dies könnte durch ein feineres FE-Netz gelöst werden, dies führt jedoch zu noch längeren Berechnungszeiten und zu noch größerer Komplexität des generierten Volumens.

Das manuelle Bearbeiten des Optimierungsergebnisses ist um ein Vielfaches schwerer und zeitaufwendiger als im zweidimensionalen Raum. Eine Errichtung mit traditionellen Methoden scheint hingegen sogar unmöglich, wodurch neue Fertigungsweisen wie der 3D-Druck in Betracht gezogen werden müssen. Es lässt sich allgemein festhalten, dass trotz der auftretenden Probleme das Optimierungsergebnis statisch sinnvoll ist und der Vergleich mit den 2D-Ergebnissen schlüssig erscheint.

6.5 Erkenntnisse für den Anwendungsbereich Brücken

Auch wenn die untersuchten Beispiele nur auf eine Brückenart eingehen, können daraus trotzdem Rückschlüsse auf den gesamten Brückenbausektor geschlossen werden. So lässt sich festhalten, dass die generierten Strukturen den konventionellen sehr ähneln, denn die meist entstehenden Bögen und Fachwerke sind, wie unter *2.4.5 Formfindung* und *2.4.6 Fachwerke* erläutert, bereits stark optimierte Tragwerke und lassen sich einfach parametrisch optimieren.

Das für Brücken typischerweise besonders große Design-Volumen führt zu langen Berechnungszeiten und verhindert ein Einsetzen von Materialien wie Holz oder Stahl, die in dieser Größenordnung meist nur als Stäbe oder Balken in Frage kommen. Von den klassischen Baustoffen bleibt nur Beton übrig, dieser ist jedoch durch seine geringe Zugfestigkeit nicht ideal für die Topologieoptimierung, da in nahezu keiner Implementierung auf diese Diskrepanz zwischen Zug- und Druckfestigkeit Rücksicht genommen wird. Die Tragfestigkeit der eingesetzten Materialien beeinflusst auch die Größe der finiten Elemente, je starrer bzw. belastbarer, desto kleiner müssen die Elemente werden, um ein sinnvolles Ergebnis zu erhalten, was wiederum bei großen Design-Volumen zu stark ansteigenden Rechenzeiten führt, oder die Optimierung sogar unmöglich macht.

Die Größe von Brücken, zusammen mit ihren meist ungünstigen Standorten, führen zu weiteren Problemen bei der Errichtung. Aus diesen Gründen stoßen auch flexible Methoden wie der 3D-Druck bei Brücken an ihre Grenzen. Andere Varianten, den Bau hochgradig

optimierter Brücken mit komplexen Geometrien kostengünstig und ressourcenschonend zu ermöglichen, sind derzeit nicht absehbar.

In Kombination führen diese Erkenntnisse zum Schluss, dass die Topologieoptimierung im Bereich des Brückenbaus nur begrenzt sinnvollen Einsatz finden kann. Sie könnte als Inspirationsquelle für einen ersten Entwurf dienen, eine direkte Umsetzung der generierten Form scheint unrealistisch.

7 Anwendungsbereich Decken

Die Anzahl der jährlich errichteten Decken ist enorm und verschlingt deshalb große Mengen an Ressourcen wie Beton und sorgt dadurch auch für eine erhöhte Umweltbelastung. Ein möglichst optimaler und reduzierter Materialeinsatz sollte deshalb aus Kosten- und Umweltschutzgründen angestrebt werden. Inwiefern die Topologieoptimierung und Additive Fertigung dazu beitragen können, soll in diesem Kapitel untersucht werden.

Decken vertreten in den betrachteten Beispielen mittelgroße Optimierungsstrukturen. Die geringe Bauhöhe von Decken könnte sich jedoch auf den Optimierungsvorgang und die erzielten Resultate auswirken. Dies wird in diesem Kapitel an Hand von einigen Deckenbeispielen untersucht.

7.1 Abmessungen und Randbedingungen

Für die Evaluierung des Anwendungsbereichs der Decken werden Wand- und Stützenlagerungen bei unterschiedlicher Deckendicke untersucht. Die Decken werden in einem Raster von 6 x 6 m gelagert und als unendlich in alle Richtungen angenommen. Es werden drei verschiedene Decken ausgearbeitet, die sich in ihrer Lagerung oder in ihrer Bauhöhe unterscheiden:

- 4) 40 cm Decke auf Stützen (*Abb. 47 links*): Besitzt eine Dicke von maximal 40 cm und wird an den Rasterschnittpunkten von quadratischen Stützen mit einer Breite von 40 cm gehalten.
- 5) 80 cm Decke auf Stützen: Sie unterscheidet sich durch die größere Dicke von maximal 80 cm, womit dem Optimierungsverfahren größere Spielräume ermöglicht werden als bei den dünneren 40 cm dicken Decken.
- 6) 40 cm Decke auf Wänden (*Abb. 47 rechts*): Eine Decke mit maximal 40 cm Höhe, die von 30 cm breiten Wänden über das gesamte Raster gestützt ist.

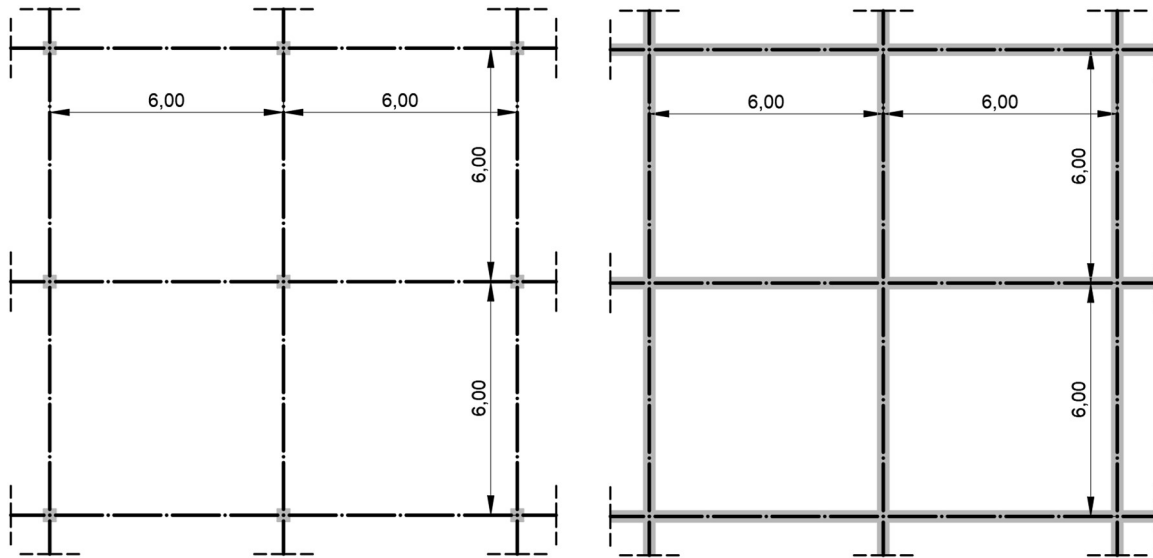


Abb. 47 Grundrisse der untersuchten Decken. Links: Lagerung durch Stützen, rechts: Lagerung durch Wände

7.2 Lasten

Die Lasten sollen einem typischen Bürogebäude in Österreich entsprechen. Auf feldweises Ansetzen der Nutzlast wird verzichtet, um die Berechnung so einfach wie möglich zu halten.

Eigengewicht

Das Stahlbetongewicht ($24,0 \text{ kN/m}^3$) wird in der FE-Software je nach eingesetztem Querschnitt automatisch verrechnet. Für den Bodenaufbau wird vereinfacht eine charakteristische Flächenlast von $3,3 \text{ kN/m}^2$ angesetzt, multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert ($\gamma_{G,j,\text{sup}} = 1,35$) ergibt sich eine Bemessungslast von $4,46 \text{ kN/m}^2$.

Nutzlast

Die Nutzlast wird nach ÖNORM EN 1991-1-1 [50] und ÖNORM B 1991-1-1 [51] für *Nutzungskategorie B2: Büroräume in Bürogebäuden* mit $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$ festgelegt, multipliziert mit dem Teilsicherheitsfaktor ($\gamma_{Q,i,\text{sup}} = 1,5$) ergibt sich eine Bemessungslast von $4,5 \text{ kN/m}^2$.

7.3 Modellierung und Optimierung

Für die Optimierung wird jeweils der in *Abb. 48* dargestellte quadratische Ausschnitt mit $3 \times 3 \text{ m}$ herangezogen, dies entspricht jeweils dem halben Rasterabstand. Somit kann ein

Großteil der Berechnungszeit eingespart werden. Ersetzt wird der Rest der Decke durch Auflagerbedingungen, die für die angesetzte Volllast auf alle Deckenfelder, als äquivalent anzusehen sind. Die Verdrehung und horizontale Verschiebung wird so an allen Seiten unterbunden, die vertikale Verschiebung hingegen wird an den freien Enden zugelassen. Dieses statische Ersatzsystem ist in *Abb. 48* verdeutlicht.

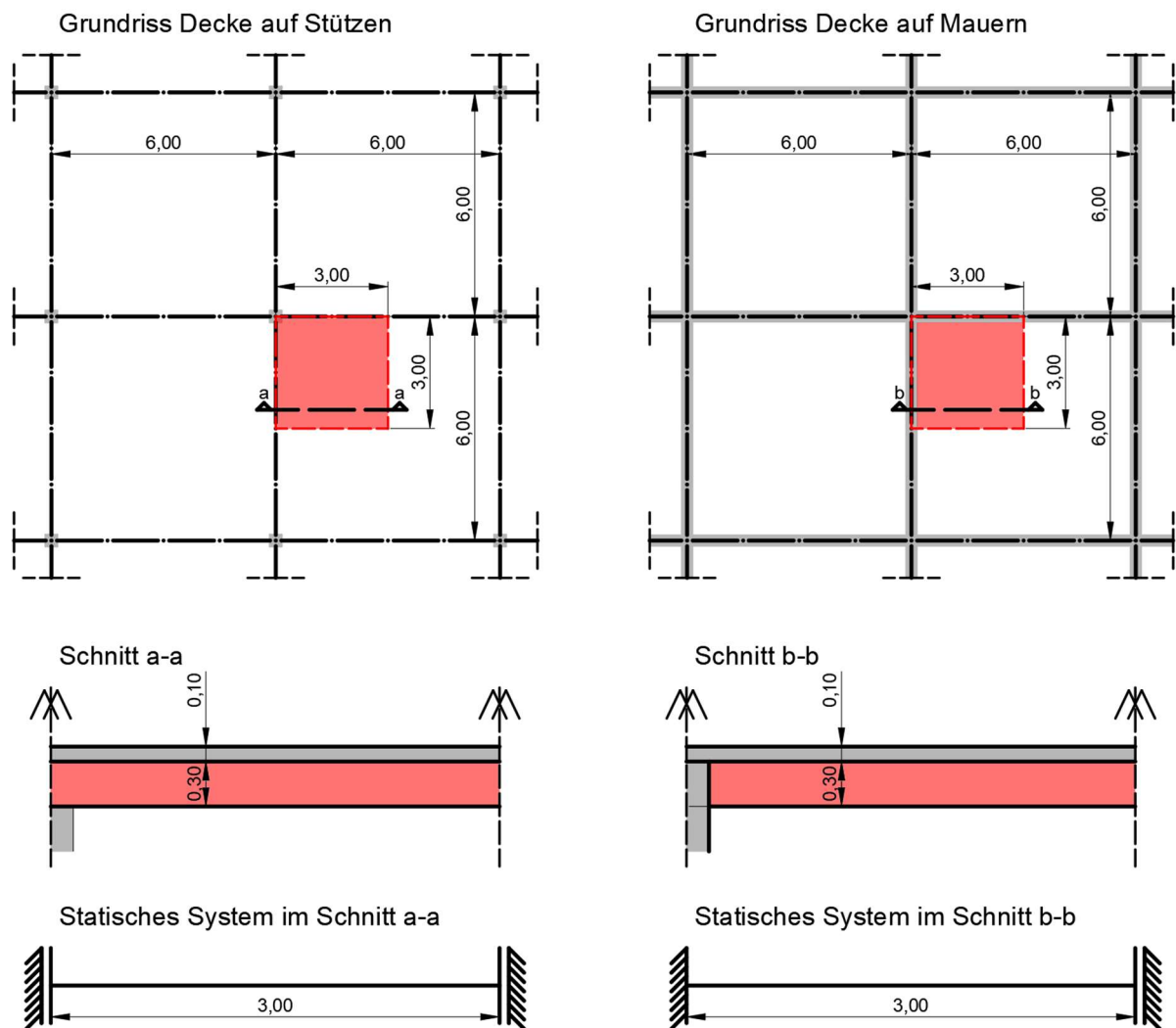


Abb. 48 Untersuchte Decken im Grundriss und Schnitt, sowie entsprechendes statisches System. Das Design-Volumen ist mit Rot gekennzeichnet.

Für alle untersuchten Varianten wird eine 10 cm dicke und statisch wirksame Deckplatte von der Optimierung ausgenommen. Dies soll zu einem besseren Optimierungsergebnis führen, denn wie unter 5.2 erwähnt sollen Kräfte nur an nicht zu optimierenden Volumen angesetzt werden. Ebenso wird durch diese Deckplatte eine gewisse Grundsteifigkeit garantiert, die starke lokale Durchbiegungen verhindern soll. Für die Decke auf Wänden wird zusätzlich der

Bereich über der Wand von der Optimierung ausgeschlossen, um den Raumabschluss zu gewährleisten und um das Ausbilden eines konstruktiven Deckenkranzes zu ermöglichen. Die Optimierung wird für diese Beispiele mit zwei verschiedenen Programmen durchgeführt, *solidThinking Inspire* und *Fusion 360*, dies soll Einsicht in potenzielle Abweichungen und die Abhängigkeit von der eingesetzten Software für das Optimierungsergebnis geben. Die Optimierungsparameter sind deshalb für beide Programme identisch, mit dem Optimierungsziel einer möglichst hohen Steifigkeit, bei einer Restmasse von 25 % und unter Berücksichtigung einer diagonalen Symmetrieebene, wie in *Abb. 49* dargestellt.

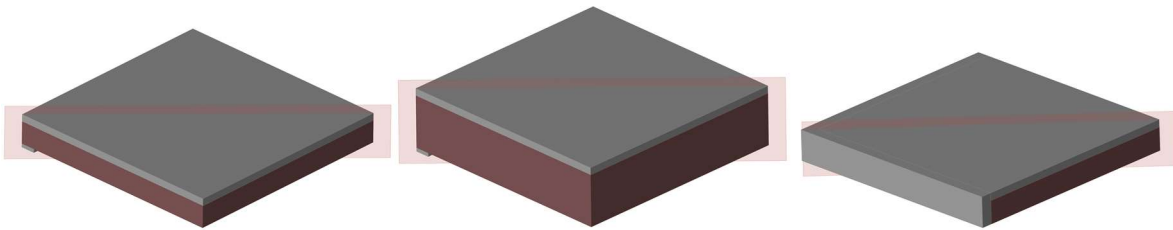


Abb. 49 Berechnungsmodell für die Optimierung in *solidThinking Inspire*. Die roten Bereiche stellen das Design-Volumen dar. Links: 40 cm Decke auf Stützen, Mitte: 80 cm Decke auf Stützen, rechts: 40 cm Decke auf Mauern

7.4 Ergebnisse der Optimierung

Folgend werden die Ergebnisse der Topologieoptimierung analysiert und gegenübergestellt. Die Abbildungen der Optimierungsergebnisse von *Fusion 360* sind stets auf der linken Seite zu finden, jene von *solidThinking Inspire* auf der rechten. Alle Schnitte sind wie in *Abb. 48* orientiert, das bedeutet die Stütze befindet sich am linken oberen Eck, die Wände an der linken und oberen Kante. Die Bedeutung der Farben variiert in den Darstellungen je nach Software, so zeigt *Fusion 360* die Dichteverteilung, mit Rot für 100 %, Grün für die geringste Dichte und Gelb für den Zwischenbereich. *SolidThinking Inspire* hingegen zeigt keine Dichteverteilung, sondern färbt die Oberfläche in Rot und die Schnittflächen in Grün.

7.4.1 40 cm Decke auf Stützen

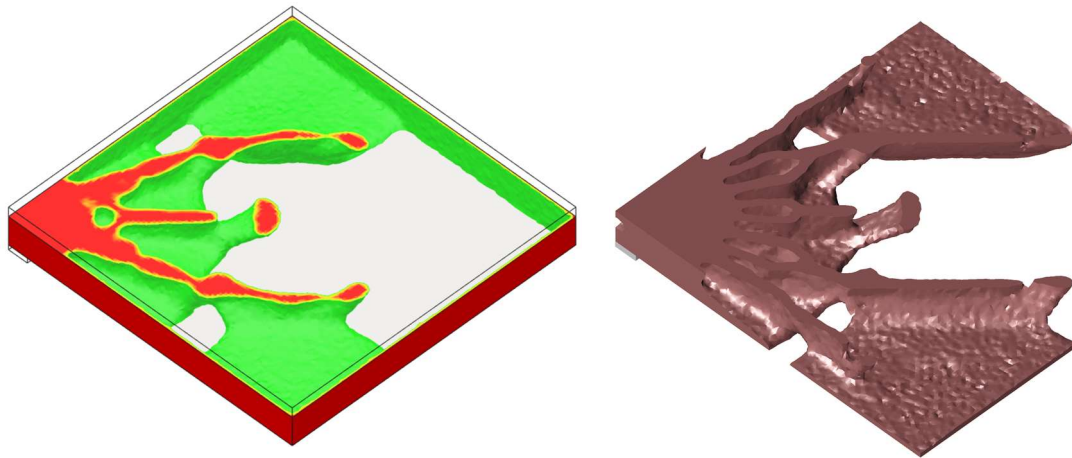


Abb. 50 Optimierte 40 cm Decken auf Stützen ohne Deckplatte. Links: *Fusion 360*, rechts: *solidThinking Inspire*

Wie in *Abb. 50* ersichtlich bilden sich in beiden Programmen ähnliche Decken aus, die den Großteil ihrer Masse über der Stütze konzentrieren. Vergleicht man die optimierten Formen mit den Hauptspannungen aus *Abb. 51*, so zeigt sich ebenso eine deutliche Ähnlichkeit. Vor allem die tangentialen Spannungen um die Stütze führen zur Ausbildung einer Sandwichkonstruktion aus der vorhandenen Deckplatte, einer runden Bodenplatte wie in *Abb. 54* ersichtlich und dazwischen diskret ausgebildete Stege, die radial von der Stütze ausgehen und in *Abb. 53* zu sehen sind.

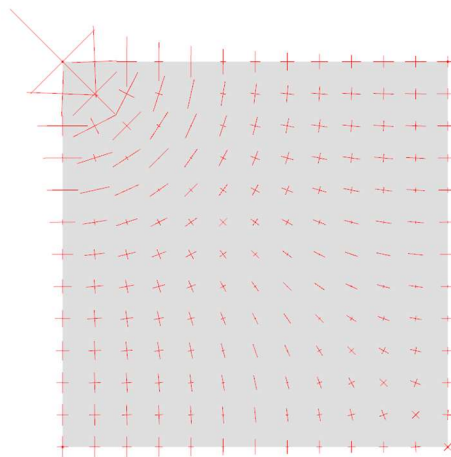


Abb. 51 Hauptspannungsrichtungen der Decke auf Stützen

Die Anzahl der Stege ist der visuell auffälligste Unterschied zwischen den Ergebnissen der Programme, denn *solidThinking Inspire* generiert acht, *Fusion 360* nur drei. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich jedoch eine Übereinstimmung von den drei Hauptstegen, die in *Inspire* jedoch über eine kurze Distanz zweigeteilt verlaufen. Auch die zwei übrigen Randstege sind

in *Fusion* durch eine dünne Scheibe an den Rändern vorhanden. Dieser Randstreifen zieht sich über den gesamten Umfang des berechneten Deckenteils, da *Fusion 360* überall wo Randbedingungen direkt an das Design-Volumen angesetzt werden eine dünne Massenschicht ausbildet. Dies hat zur Folge, dass die reduzierte Berechnung, anhand eines Viertels des Deckenfeldes, maßgeblich Einfluss auf das Ergebnis hat.

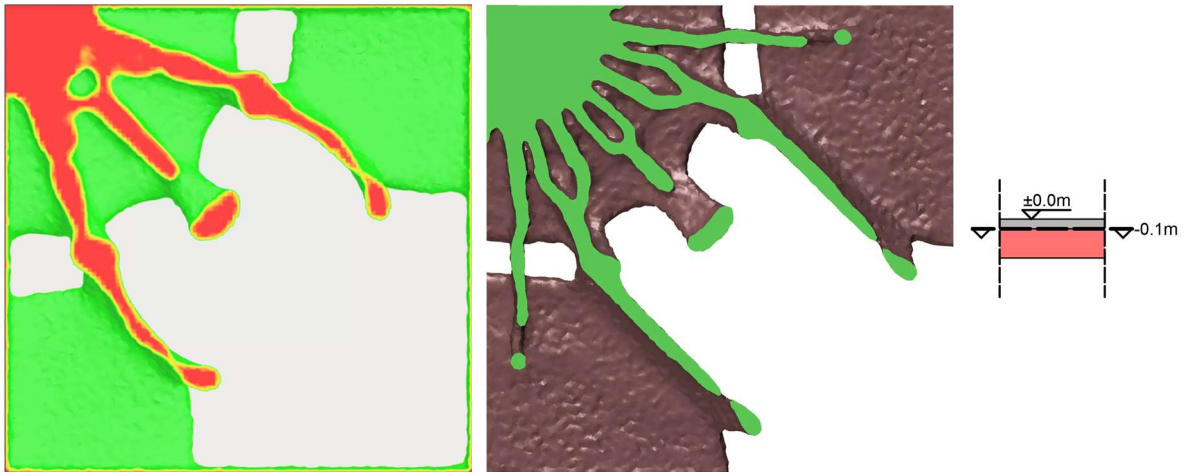


Abb. 52 Schnitt (-0,10m) durch optimierte 40 cm Decken auf Stützen.

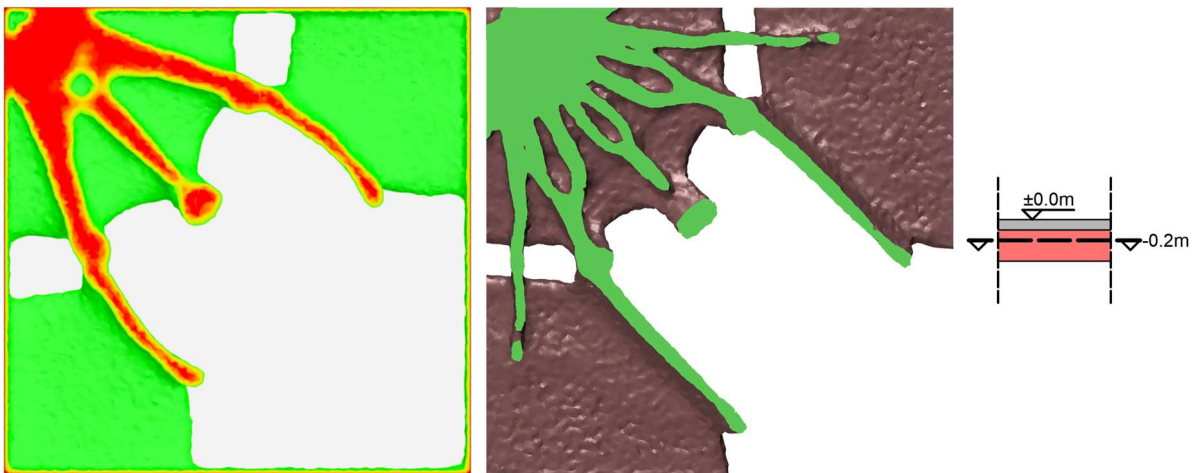


Abb. 53 Schnitt (-0,20m) durch optimierte 40 cm Decken auf Stützen.

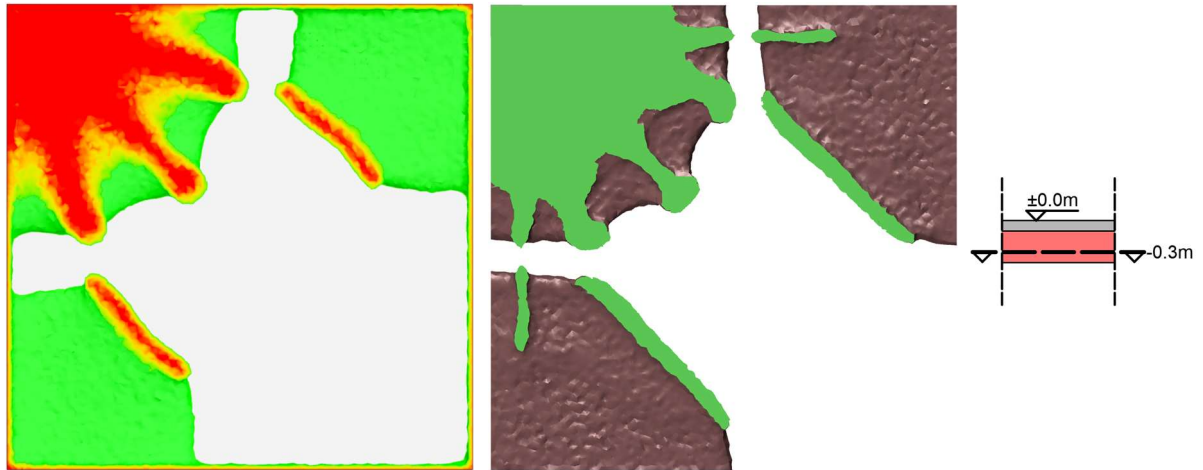


Abb. 54 Schnitt (-0,30m) durch optimierte 40 cm Decken auf Stützen.

7.4.2 80 cm Decke auf Stützen

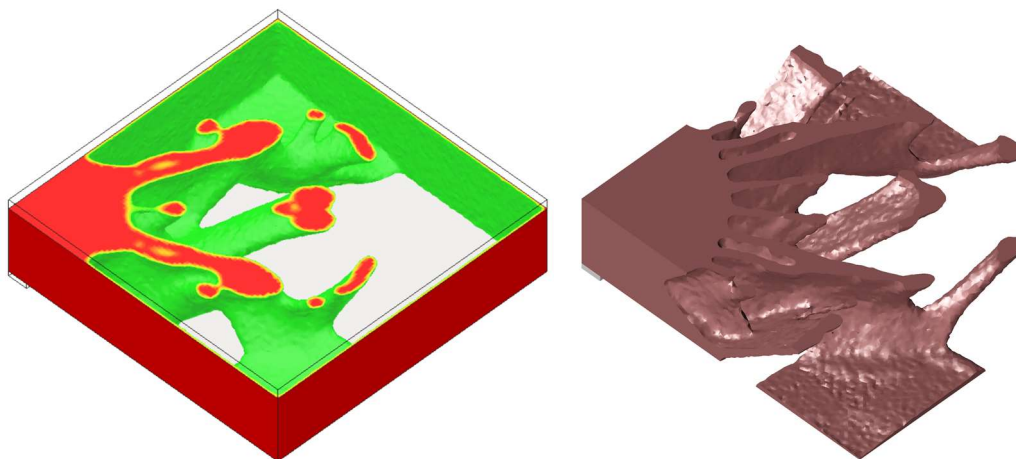


Abb. 55 Optimierte 80 cm Decken auf Stützen ohne Deckplatte. Links: *Fusion 360*, rechts: *solidThinking Inspire*

Die Verdoppelung der Deckenhöhe bringt eine Vergrößerung der Dicke des Designraums von 30 cm auf 70 cm mit sich, führt aber trotzdem zu visuell ähnlichen Optimierungsergebnissen. Die im vorhergehenden Beispiel beobachteten Muster verdeutlichen sich bei Betrachtung der Schnitte (Abb. 56 bis Abb. 62) hier weiter: *Fusion 360* generiert eine vor allem aus dicken Stäben bestehende Struktur, während *Inspire* mehrere dünnere Stege ausbildet. Wobei die grobe Massenverteilung wiederum untereinander sehr ähnlich bleibt. Der von *Fusion 360* generierte Streifen über den gesamten Umfang ist erwartungsgemäß ebenso erhalten geblieben.

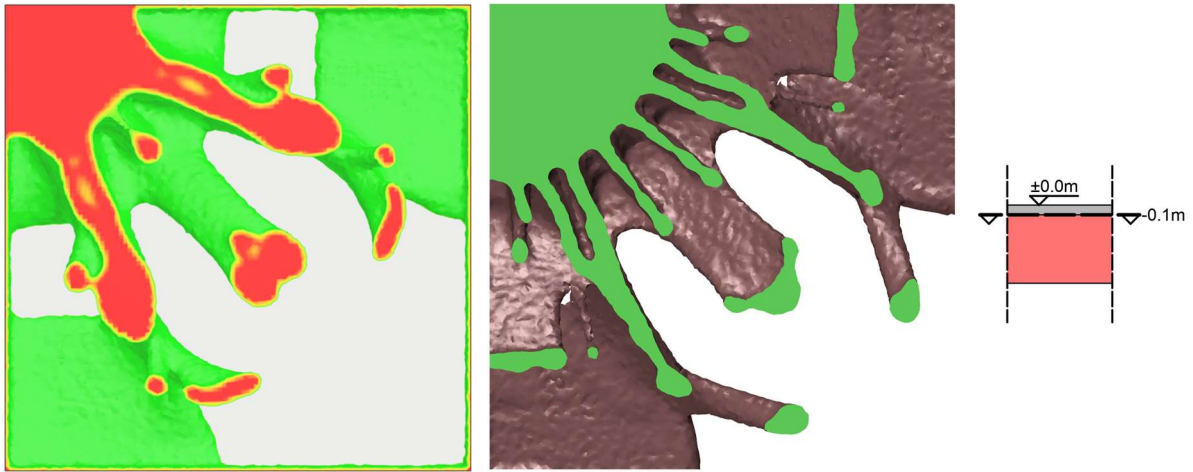


Abb. 56 Schnitt (-0,10m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen

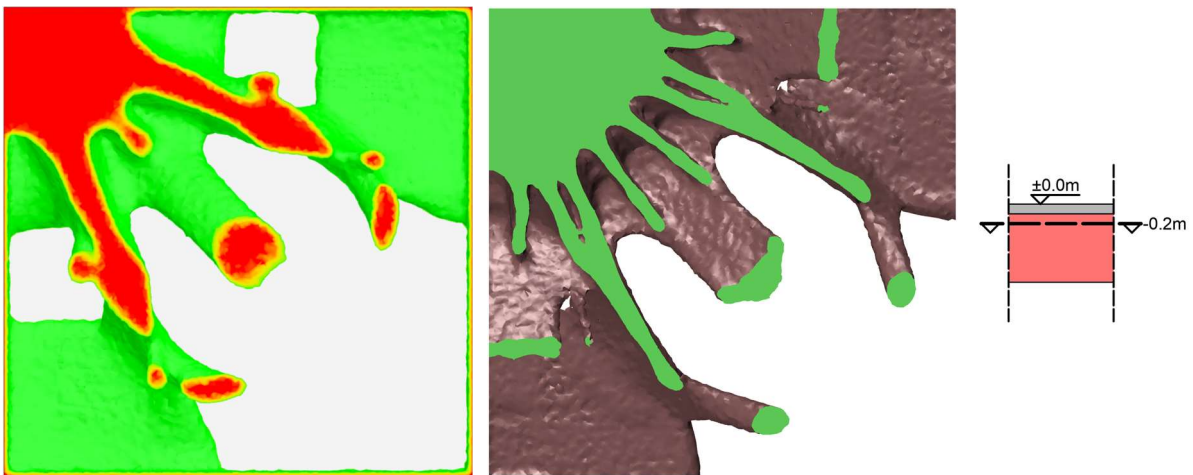


Abb. 57 Schnitt (-0,20m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen

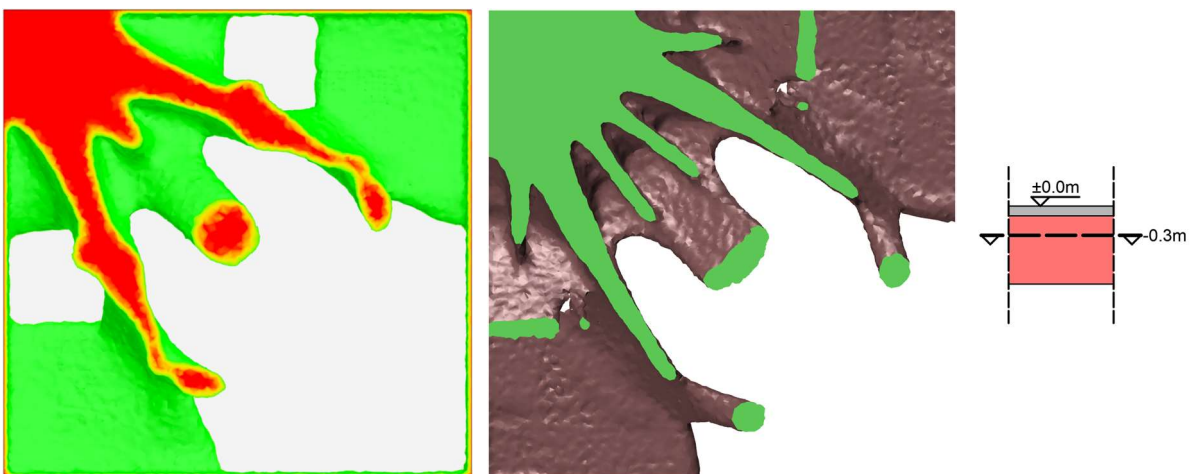


Abb. 58 Schnitt (-0,30m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen

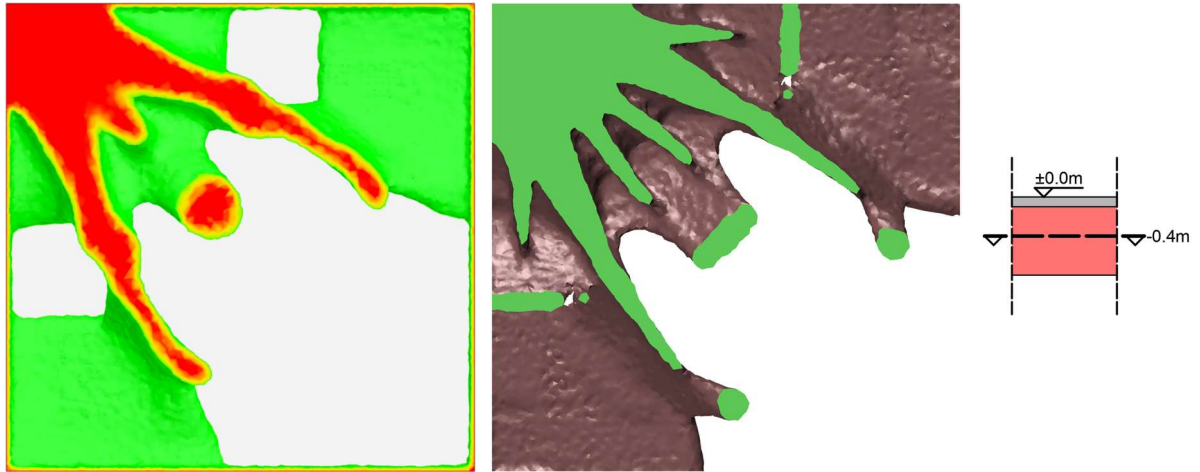


Abb. 59 Schnitt (-0,40m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen

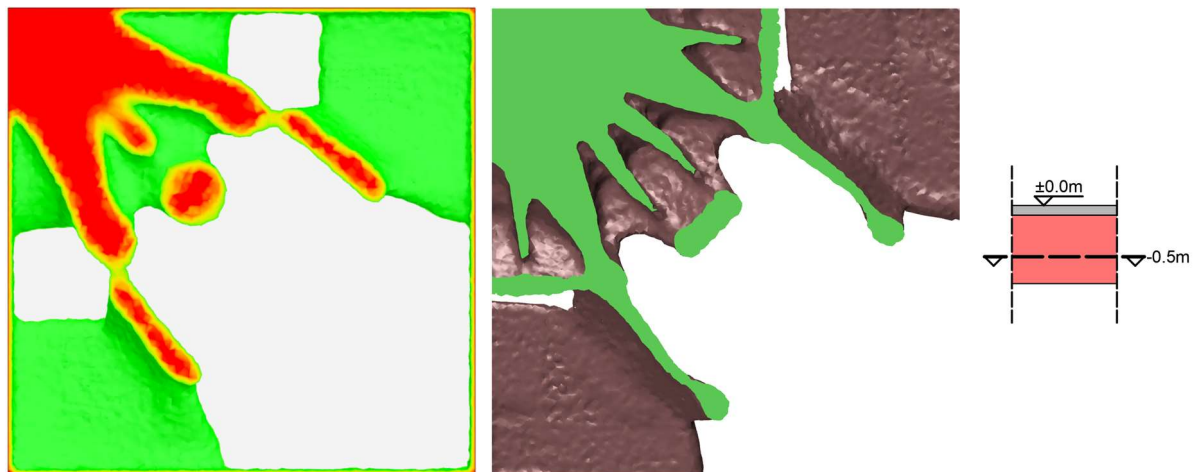


Abb. 60 Schnitt (-0,50m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen

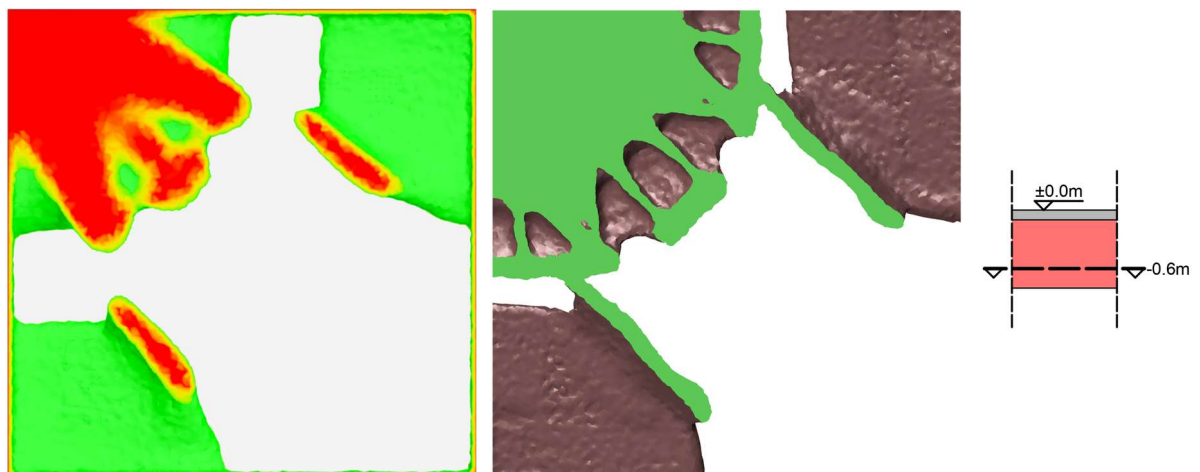


Abb. 61 Schnitt (-0,60m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen

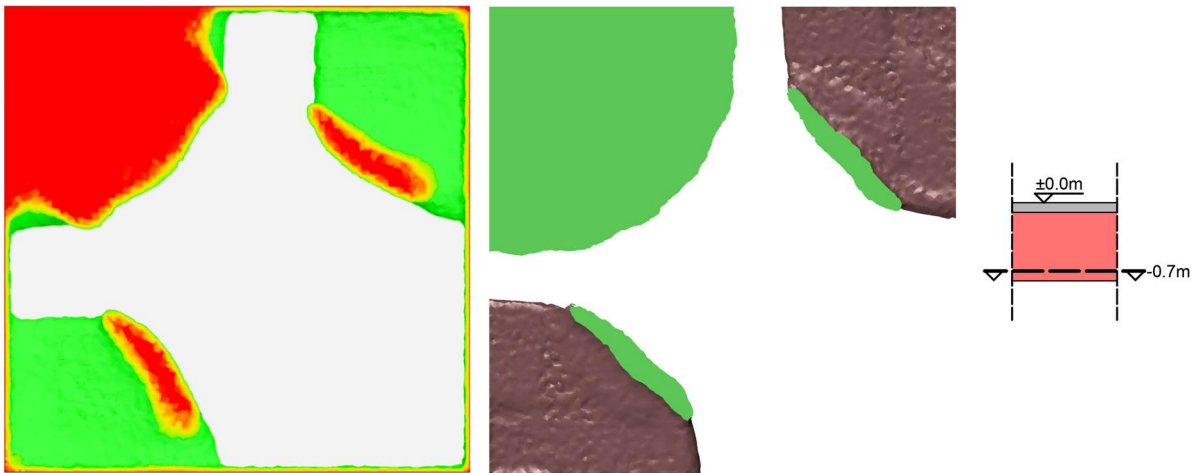


Abb. 62 Schnitt (-0,70m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen

7.4.3 40 cm Decke auf Wänden

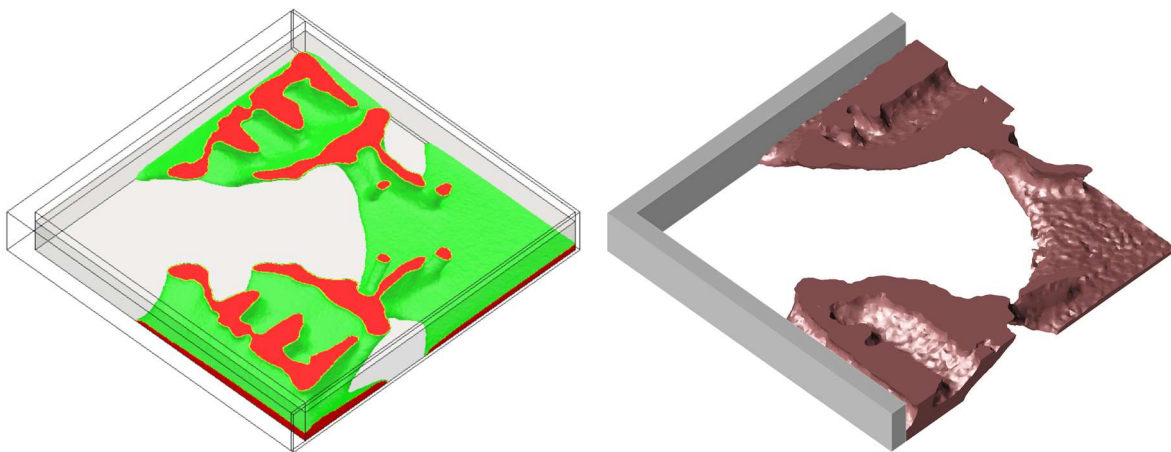


Abb. 63 Optimierte Decken auf Wänden ohne Deckplatte. Links: *Fusion 360*, rechts: *solidThinking Inspire*

Die Änderung der Deckenlagerung von Stützen auf Wände spiegelt sich gut in den erhaltenen Ergebnissen (*Abb. 63*) wieder, denn der Großteil der Masse verschiebt sich von den Ecken des Deckenfeldes hin zur Mauermitte. Diese Umlagerung kann auch durch das Betrachten der horizontalen Hauptspannungen einer vergleichbaren Decke aus *Abb. 64* nachvollzogen werden. Auch die Hauptspannungen zeigen eine hohe Biegebeanspruchung entlang den Wänden, die zur Wandmitte hin zunimmt.

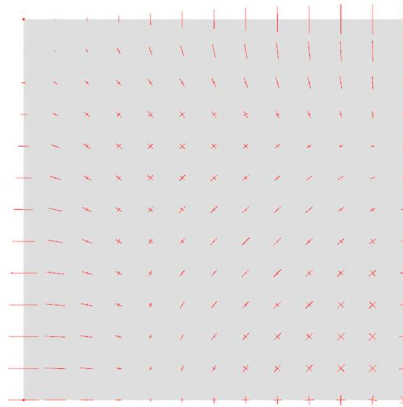


Abb. 64 Hauptspannungsrichtungen der Decke auf Wänden

Im Bereich der Deckenmitte ist eine zweiachsige Biegespannung vorhanden, die zur Ausbildung einer Bodenplatte in den generierten Strukturen führt. Diese in *Abb. 68* dargestellte Platte fällt in *Fusion 360* wesentlich größer aus, wodurch der Randbereich im Gegenzug weniger massiv ausfällt als in *Inspire* (*Abb. 66*). In diesem Anwendungsfall bildet nämlich *Fusion 360* mehrere diskrete Stege aus, während *Inspire* diese nur ansatzweise generiert. Schneidet man durch diesen Bereich wie in *Abb. 65* so lässt sich ein zweidimensionales Fachwerk abstrahieren, das die Lastabtragung gut verdeutlicht. An den Wänden bildet sich eine eingespannte Auskragung, die gelenkig an eine Rahmenkonstruktion in Feldmitte anschließt.



Abb. 65 Schnitt der 40 cm Decke auf Wänden aus *solidThinking Inspire* mit überlagertem abstrahiertem Fachwerkmodell in Rot

In den Schnitten von *Abb. 66* bis *Abb. 68* fällt zudem auf, dass im Gegensatz zu den Beispielen der Decken auf Stützen in *Fusion 360* keine Randstreifen bei den angebrachten Randbedingungen auftreten. Dies ist auf das eine Abänderung des Simulationsmodells zurückzuführen. An den Rändern wird für dieses Beispiel ein dünner Streifen angebracht, der von der Optimierung ausgenommen wird und an den die Randbedingungen angesetzt werden können. Jedoch bringt dieser Balken zusätzliche Steifigkeit ein und beeinflusst das Ergebnis. Zu sehen ist dieser Einfluss vor allem an der Bodenplatte, die im Randbereich besonders dick ausfällt.

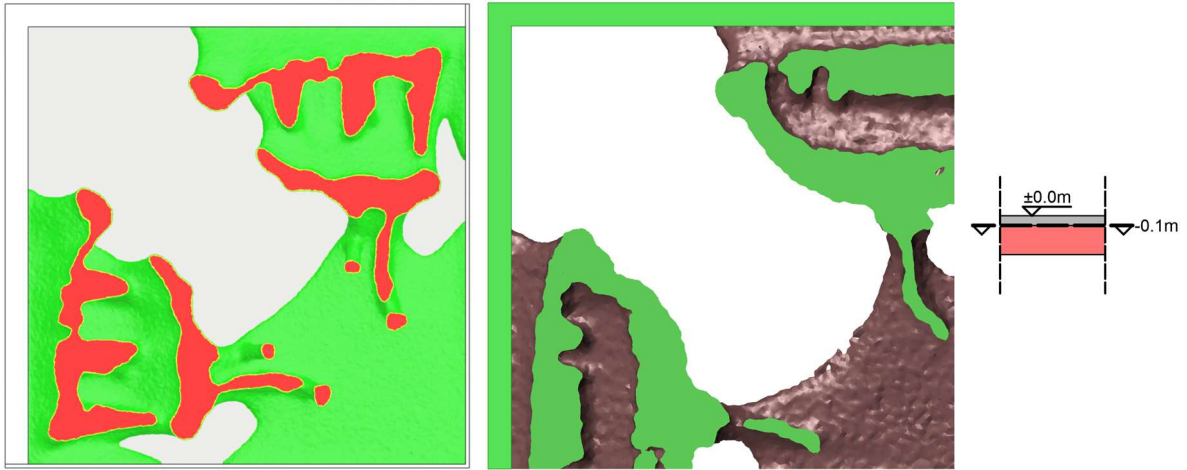


Abb. 66 Schnitt (-0,10m) durch optimierte 40 cm Decken auf Wänden

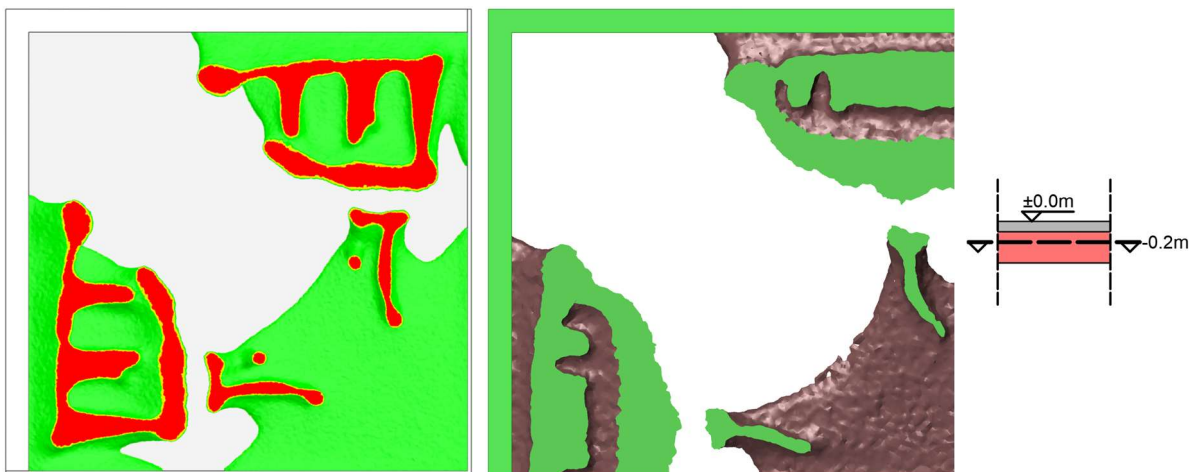


Abb. 67 Schnitt (-0,20m) durch optimierte 40 cm Decken auf Wänden

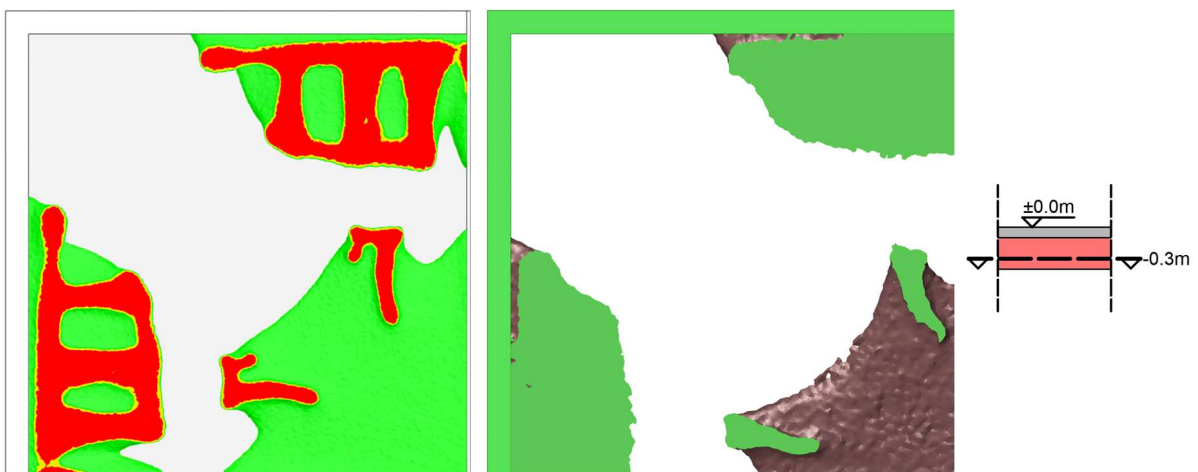


Abb. 68 Schnitt (-0,30m) durch optimierte 40 cm Decken auf Wänden

7.5 Validierung

Für die optimierten Formen wird die maximale Durchbiegung an der Deckplatte unter Vollast errechnet, dies soll einen Vergleich zwischen den Programmen ermöglichen, aber auch aufzeigen, ob gegenüber herkömmlichen Deckenkonstruktionen Steifigkeit gewonnen werden kann. Die FE-Berechnungen finden ausschließlich in *solidThinking Inspire* statt, um mögliche programmspezifische Differenzen auszuschließen. Dies bedeutet, dass alle Formen exportiert werden, ein einfaches Postprocessing durchlaufen und dann für die Berechnung importiert werden. Das Postprocessing umfasst die Reparatur der STL-Datei, die Reduzierung der Polygonanzahl, das Konvertieren in ein BRep Volumen, das Schaffen von einheitlichen Oberflächen für das Anbringen der Randbedingungen und der Export als STEP-Datei. Da dieser Prozess einen geringen Einfluss auf die Form hat und somit die Ergebnisse verfälschen kann, durchlaufen auch alle in *Inspire* optimierten Formen den gleichen Workflow.

In den folgenden Abbildungen (*Abb. 69* bis *Abb. 71*) sind die Verformungsfiguren der optimierten Strukturen aus den jeweiligen Programmen (links: *Fusion 360*, rechts: *solidThinking Inspire*) unter Vollast und unter Berücksichtigung des Eigengewichts dargestellt.

Für die genauen Werte der maximalen Durchbiegungen siehe *Tab. 6* in Kapitel 7.6.

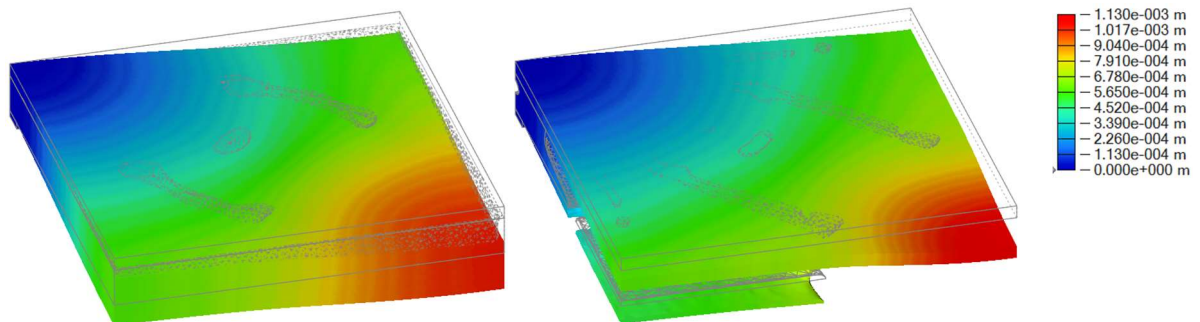


Abb. 69 Verformungsfigur der 40 cm Decke auf Stützen (300x Überhöhung). Links: *Fusion 360*, rechts: *solidThinking Inspire*

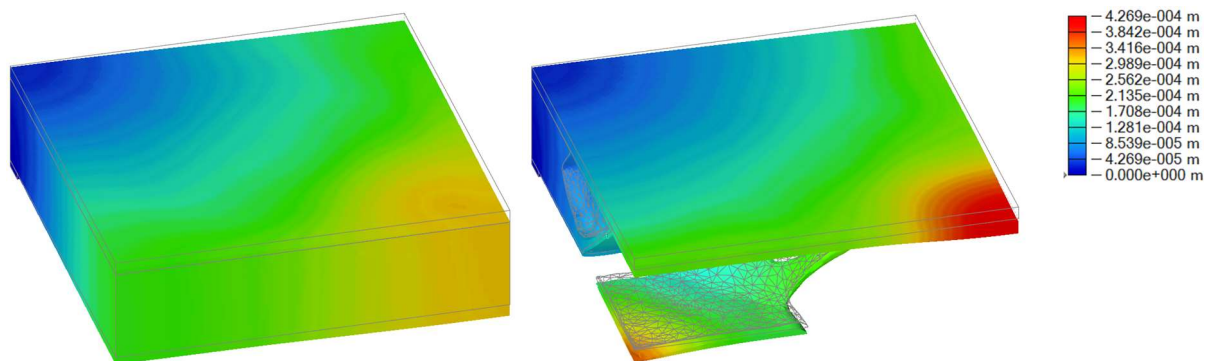


Abb. 70 Verformungsfigur der 80 cm Decke auf Stützen (300x Überhöhung). Links: *Fusion 360*, rechts: *solidThinking Inspire*

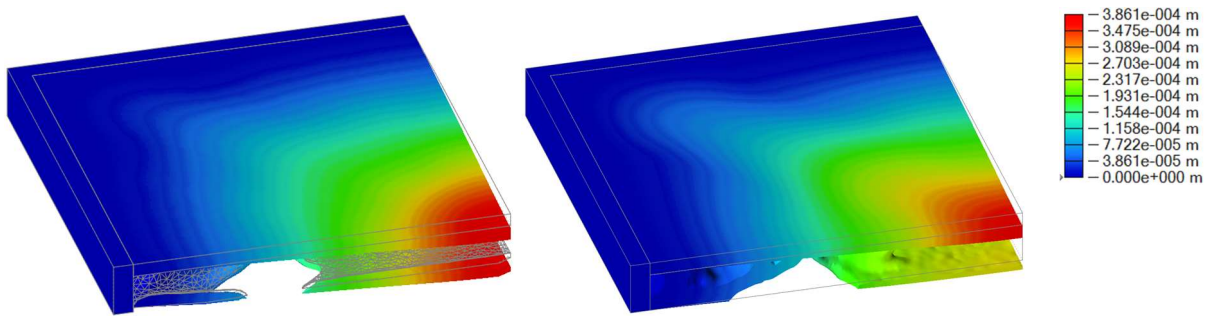


Abb. 71 Verformungsfigur der 40 cm Decke auf Wänden (300x Überhöhung). Links: *Fusion 360*, rechts: *solidThinking Inspire*

7.5.1 Vergleichsdecken

Um die Leistungsfähigkeit der generierten Formen einschätzen zu können, werden jeweils zwei Vergleichsdecken herangezogen: eine Decke mit reduzierter Dicke und eine mit Unterzügen. Dabei gilt für beide, dass sie ebenso wie die optimierten Decken nur 25 % des Design-Volumens ausfüllen dürfen. Für die Decke mit reduzierter Dicke bedeutet dies eine Verkleinerung der Höhe des Designraums um 75 %. Für die Decke mit Unterzügen wird die zur Verfügung stehende Masse auf ein zweiachsiges Raster von je fünf gleichartigen Unterzügen gleichmäßig aufgeteilt, wobei für die Lagerung auf Stützen zusätzlich ein Träger über diesen angebracht wird (siehe *Abb. 72*).

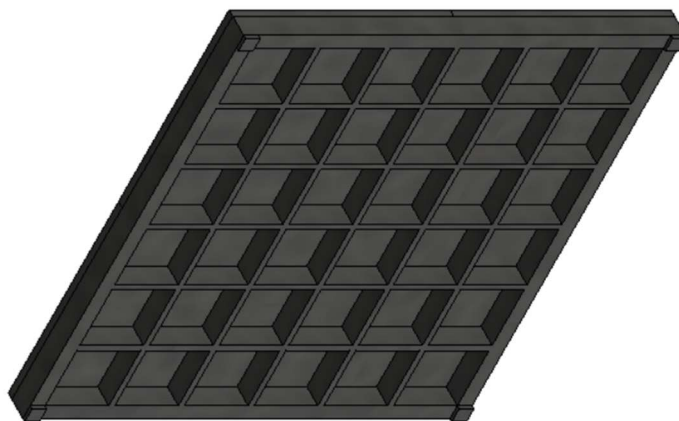


Abb. 72 40 cm Decke auf Stützen mit Unterzügen

7.6 Vergleich

Die generierten Formen der beiden eingesetzten Programme sollen einander gegenübergestellt und gleichzeitig mit den unter 7.5.1 beschriebenen Decken (Decke mit reduzierter Höhe und Decke mit Unterzügen) verglichen werden. Als Vergleichskriterium wird

die maximale Durchbiegung der Deckplatte betrachtet, da dieser Wert für die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks limitiert werden muss. Die unter 6.3.5 beschriebene relative Leistungsfähigkeit wird erneut herangezogen, um den Vergleich zu erleichtern. Alle Vergleichswerte sind in *Tab. 6* aufgelistet, zusammen mit einer Prozentangabe zu den jeweiligen Referenzwerten. Als Referenz wird für die Masse 25 % des Designraums angenommen und für die Verformung die kleinste aus den vier Varianten, diese Referenzwerte sind in *Tab. 6* jeweils visuell hervorgehoben.

Tab. 6 Vergleich der optimierten Decken

Decke	Variante	Masse [t]	Maximale Verformung [mm]	Relative Leistungsfähigkeit
40 cm Decke auf Stützen	Reduzierte Höhe	1,62 (100%)	5,71 (560%)	18%
	Unterzüge	1,62 (100%)	1,58 (155%)	66%
	Fusion 360	1,65 (102%)	1,02 (100%)	100%
	solidThinking Inspire	1,61 (99%)	1,13 (111%)	93%
80 cm Decke auf Stützen	Reduzierte Höhe	3,78 (100%)	2,569 (818%)	12%
	Unterzüge	3,78 (100%)	0,445 (142%)	71%
	Fusion 360	3,79 (100%)	0,314 (100%)	100%
	solidThinking Inspire	3,65 (97%)	0,427 (136%)	76%
40 cm Decke auf Wänden	Reduzierte Höhe	1,46 (100%)	1,640 (446%)	23%
	Unterzüge	1,46 (100%)	0,578 (157%)	64%
	Fusion 360	1,44 (99%)	0,386 (105%)	97%
	solidThinking Inspire	1,47 (101%)	0,341 (100%)	100%

Bei Betrachtung der Massen lässt sich erkennen, dass beide Programme bis auf wenige Prozentpunkte an das für die Optimierung festgelegte Massenziel von 25 % heranreichen und dies somit zu gut vergleichbaren Bauteilen führt.

Bei der Verformung zeigt sich, dass die Vergleichsdecken erwartungsgemäß schlechter abschneiden als die topologieoptimierten. Bei zwei von drei Beispielen liefert *Fusion 360* die leistungsfähigsten Decken, mit relativ geringen Abständen von maximal 24 % zu *Inspire*. Zurückzuführen ist dieser Unterschied wahrscheinlich auf den von *Fusion 360* generierten Randstreifen, der Steifigkeit in die Feldmitte einbringt und somit die besonders starke Verformung der Decke in diesem Bereich verhindert. Dies ist in *Abb. 69* und *Abb. 70* gut ersichtlich, denn betrachtet man den Rest der Decke, so weist die von *Inspire* optimierte über

den Großteil der Deckplatte geringere Verformungen auf. Somit würde es sich anbieten, in Feldmitte manuell die Steifigkeit zu erhöhen und damit eine wesentlich leistungsfähigere Tragstruktur zu erhalten. Die hohe Steifigkeit in Feldmitte ist auch der Grund, warum die Vergleichsdecke mit Unterzügen relativ nah an die topologieoptimierten heranreichen kann, obwohl sie generell weniger Steifigkeit aufweist.

Die Verdoppelung der Bauhöhe auf 80 cm für die zweite betrachtete Decke führt nicht zur erwarteten Verbesserung des Ergebnisses, dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass auch diese Höhe noch als flächig angesehen werden kann und eine noch größere Bauhöhe benötigt würde um leistungsfähigere Ergebnisse aus einer dreidimensionalen Tragwirkung zu erzielen. Jedoch wäre eine noch höhere Decke nicht mehr praxisrelevant und wird deshalb nicht weiter untersucht.

7.7 Additive Fertigung

Am Beispiel der in *Inspire* optimierten 40 cm Decke auf Stützen soll die Produzierbarkeit nachgewiesen werden. Dafür wird die Form ohne Deckplatte im Maßstab 1:25 und in ihrer horizontalen Endlage gedruckt (siehe *Abb. 73*). Der Druck zeigt keinerlei Probleme auf und die von der Optimierung erhaltene STL-Datei lässt sich direkt anwenden. Die Überhänge liegen alle unter den maximal möglichen 70° , solange die Deckplatte nicht mitgedruckt wird. Sollte dies für eine praktische Umsetzung jedoch erwünscht sein, so könnte die Druckorientierung umgekehrt werden, um so die erforderlichen Abstützungen zu reduzieren. Eine weitere Alternative könnte die Herstellung einer 3D gedruckten Schalung darstellen, die mit Beton ausgegossen wird.

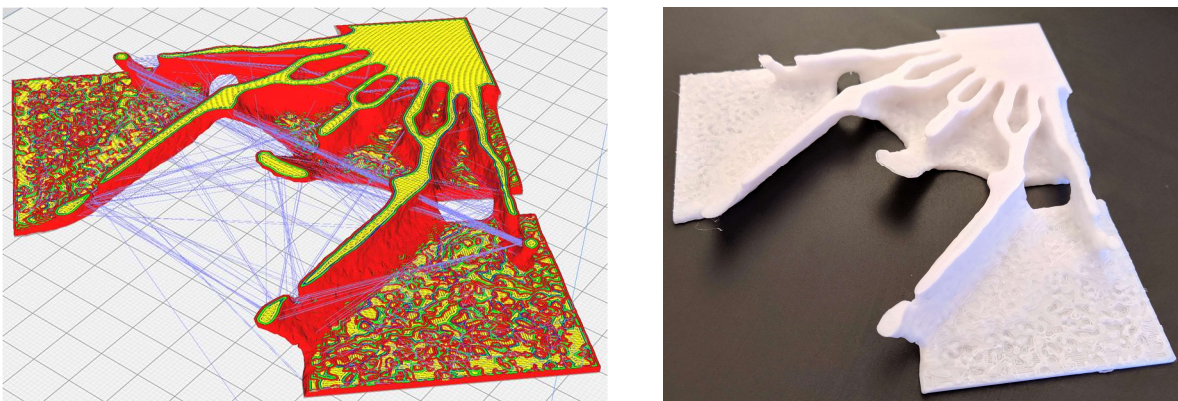


Abb. 73 3D-Druck der optimierten 40 cm Decke auf Stützen ohne Deckplatte. Links: Druckvorschau in *CURA*, rechts: gedruckte Decke

7.8 Erkenntnisse

Decken stellen für die Topologieoptimierung durch ihre flache Bauweise eine Herausforderung dar, da nicht unbedingt eine über die Dicke aufgelöste, optimale Fachwerkstruktur ausgebildet werden kann. Dies gilt auch bei großen Deckenhöhen wie bei den untersuchten 80 cm auf 6 m Spannweite. Dennoch zeigt sich, dass die generierten Strukturen leistungsfähiger als herkömmliche Decken sein können. Auch das Produzieren scheint durch moderne Verfahren möglich zu sein. Benötigte Bewehrungseinlagen werden für die Optimierung, Validierung und Produktion im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt, weshalb ein Abschätzen der Auswirkungen dieses Aspekts nicht möglich ist und auch keine praxistaugliche und tragfähige Decke demonstriert werden kann. Alternativ zu diskreter Bewehrung könnte eventuell faserverstärkter Beton Einsatz finden. Dies setzt jedoch eine genauere Untersuchung der erzielbaren Tragfähigkeit und Praxistauglichkeit voraus, vor allem unter Berücksichtigung des additiven Fertigungsprozesses.

Beide eingesetzten Programme liefern in diesem Bereich ähnlich leistungsfähige Resultate, obwohl die Ergebnisse softwareabhängig etwas unterschiedlich ausfallen. Dies stellt eine gegenseitige Validierung dar und es kann angenommen werden, dass beide Programme sinnvolle Ergebnisse liefern können. Das verwendete Optimierungsziel der Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit eignet sich nur bedingt für den Einsatz bei Decken, da damit nicht die maximale Verformung minimiert werden kann. Jedoch ist genau dieser Wert für die Gebrauchstauglichkeit im Bauwesen ausschlaggebend. Als mögliche Lösung könnte ein modifizierter Optimierungsalgorithmus herangezogen werden, der darauf Rücksicht nimmt. Oder die erhaltene Form wird lokal mit manuell eingebrachten Strukturen verstärkt.

Hohe Kosten durch Planung und Produktion gekoppelt mit Unsicherheiten in der Berechnung (Bewehrungsmenge, Bewehrungslage, Lastaufstellung) und in der nicht erprobten Ausführung (Brandschutz, Langlebigkeit, Schallschutz, Herstellbarkeit...) lassen die Praxistauglichkeit einer topologieoptimierten und additiv gefertigten Decke noch nicht ökonomisch erscheinen. Vor allem da als einziger Vorteil, abseits von architektonischen Präferenzen, die Reduzierung der benötigten Betonmenge gesehen werden kann, was die Umwelt schonen und zu leichteren Decken führen kann, jedoch beides nur im geringen Maße.

8 Anwendungsbereich Stahlknoten

Ähnlich dem unter 3.5.4 erwähnten Stahlknoten des Ingenieurbüros Arup soll ein Verbindungsknoten aus Stahl optimiert werden. Dies soll die Eignung der Topologieoptimierung für kleine Bauteile aufzeigen und den Einsatz von metallischen Baustoffen untersuchen. Im Gegensatz zum Arup Stahlknoten sollen jedoch nicht nur Normalkräfte, sondern alle Schnittkraftarten in den Knoten eingeleitet werden, um den Unterschied zu beleuchten.

Der betrachtete Knoten ist Teil einer entworfenen Überdachung eines Innenhofes aus einem mit Glas bedeckten Stahlträgerraster. Da die entworfene Überdachung jedoch sehr viele Knoten beinhaltet, die sich in Geometrie und Lasteinwirkung unterscheiden, soll zusätzlich der repetitive Workflow der Modellierung soweit als möglich automatisiert werden. Damit soll aufgezeigt werden, wie in Zukunft kleinere Bauteile mit möglichst geringem Planungsaufwand entworfen und anschließend 3D gedruckt werden können.

8.1 Lasten

Alle Lastannahmen werden für eine Überdachung im Bereich Graz-Zentrum und einer Meereshöhe von 369 m getroffen. Die ausführliche Lastannahme ist im *Anhang A* zu finden. Zusammenfassend sind alle betrachteten Lastfälle in *Tab. 7* angeführt. Lastfall 1, 2, 3 und 4 werden für die Dimensionierung der Stäbe herangezogen, die Topologieoptimierung berücksichtigt Lastfall 1, 2 und 4. Für alle Lastfälle wird die Einwirkung gleichmäßig auf die gesamte Dachfläche verteilt, die feldweise Belastung wird vernachlässigt, um die Anzahl der Lastfälle gering zu halten.

Tab. 7 Lastfälle

Lastfall	Flächenlast			Sicherheitsfaktor Eigengewicht
	Vertikal, reale Fläche (Eigengewicht)	Vertikal, projizierte Fläche (Schnee)	Orthogonal, reale Fläche (Wind)	
LF 0: Eigenlast	0,50 kN/m ²	-	-	1,0
LF 1: ULS Schnee	0,65 kN/m ²	6,93 kN/m ²	-	1,3
LF 2: ULS Wind	0,50 kN/m ²	-	-2,24 kN/m ²	1,0
LF 3: SLS Schnee	0,50 kN/m ²	4,62 kN/m ²	-	1,0
LF 4: Temperatur	$\Delta T=47^{\circ}\text{K}$ auf gesamte Tragstruktur			1,0

8.2 Parametrische Modellierung

Die Additive Fertigung eignet sich im Vergleich zu anderen Herstellungsmethoden besonders für Unikate. Aus diesem Grund wird für dieses Beispiel eine freiformähnliche Dachform untersucht, bei der sich jeder Verbindungsknoten voneinander unterscheidet. Die Geometrie wird dafür mit zwei Kurven beschrieben: einer Erzeugenden, die entlang einer Leitkurve verschoben wird und so die Fläche aufspannt.

Die Modellierung erfolgt ausschließlich in *Grasshopper*, welches das Grundprogramm *Rhino* um die Möglichkeit der visuellen Programmierung erweitert. Mit dem erstellten Skript aus *Abb. 74* kann das Tragsystem definiert und dimensioniert werden, weiters werden die Knotenschnittkräfte und die Knotengeometrie bestimmt. Diese parametrische Modellierung ermöglicht viele Arbeitsschritte, die für jeden der zahlreichen Verbindungsknoten anfallen, zu automatisieren und so die Vorbereitungszeit für die Topologieoptimierung stark zu reduzieren.

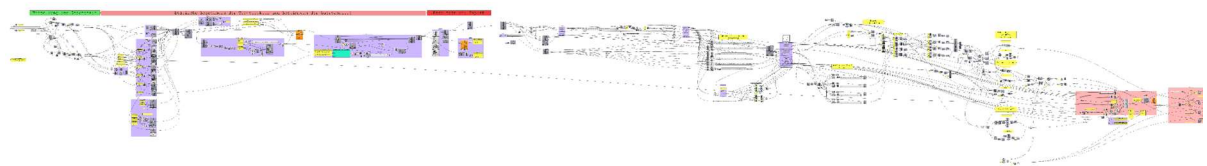


Abb. 74 Gesamtes *Grasshopper* Skript für die parametrische Modellierung

8.2.1 Tragsystem

Durch das Generieren der Dachfläche aus Erzeugender und Leitkurve lässt sich ein einfaches Raster implementieren, das Knoten ca. alle 1,15 m in beide Richtungen erzeugt. Werden diese Knoten mit geraden Stäben biegesteif verbunden, so ergibt sich das gewählte Tragsystem wie in *Abb. 75* dargestellt. Die erhaltene Fläche ist zwar gewölbt, trotzdem wird der Großteil der Kräfte über Biegung in die gelenkigen Auflager abgetragen. Es treten alle theoretisch möglichen Schnittkraftarten (Normalkraft, Querkräfte, Biegemomente und Torsionsmoment) im System auf, was sich maßgebend auf die Knotenoptimierung auswirkt.

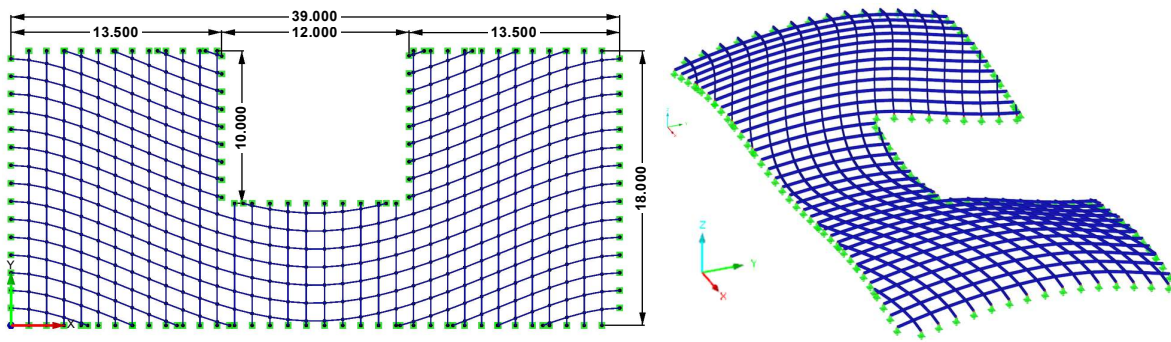


Abb. 75 Tragsystem der Überdachung

8.2.2 Statische Berechnung

Die statische Berechnung des Tragsystems erfolgt im *Grasshopper* Skript (siehe *Abb. 76*) durch die *Karamba* Erweiterung, welche auch die Bemessung übernimmt, indem es die optimalen Querschnitte aus einer vorgegebenen Liste wählt. Die zur Verfügung stehenden Querschnitte sind Rechteckrohrprofile, die von den Außenmaßen identisch sind und sich nur in ihrer Wandstärke unterscheiden, um eine optisch einheitliche Struktur zu erhalten. Für die Validierung der erhaltenen Ergebnisse kann das Simulationsmodell in die etablierte FE-Software *RFEM* exportiert werden. Beim Vergleich der Simulationen beider Programme zeigt sich nahezu keine Differenz, weshalb die *Karamba* Berechnung für die Bestimmung der Schnittkräfte in den Knotenpunkten herangezogen werden kann.

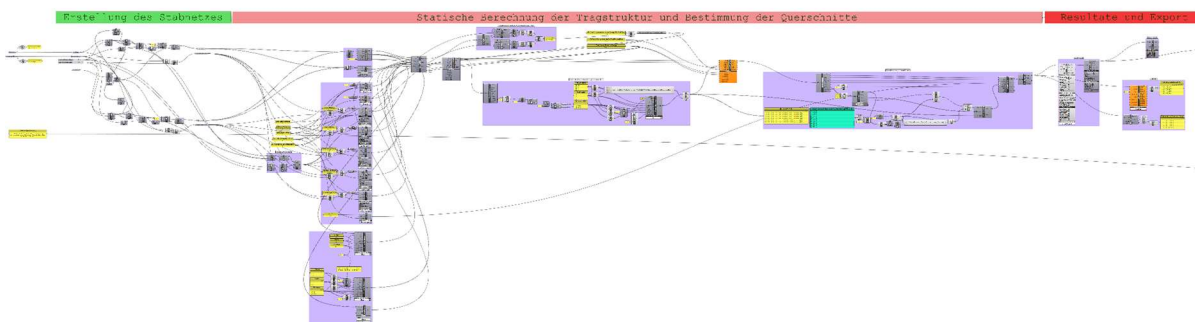


Abb. 76 Teil 1/3 des Grasshopper Skripts der für die Modellierung des Tragsystems und die statische Berechnung verantwortlich ist

8.2.3 Geometrie des Knotens

Für die weitere Optimierung und Untersuchung wird nur ein einzelner Verbindungsknoten betrachtet, der ausreichend Rückschlüsse auf die Ergebnisqualität und den Prozess ziehen lässt. Für diese Ausarbeitung wird der in *Abb. 77* dargestellte Knoten Nr. 470 herangezogen. An diesen schließen biegesteif vier Rechteckrohrprofile mit den Außenmaßen von 180 x 100 mm an, zusätzlich befindet sich an der Oberseite eine Vorrichtung für die Krafteinleitung der Glaseindeckung in das Zentrum des Knotens.

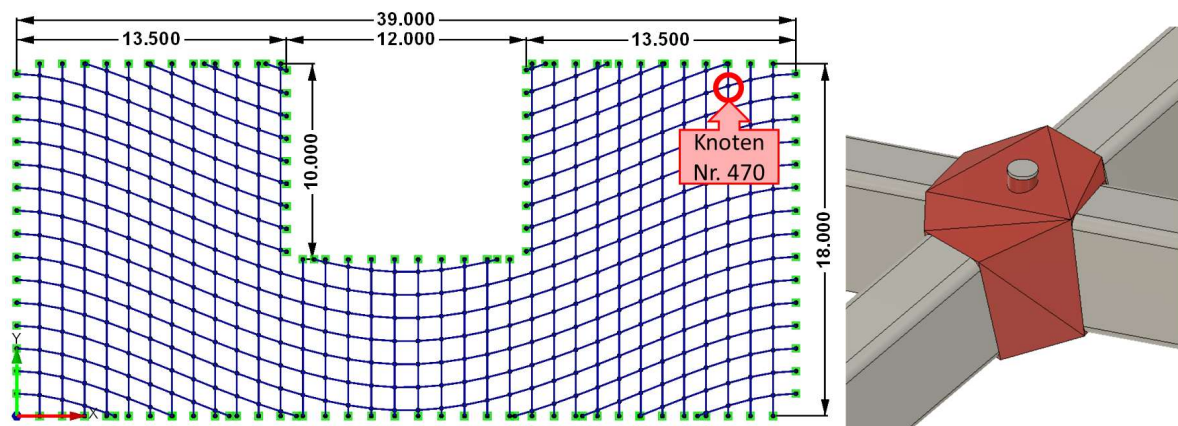


Abb. 77 Links: Position des untersuchten Knotens Nr. 470, rechts: 3D Ansicht des Knotens (Designraum in Rot)

Wie aus *Abb. 77* ersichtlich schließen die Stäbe im Grundriss nicht rechtwinklig zueinander an den Knoten an, ebenso weist die Stabachse, die annähernd in X-Richtung verläuft, einen Knick im Knoten auf, um eine geschwungene Form über die Dachfläche zu erzielen. Bei Betrachtung der Stabneigungen zur Horizontalen zeigen sich wiederum leichte Knicke in beiden Richtungen. Lediglich die Ausrichtung der Profile richtet sich nicht nach der Dachfläche, sie werden ausnahmslos hochkant eingesetzt und nicht entlang ihrer Längsachse verdreht. Diese große Variation der Stabanschlusswinkel an den Knoten führt dazu, dass die Ausmaße des Knotens individuell so bestimmt werden müssen, dass die Stabanschlüsse genügend Abstand zueinander aufweisen und somit das Anschweißen an den Knoten noch möglich ist. Dies wird durch das unter Kapitel 8.2 erwähnte *Grasshopper*-Skript aus *Abb. 78* und *Abb. 79* sichergestellt. Es sorgt dafür, dass der Designraum möglichst klein ist, um den Optimierungsaufwand gering zu halten, ohne dabei die Produzierbarkeit einzuschränken.

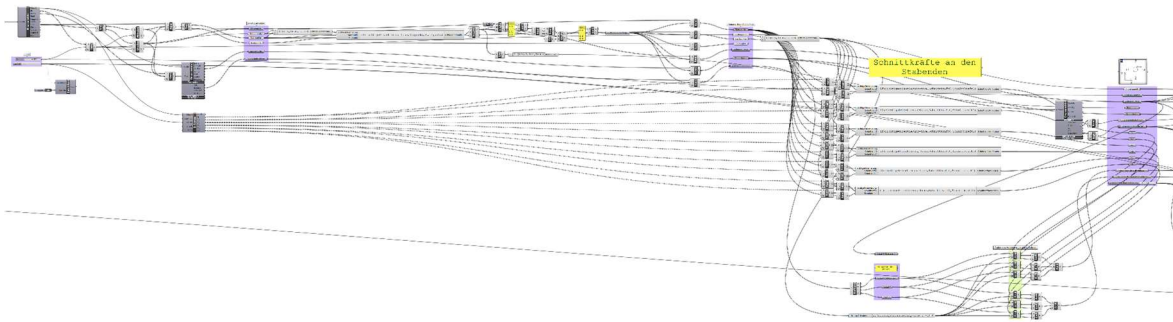


Abb. 78 Teil 2/3 des Grasshopper Skripts für die Bestimmung von Kennwerten (Position, Schnittkräfte und anschließende Stäbe) eines ausgewählten Verbindungsknotens

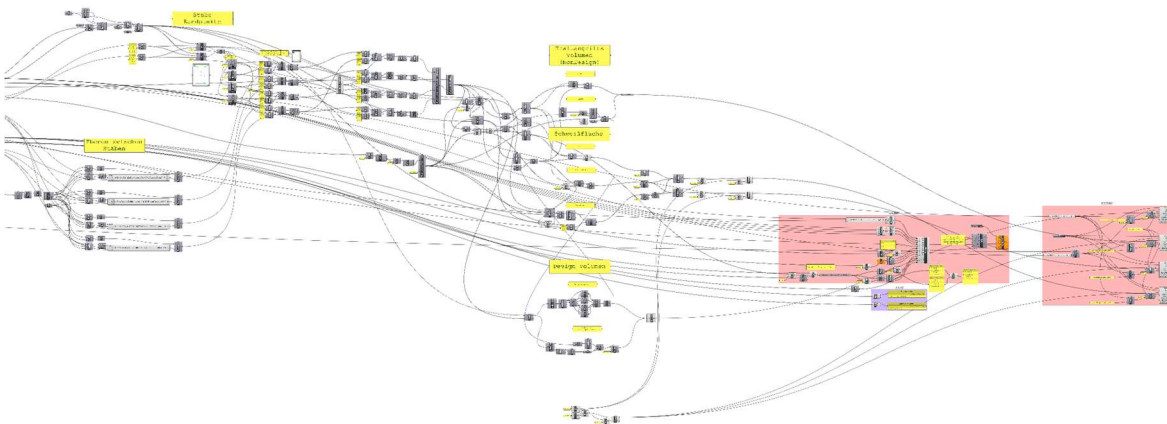


Abb. 79 Teil 3/3 des Grasshopper Skripts für das Erstellen aller Körper, die für die Topologieoptimierung und die Fertigung benötigt werden

Das Skript umfasst jedoch nicht nur den in Abb. 77 rot gekennzeichneten Designraum, der für die Topologieoptimierung zur Verfügung steht, sondern auch alle weitere Volumen, die für die Optimierung und Herstellung benötigt werden. Für die Optimierung werden so 5 mm dicke Anschlussvolumen (siehe Abb. 80) generiert, an denen die Belastungen und Lagerbedingungen angebracht werden können. Für die Herstellung werden ebenso Anschlussvolumen generiert, die im Zuge des Postprocessings Anwendung finden.

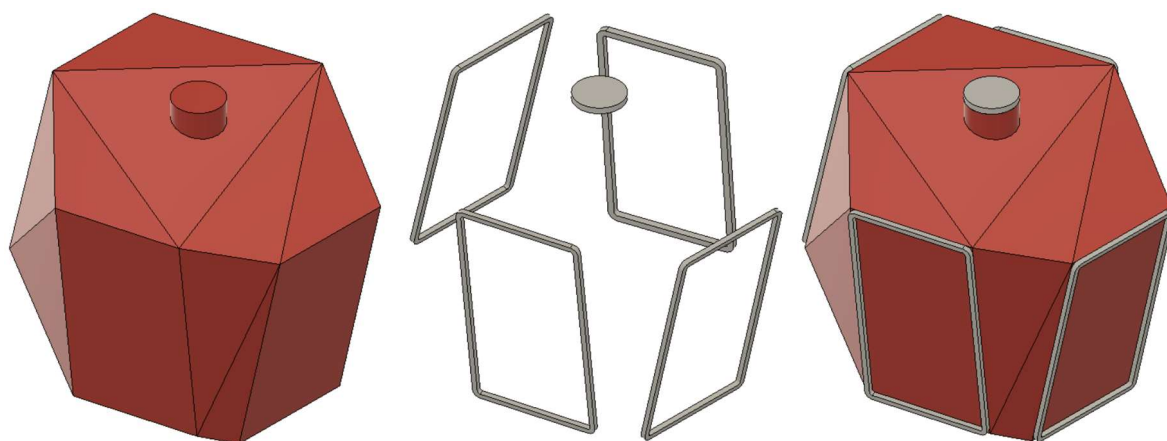


Abb. 80 Optimierungsgometrie für Knoten Nr. 470. Links: Designraum in Rot, Mitte: Anschlussvolumen in Grau, rechts zusammengesetzte Optimierungsgometrie

8.3 Modellierung und Optimierung

Die Optimierung erfolgt nur in *solidThinking Inspire* und im Gegensatz zu den vorhergehenden Beispielen wird als das Optimierungsziel eine Spannungsrestriktion festgelegt. Dies bedeutet, der Algorithmus soll so viel Masse wie möglich aus dem Designraum entfernen, ohne dabei in größeren Bereichen die festgelegte maximale Ausnutzung zu überschreiten. Eine genauere Beschreibung dieser Optimierungsart ist im Kapitel 3.3.2 zu finden.

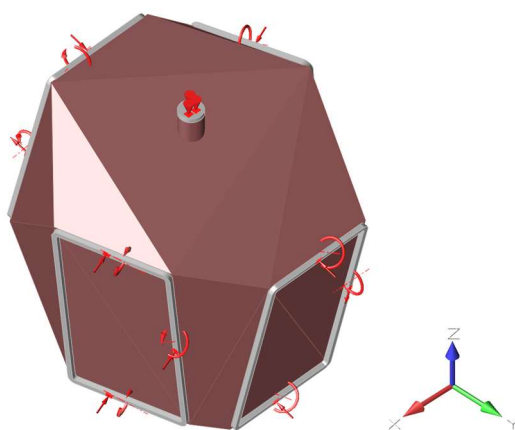


Abb. 81 Optimierungsmodell für Knoten Nr. 470

Alle auftretenden Schnittkräfte, die im *Grasshopper*-Skript aus *Abb. 78* für die jeweilige Schnittebene berechnet werden, müssen in *solidThinking Inspire* manuell als Einwirkung auf den Knoten eingetragen werden. Dieser Arbeitsschritt konnte nicht automatisiert werden, was neben dem erhöhten Arbeitsaufwand auch eine potenzielle Fehlerquelle darstellt. Denn für alle

drei betrachteten Lastfälle (LF1, LF2, LF4) müssen jeweils sechs Schnittkräfte pro Stabanschluss übertragen werden, was zu insgesamt 72 einzutragenden Werten führt. Die Lagerung im Simulationsmodell erfolgt über eine Einspannung des obenliegenden scheibenförmigen Kraftangriffspunkts für die Glaseindeckung, wie in *Abb. 81* dargestellt.

Die kleinste Strukturgröße soll für die Optimierung auf 4 mm limitiert werden, was der geringsten Wandstärke der anschließenden Stäbe entspricht. Da diese geringe Strukturgröße zu einem sehr feinen Berechnungsnetz führt und damit nicht stabil ausgeführt werden kann, wird die Topologieoptimierung in zwei Schritten durchgeführt. Das bedeutet, dass eine erste Optimierung des Designraums mit einer Strukturgröße von 8 mm und einem zulässigen Sicherheitsfaktor für die Spannung von 2,0 durchgeführt wird. Die somit erhaltene Form aus *Abb. 82* dient nach einer neuen Oberflächenvernetzung und Reparatur als Designraum für eine weitere Optimierung. Die zweite Optimierung begrenzt die Spannung nur noch auf einen Sicherheitsfaktor von 1,2 bei einer minimalen Strukturgröße von 4 mm. Trotz des reduzierten Optimierungsvolumens stößt die eingesetzte Software und Hardware an ihre Grenzen, da allein der zweite Optimierungsschritt etwa 14 Stunden andauert.

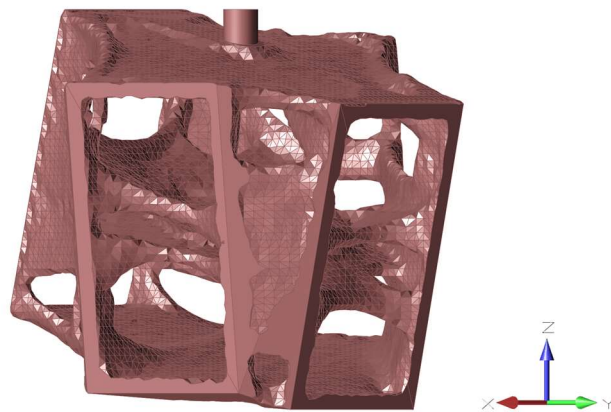


Abb. 82 Optimierung von Knoten Nr. 470 in zwei Schritten: Ergebnis des ersten Schrittes (Sicherheitsfaktor 2,0)

8.4 Ergebnisse der Optimierung

Die durchgeführte Optimierung kann das Gewicht des vollen Designraums von 61,6 kg im ersten Schritt auf 12,5 kg und im zweiten auf 5,5 kg reduzieren. Dies entspricht einer Reduktion von insgesamt 91 %. Bei einem so hohen Hohlraumanteil stößt die Topologieoptimierung an ihre Grenzen und die Qualität der erhaltenen Form leidet. So bilden sich beispielsweise mehrere sehr dünne Streben aus, oft dünner als die festgelegte Mindeststrukturgröße. Ebenso werden, wie unter Kapitel 3.4.5 beschrieben, nicht alle

Strukturen vollständig ausgebildet. Dies macht ein Überarbeiten der erhaltenen Form notwendig.

Bei Betrachtung der optimierten Form aus *Abb. 84* fallen unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten auf. Die glatteren Bereiche sind jene, die vom ersten Optimierungsschritt erhalten geblieben sind, an den rauen Oberflächen hingegen wurde Masse eingespart. Die erhaltene Form lässt ebenso drei annähernd horizontale Scheiben erkennen, dies ist vor allem im Schnitt aus *Abb. 83* ersichtlich. Eine davon befindet sich in der Mitte, die anderen beiden an den Profilrändern oben und unten. Masseinsparungen werden durch lokal variierende Dicken erzielt und die beschriebenen Scheiben weisen nur an wenigen orten Löcher auf. Ein Teil der restlichen optimierten Struktur dient der Krafteinleitung in diese drei Scheiben.

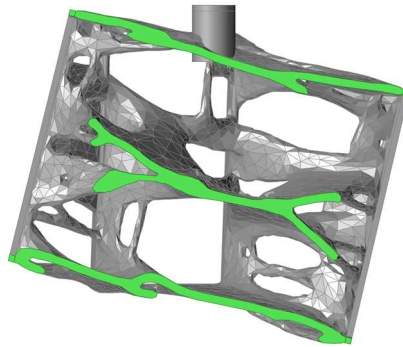


Abb. 83 Schnitt in YZ-Ebene des optimierten Knotens Nr. 470. Die Schnittflächen sind grün dargestellt.

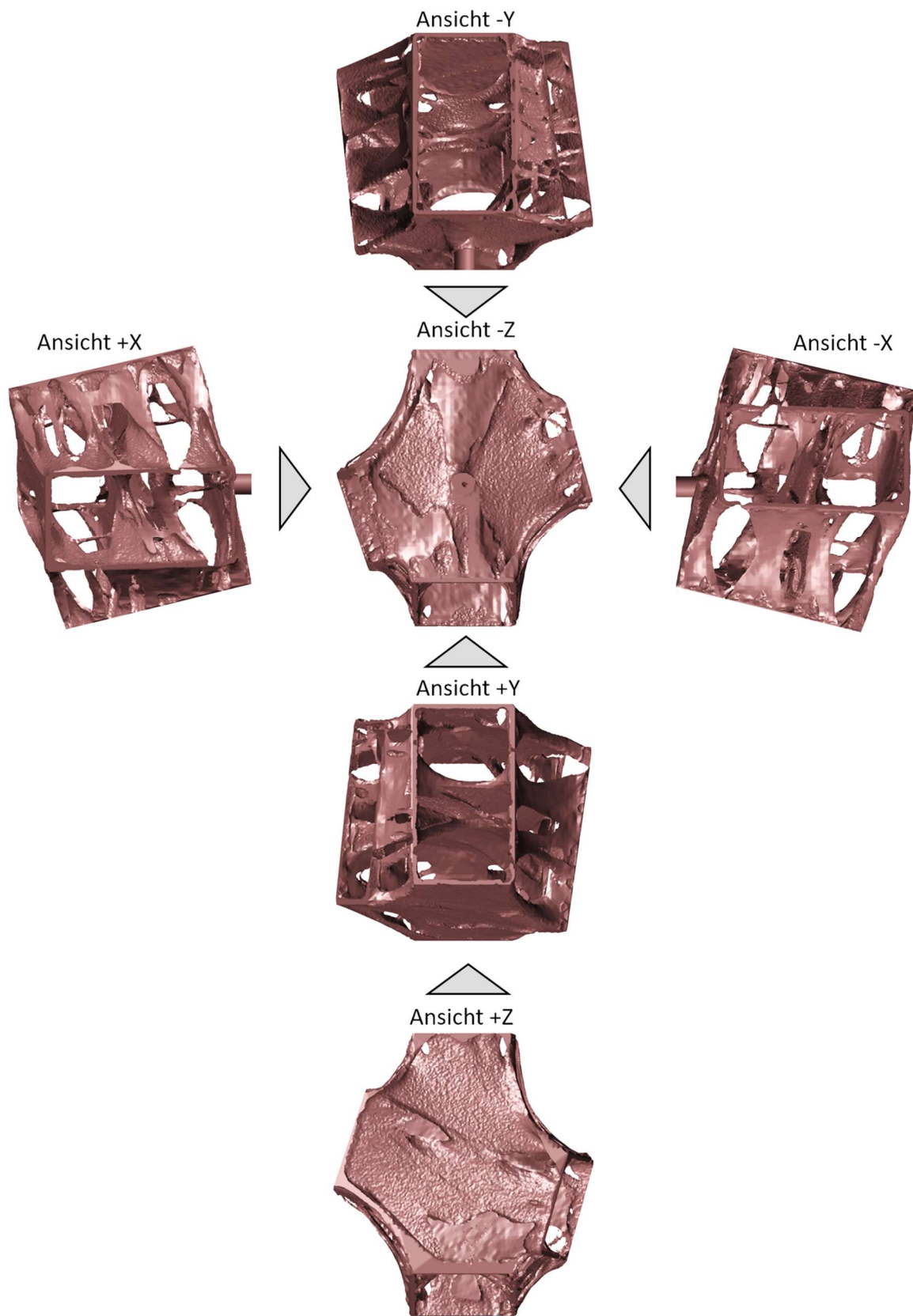


Abb. 84 Ansichten des optimierten Knotens Nr. 470

8.5 Postprocessing

Die beschriebenen Probleme mit der optimierten Form (siehe 8.4) führen zu einem ausführlichen Postprocessing. Als ersten Schritt ist es notwendig, alle nicht vollständig ausgebildeten Strukturen manuell zu rekonstruieren, dies erfolgt mithilfe von *Autodesk Meshmixer* (siehe 5.1.4) und ist in *Abb. 85* beispielhaft dargestellt.

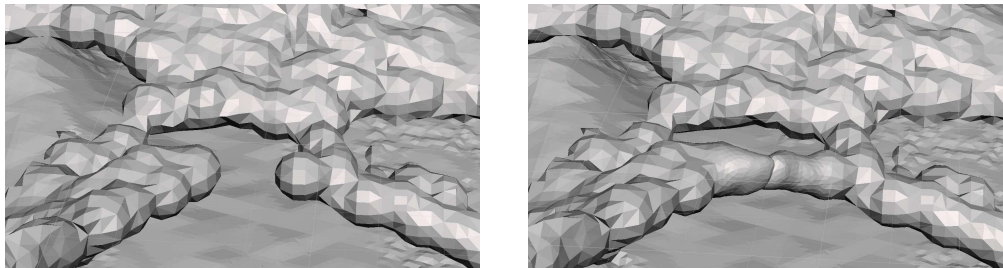


Abb. 85 Manuelle Reparatur von unterdrückten Strukturen

Um gegen die zu dünnen Strukturen vorzugehen werden anschließend alle auf mindestens 6 mm verdickt und verschmolzen (siehe *Abb. 86 links*). Die 6 mm werden bewusst größer als die gewünschte Mindestdicke von 4 mm festgelegt, da durch die Glättung (siehe *Abb. 86 rechts*) im nächsten Schritt die dünnen Stäbe im Durchmesser schrumpfen. Dieser Schritt ist notwendig um diese dünnen Stäbe tragfähig zu machen, allerdings werden dadurch auch die dünnen Bereiche der unter 8.4 beschriebenen Scheiben verdickt. Interessanterweise lässt sich beobachten, dass bei der Glättung eher die stabförmigen Bereiche an Dicke verlieren, die Scheibenförmigen eher nicht.

Für die einfachere weitere Verarbeitung und zum Garantieren eines guten Anschlusses der Stäbe werden, wie in *Abb. 87* gezeigt, Rahmen in die Form integriert. Diese Rahmen sorgen gleichzeitig für eine Mindeststeifigkeit, vor allem während der Herstellung.

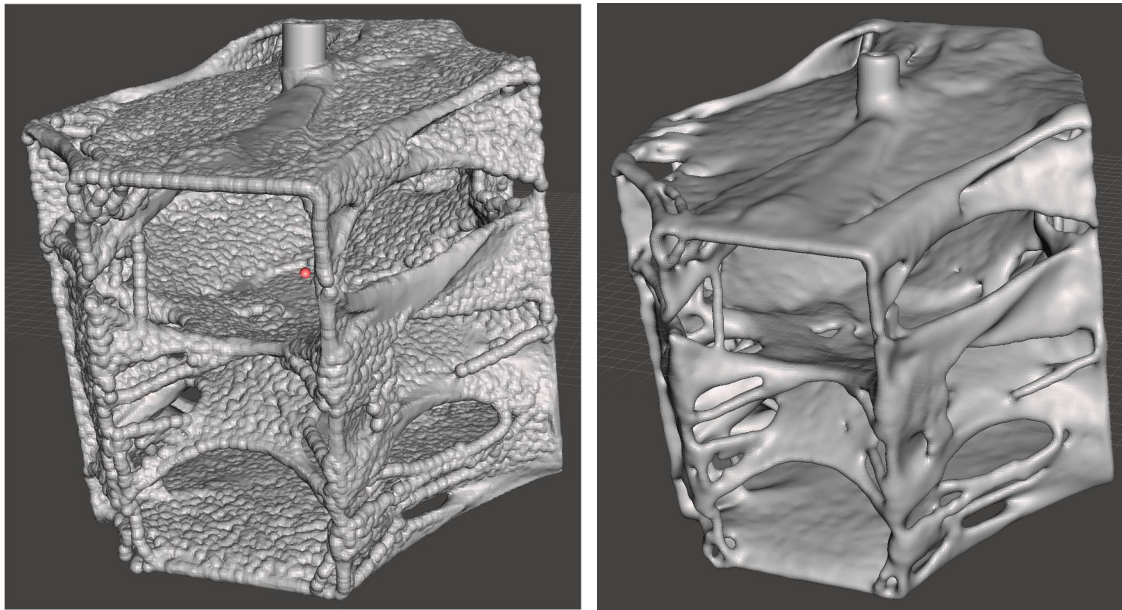


Abb. 86 Links: Verdickung aller Strukturelemente auf 6 mm, rechts: Glättung

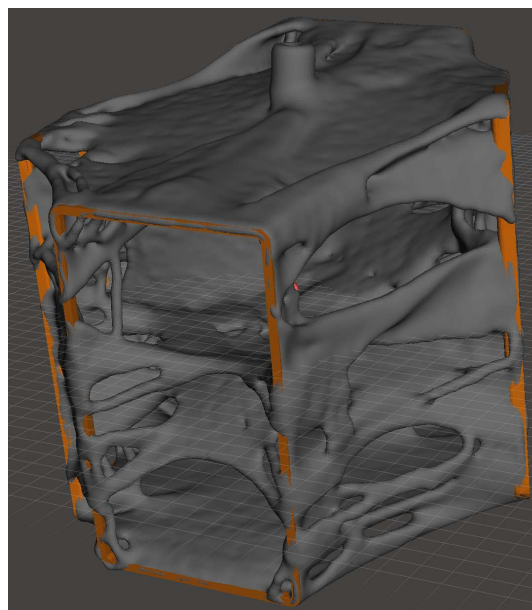


Abb. 87 Integrieren von Anschlussrahmen

Für die weitere Bearbeitung muss die Form in zwei Versionen aufgespalten werden, eine für die FE-Berechnung zur Validierung der Tragfähigkeit und eine für den 3D-Druck (siehe *Abb. 88*). Erstere unterscheidet sich dadurch, dass glatte Oberflächen für die Kraftanschlussvolumen aus *Abb. 80* geschaffen werden, die Oberfläche mit weniger Polygonen neu vernetzt und in eine STEP-Datei konvertiert werden muss. Die Version für den

3D-Druck fügt durch das *Grasshopper*-Skript generierte angeschrägte Volumen an, die ein Anschweißen der Stäbe ermöglichen sollen.

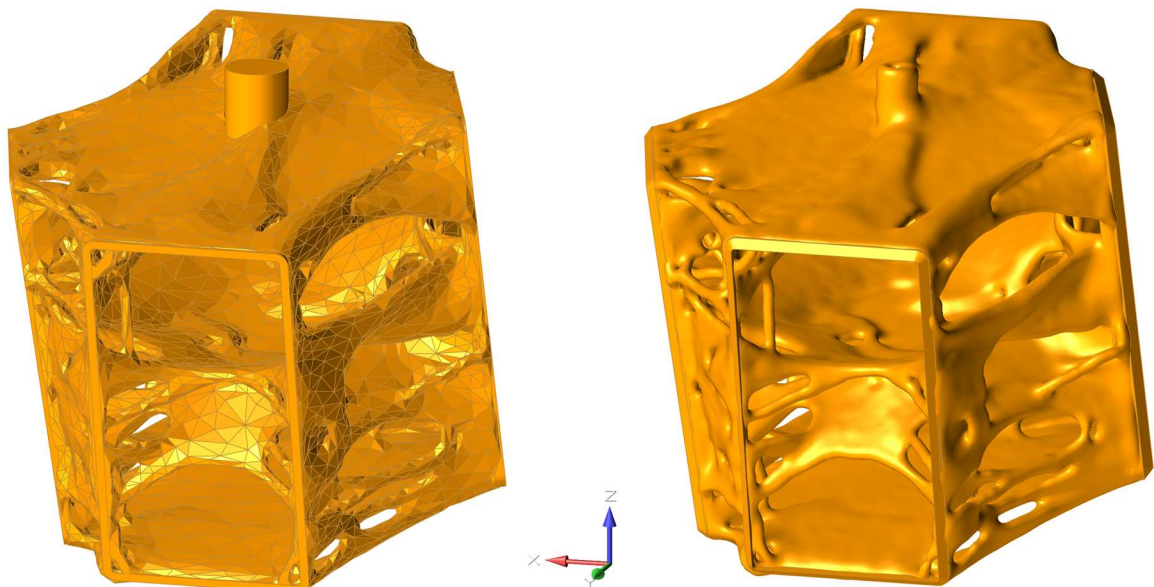


Abb. 88 Links: Geometrie für FE-Berechnung, rechts: Geometrie für den 3D-Druck

All diese Änderungen führen dazu, dass das Gewicht der überarbeiteten Geometrie auf 8,6 kg ansteigt, was laut *Tab. 8* einem Zuwachs von 57 % gegenüber dem rohen Optimierungsergebnis entspricht. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die Verdickung der Struktur in Bereichen, wo dies aus Sicht der Tragfähigkeit nicht notwendig wäre.

Tab. 8 Massenvergleich der Knotenvarianten

	Masse [kg]	Relativ zu Designvolumen	Relativ zum Optimierungsergebnis
Designvolumen	61,6	100 %	1122 %
Nach 1. Optimierungsschritt	12,5	20 %	228 %
Nach 2. Optimierungsschritt	5,5	9 %	100 %
Nach Postprocessing	8,6	14 %	157 %

8.6 Validierung

Der überarbeitete Knoten soll auf seine Tragfähigkeit überprüft werden, dafür wird die erstellte FE-Geometrie in *solidThinking Inspire* importiert und für alle drei relevanten Lastfälle berechnet. Als Kriterium für die Tragfähigkeit gilt der Sicherheitsfaktor, was das Verhältnis aus zulässiger Fließspannung und von Mises-Vergleichspannung darstellt. Die Resultate sind als

Ergebniskombination der drei Lastfälle in *Abb. 89* zusammengeführt. Es lässt sich erkennen, dass die Struktur in den meisten Bereichen nur geringfügig belastet ist und der Sicherheitsfaktor von 1,0 nur vereinzelt und sehr lokal unterschritten wird, weshalb dies vernachlässigt werden kann. Vor allem die dünneren Stäbe liegen nahe an ihrer Belastungsgrenze, was die Notwendigkeit einer Verdickung der dünnen Strukturen im Postprocessing bestätigt. Die unerwünschten Folgen der Verdickung zeichnen sich jedoch auch ab, vor allem in den drei erwähnten Scheiben, die große Belastungsreserven aufweisen.

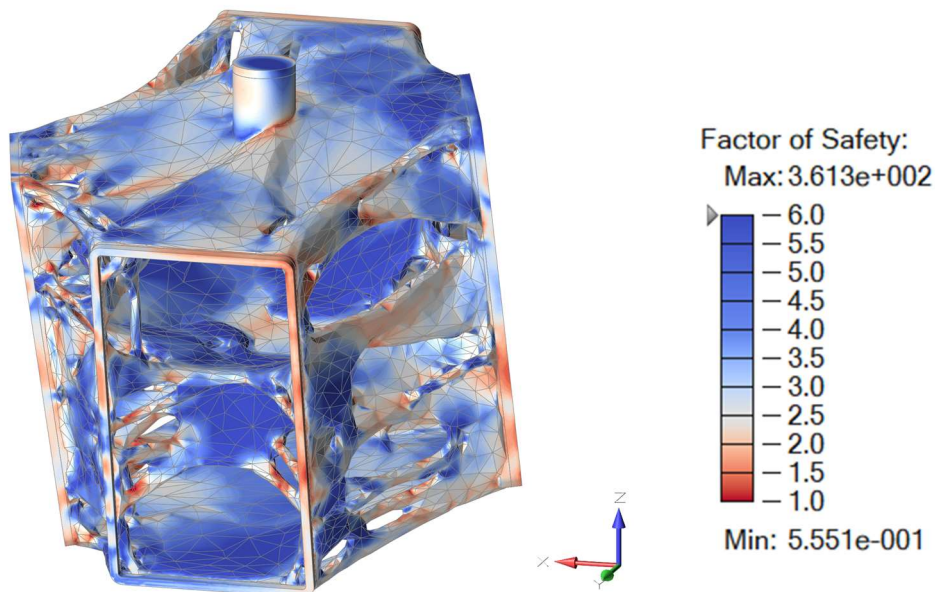


Abb. 89 FE-Berechnung des überarbeiteten Knotens Nr. 470

8.7 Additive Fertigung

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Beispielen aus Kapitel 6 und 7 existieren bereits etablierte Methoden und Maschinen für das 3D-Drucken von metallischen Teilen in dieser Größenordnung. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass das Drucken der Verbindungsknoten technisch möglich ist. Dies wird auch durch den in *Abb. 90* dargestellten repräsentativen Plastikdruck bestätigt. Es zeigt sich jedoch, dass auf Stützstrukturen nicht verzichtet werden kann. Die Stützstrukturen können aber durch manuelles Ausrichten des zu druckenden Teils auf ein Minimum reduziert werden.

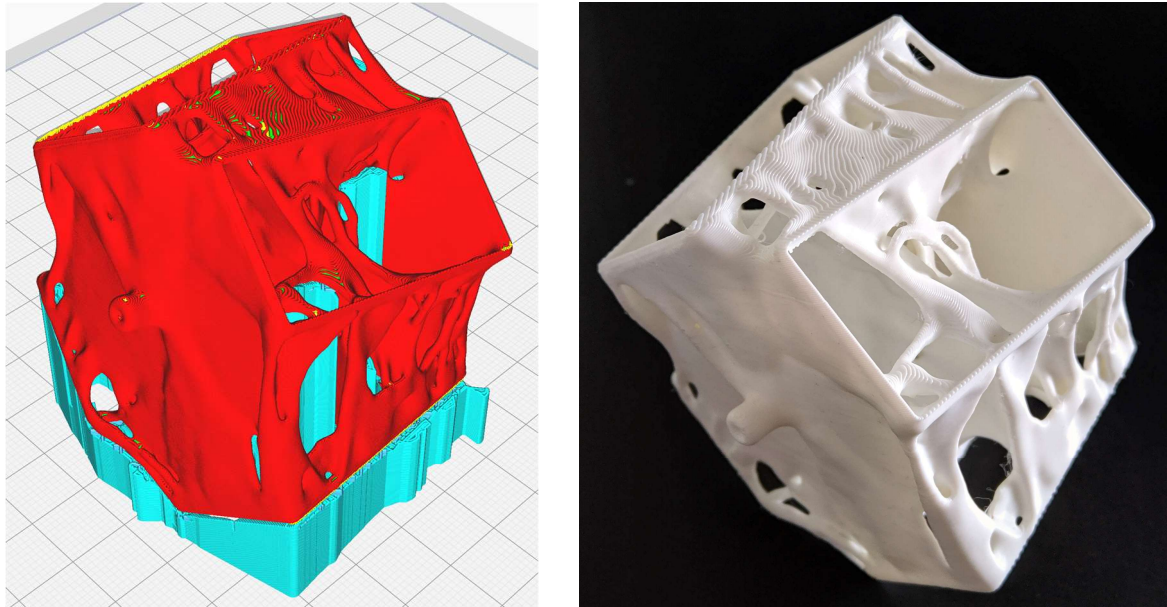


Abb. 90 3D-Druck des optimierten und überarbeiteten Verbindungsknotens. Links: Druckvorschau in *CURA* (mit Unterstützungsstruktur in Türkis), rechts: gedruckter Knoten im Maßstab 1:4

8.8 Erkenntnisse

Es ist gelungen mithilfe der Topologieoptimierung und der Additiven Fertigung einen tragfähigen und umsetzbaren Verbindungsknoten zu erzeugen, jedoch macht der erforderliche Arbeitsaufwand und die angetroffenen Probleme einen derzeitigen Einsatz in der Praxis unwahrscheinlich. Dies gilt vor allem für eine Dachkonstruktion mit hunderten Verbindungsknoten.

Das größte Problem im betrachteten Beispiel ist der relativ große Designraum im Vergleich zum Optimierungsergebnis, was zu schlechteren Resultaten, zu einer aufwendigeren Optimierung und zu Programmlimitierungen bzw. Instabilitäten führen kann. Die Optimierung in zwei Schritten kann in diesem Fall vorteilhaft sein, jedoch wirkt sich diese gleichzeitig negativ auf das Ergebnis aus. Denn der mögliche Lösungsraum wird stark eingeschränkt und muss nicht die optimale Lösung enthalten.

Das aufwendige Postprocessing hat sich für die Tragfähigkeit des betrachteten Knotens als notwendig erwiesen, führt jedoch zur Überdimensionierung. Eine Möglichkeit die erhaltene Struktur nachträglich noch einer weiteren Optimierung zu unterziehen, um überschüssiges Material zu entfernen, bedarf einer zusätzlichen Untersuchung. Denn mit der Masse der erhaltenen Struktur sind nur geringe Einsparungen gegenüber herkömmlichen Konstruktionen zu erwarten. Jedoch ist eine Zukunft vorstellbar, in der die Additive Fertigung wesentlich günstiger als das Produzieren mit herkömmlichen Methoden ist und so auch eine geringe

Einsparung von Material die Produktion beschleunigen kann. Dafür muss die Automatisierung des Workflows jedoch vorausgesetzt sein. Dies hat bei der Ausarbeitung dieses Beispiels bis zum Import in die Topologieoptimierungs-Software gut funktioniert. Dort treten jedoch Probleme wie die Einwirkungseingabe und das aufwändige Postprocessing auf, was einen hohen manuellen Aufwand aktuell unausweichlich macht.

9 Zusammenfassung

Die Topologieoptimierung ist keine klassische Optimierung, vielmehr ist es eine Methode zum Generieren des gesamten Tragsystems. Somit restrukturiert sie den gesamten Entwurfsprozess und verlangt nach neuen Herstellungsverfahren. Es hat sich gezeigt, dass diese alternative Vorgehensweise im Bauwesen sinnvollen Einsatz finden kann. Jedoch ist anzunehmen, dass sich die Methode aus wirtschaftlichen Gründen zunächst nur für Nischenanwendungen etablieren kann und die Möglichkeiten des Bauwesens derzeit nur geringfügig bereichert.

Es lässt sich festhalten, dass vor allem Fertigteile für diese Art der Optimierung geeignet sind, da sich der hohe Arbeitsaufwand über die höhere Stückzahl amortisieren kann. Ebenso zeigt sich, dass kleinere Teile aufgrund der bestehenden Produktionsmöglichkeiten zu bevorzugen sind. Ein weiterer möglicher Anwendungsfall findet sich bei Bauteilen mit komplexen Randbedingungen, da die Topologieoptimierung und die Additive Fertigung auch dafür im Stande sind brauchbare Ergebnisse zu liefern.

9.1 Einschätzung der aktuellen Umsetzbarkeit

Im gesamten aufgezeigten Workflow der Topologieoptimierung und Additiven Fertigung zeigt sich, dass die eingesetzte Software derzeit noch nicht ausgereift ist. Das Ökosystem an Entwurfs-, Optimierungs-, Nachbearbeitungs- und Produktionssoftware weist häufig Probleme an den Schnittstellen auf. Dies trägt maßgebend zur unnötigen Komplexität des Workflows bei. Besonders hervorzuheben ist der problembehaftete Datenaustausch über das veraltete STL-Format. Der Workflow leidet ebenso unter Instabilitätsproblemen der eingesetzten Software, sowie Hardwarelimitierungen für die Berechnung. Als Konsequenz führt dies zu unerwünschten Kompromissen, wie beispielsweise die Optimierung in zwei Schritten (siehe Kapitel 8.3). Trotz all dieser auftretenden Probleme gelingt es, einsatzfähige Bauteile zu entwerfen, wenn auch unter erheblichen Mehraufwand in der Planung.

Die Additive Fertigung hingegen erscheint zum aktuellen Zeitpunkt nur für kleine Bauteile realistisch. Auch die Materialien sind dabei noch vor allem auf Metalle und Kunststoffe ausgerichtet, was die Anwendungsmöglichkeit im Bauwesen einschränkt. Für Beton- und Betonverbundbauteile fehlt ein etablierter Prozess, der den weitläufigen Einsatz ermöglichen könnte.

Trotz der vielen auftretenden Probleme und Limitierungen beweist die Ausarbeitung der Beispiele die Umsetzbarkeit zum aktuellen Zeitpunkt, zumindest für einige Bereiche. Es ist

jedoch davon auszugehen, dass sie derzeit für keinen der untersuchten Anwendungsfälle wirtschaftlich zu sein scheint.

9.2 Verbesserungsvorschläge

Für ein mögliches Durchsetzen der Topologieoptimierung in der Baubranche muss sich vor allem die Software verbessern. Die Stabilität und die Probleme an den Programmschnittstellen müssen behoben werden. Letzteres könnte durch Integration aller beschriebenen Arbeitsschritte in ein einzelnes Softwarepaket erfolgen oder durch neue Dateiformate, die den verlustfreien Datenaustausch ermöglichen und die Volumen fehlerfrei beschreiben können. Die Software muss sich aber auch in Hinsicht auf den Funktionsumfang verbessern. Die erhältlichen kommerziellen Programme richten den Fokus auf den Maschinenbau, deshalb fehlen für das Bauwesen essenzielle Funktionen. So sollte das Materialmodell erweitert werden, um vor allem Beton besser zu simulieren, aber auch um Verbundwerkstoffe wie Stahlbeton optimieren zu können. Die wichtigste meist fehlende Funktion ist die Limitierung der maximalen Durchbiegung, was im Hochbau häufig das maßgebende Bemessungskriterium darstellt.

Die Nachoptimierung der von der Optimierung erhaltenen Oberfläche sollte für die Praxistauglichkeit ebenso in Betracht gezogen werden. Gemeint ist eine Optimierung, die an stark belasteten Bereichen Masse hinzufügt, an schwach belasteten hingegen Masse einspart und gleichzeitig die Oberfläche glättet, wodurch das aufwendige Postprocessing ersetzt werden könnte. Die Topologie würde dabei laut Definition (siehe Kapitel 3.1.1) jedoch beibehalten, da keine neuen Löcher eingefügt werden.

Die Produktionsmöglichkeiten hingegen sollten sich für das Bauwesen vor allem im Druck von Beton verbessern, um zuverlässige, tragfähige und auch große Bauteile bzw. ganze Bauwerke herstellen zu können. Ansonsten stellen die hohen Kosten das größte zu behebende Problem für die Produktion dar.

9.3 Ausblick

Neben erwartungsgemäßen inkrementellen Verbesserungen in Software und Herstellung wird in Zukunft eventuell auch eine teilautomatisierte Planung möglich sein, wodurch der große zusätzliche Arbeitsaufwand wegfällt und die Topologieoptimierung ökonomischer werden kann. Sollte in ferner Zukunft auch künstliche Intelligenz in der Baubranche Fuß fassen, so könnte die Topologieoptimierung ein ideales unterstützendes Tool dafür sein, da es die Intuition eines Ingenieurs zum Teil ersetzen könnte. Die Bauteile würden damit direkt nach ihrem Kraftfluss

generiert und die Abstrahierung in Einzelelemente wie Stäbe, Scheiben, Platten, Bögen und deren optimale Kombinationen eventuell unnötig machen. Somit könnte die Topologieoptimierung den Grundstein für eine vollautomatische Planung legen, deren Umsetzung durch die Additive Fertigung möglich wird.

10 Literaturverzeichnis

- [1] E. Schuler, „Tragwerk und Form Teil 2: Effizienz und Optimierung von Tragsystemen,“ 05 2016. [Online]. Available: www.gbd.at/skripten/2%20Tragwerk%20und%20Form%20-%20Effizienz%20von%20Tragsystemen.pdf. [Zugriff am 28 02 2017].
- [2] J. Wagner und H.-P. Mlejnek, Vorlesungsunterlagen Tragwerksoptimierung, Stuttgart: Universität Stuttgart: Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, 2013.
- [3] W. Führer, Der Entwurf von Tragwerken, Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 1995.
- [4] K.-E. Kurrer, Geschichte der Baustatik, Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2003.
- [5] W. Schönbrodt-Rühl, 23 06 2014. [Online]. Available: <http://xn--schnbrodt-rhl-kmb2h.de/pruefen/reithalle-friedersdorf/>. [Zugriff am 04 03 2017].
- [6] D. Killer. [Online]. Available: http://at.worldmapz.com/photo/134334_de.htm. [Zugriff am 04 03 2017].
- [7] Partner Schlaich Bergermann, „<http://www.sbp.de/>,“ [Online]. Available: www.sbp.de/themenwelt/formfindung. [Zugriff am 06 03 2017].
- [8] R. Marmulla, „Wikimedia Commons,“ 25 06 2008. [Online]. Available: commons.wikimedia.org/wiki/File:SagradaFamiliaStatikmodell.jpg. [Zugriff am 06 03 2017].
- [9] R. Kemmler, „Formfindung: Die Interaktion von Kraft und Geometrie,“ *Stahlbau*, Bd. 81, Nr. 6, 2012.
- [10] H. Engel, Tragsysteme, Oberhausen: Gerd Hatje Verlag, 1997.
- [11] W. Nachtigall und G. Pohl, Bau-Bionik, Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [12] K.-M. Tam, K. Mueller, J. Coleman und N. Fine, „Tsuboi Proceedings Award Paper for 2015: Stress Line Additive Manufacturing (SLAM) for 2.5-D Shells,“ *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS)*, Nr. Vol. 57 (2016) No. 4 December n. 190, pp. 251-252, 2016.
- [13] P. L. Nervi, Bauten und Projekte, Stuttgart, Teufen: Niggli, 1957.
- [14] „www.femopt.de,“ FEMopt Studios GmbH, [Online]. Available: <http://www.femopt.de/index.php/de/kompetenzen/strukturoptimierung.html>. [Zugriff am 15 03 2017].
- [15] D. Rutten, „www.grasshopper3d.com,“ 25 09 2010. [Online]. Available: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>. [Zugriff am 15 03 2017].
- [16] A. Lipka, „Verbesserter Materialeinsatz innovativer Werkstoffe durch die Topologieoptimierung,“ Institut für Baustatik und Baudynamik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [17] L. Harzheim, Strukturoptimierung Grundlagen und Anwendung, Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 2008.
- [18] G. I. N. Rozvany, „A critical review of established methods of structural topology optimization,“ in *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Springer, 2009, pp. 217-237.
- [19] T. Putke und P. Mark, „Fachwerkmodellbildung mit topologischen Optimierungsverfahren,“ *Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 9*, pp. 618-627, 2014.
- [20] „DUDEN,“ [Online]. Available: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Topologie>. [Zugriff am 15 03 2017].
- [21] A. Aremu, I. Ashcroft, R. Hague, R. Wildman und C. Tuck, „Suitability of SIMP and BESO Topology Optimization Algorithms for Additive Manufacture,“ in *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference*, 2010.
- [22] X. Huang und Y. Xie, Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [23] M. Y. Wang, X. Wang und D. Guo, „A level set method for structural topology optimization,“ *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Nr. 192, p. 227-246, 2003.
- [24] L. Harzheim, G. Graf und S. Klug, „Topologieoptimierung im praktischen Einsatz,“ *Automobiltech Z (1999) 101: 530*, pp. 530-539, 1999.

- [25] D. Weinberg und M. Smell, „Autodesk University,“ 2016. [Online]. Available: <http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/classes/year-2016/nastran/sim15442#chapter=0>. [Zugriff am 05 02 2017].
- [26] „Altair University,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.altairuniversity.com/optimization/topology/>. [Zugriff am 19 03 2017].
- [27] J. Schneider, Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure, vdf Hochschulverlag AG, 1996.
- [28] M. Herrmann, Gradientenbeton - Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile, Universität Stuttgart: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, 2015.
- [29] B. A. Beckert, „Structural Innovation,“ *Concept To Reality*, Nr. Spring/Summer, pp. 10-12, 2009.
- [30] „Altair HyperWorks,“ [Online]. Available: <http://www.altairhyperworks.com/industry/Architecture>. [Zugriff am 20 03 2017].
- [31] B. Davison und G. W. Owens, „Case study: Sidra Trees, Qatar Convention Centre, Doha,“ in *Steel designers' manual*, Oxford, Wiley-Blackwell, 2012, pp. 231-232.
- [32] N. Garrido, Artist, [Art]. 2011.
- [33] S. Zeidan, „sintef.no,“ [Online]. Available: https://www.sintef.no/contentassets/ec0e7d544b83407f93a1f3e6bdb7de96/zeidan_applied-topology-optimization.pdf. [Zugriff am 31 03 2017].
- [34] S. Galjaard, S. Hofman und S. Ren, „New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing,“ in *Advances in Architectural Geometry 2014*, Springer, 2015, pp. 79-93.
- [35] P. Fastermann, 3D-Drucken - Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert (2., aktualisierte Auflage), Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [36] C. Feldmann und A. Pumpe, 3D-Druck – Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016.
- [37] D. Brackett, I. Ashcroft und R. Hague, Topology optimization for additive manufacturing, Loughborough: Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, 2011.
- [38] „NextGen Spaceframe by EDAG,“ *WOMag*, Bd. 5, Nr. 06, pp. 4-7, 2016.
- [39] R. Lachmayer, R. B. Lippert und T. Fahlbusch, 3D-Druck beleuchtet Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [40] P. Fastermann, 3D-Drucken Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert 2., aktualisierte Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016.
- [41] H. Strauß, AM Envelope The potential of Additive Manufacturing for façade construction, Architecture and Built environment TU Delft, 2013.
- [42] Planet Research - TU Graz, „tugraz.at,“ 22 02 2019. [Online]. Available: <https://www.tugraz.at/tugraz/services/news-stories/tu-graz-news/einzelansicht/article/der-3d-drucker-lernt-haeuser-zu-bauen/>. [Zugriff am 24 09 2019].
- [43] M. Näther, V. N. Nerella, M. Krause, G. Kunze, V. Mechtcherine und R. Schach, „Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2017.
- [44] J. Teizer, A. Blickle, M. König, H. Mattern, O. Leitzbach, T. King und D. Guenther, „3D-Druck im Sonderschalungsbau,“ *VDI-Bautechnik*, Nr. Jahresausgabe 2017/2018.
- [45] Altair, „solidthinking.com,“ [Online]. Available: <https://solidthinking.com/faq.aspx?id=8210>. [Zugriff am 11 10 2019].
- [46] ÖNORM EN 1990: Tabelle A1.2, 2013-03-15.
- [47] ÖNORM EN 1991-2, 2012.
- [48] ÖNORM B 1991-2, 2011.
- [49] ÖNORM EN 1990: Tabelle A.1.1, 2013-03-15.
- [50] ÖNORM EN 1991-1-1, 2011.
- [51] ÖNORM B 1991-1-1, 2011.

- [52] ÖNORM B 1991-1-3 9.2.5.4, 2013.
- [53] ÖNORM B 1991-1-4:2013 Tabelle 1, 2013.
- [54] ÖNORM EN 1991-1-5:2003 +AC:2009 5 Temperaturunterschiede in Gebäuden, 2012.
- [55] ÖNORM EN 1990: Formel (6.10), 2013-03-15.
- [56] ÖNORM B 1990-1 Tabelle 2, 2013-01-01.
- [57] ÖNORM EN 1990: Formel (6.14b), 2013-03-15.

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Profilierungsfaktoren verschiedener Querschnitte [3].....	7
Abb. 2	Galileo Galilei: Gestaltung eines Kragbalkenquerschnitts [2].....	8
Abb. 3	Links: Statisch bestimmter Dreigelenksrahmen [5], rechts: Statisch unbestimmte Autobahnbrücke A3 Passau [6]	8
Abb. 4	Vergleich der Ausnutzung nach Schnittkraftart (Elastisch).....	9
Abb. 5	Formfindung mit unterschiedlichen Lasten	10
Abb. 6	Hängendes Statikmodell der Sagrada Família [8]	10
Abb. 7	Links: Decke von Pier Luigi Nervi [13], rechts: Decke des alten Biologie-Hörsaals der Universität Freiburg [11].....	12
Abb. 8	Teilbereiche der Strukturoptimierung [16].....	13
Abb. 9	Zusammenhang aus Dichte ρ und Steifigkeit E [17]	14
Abb. 10	Zwischenschritte einer Optimierung (a) Iteration 10, (b) Iteration 30, (c) Iteration 50, (d) Iteration 70, (e) Iteration 80, (f) Iteration 96 [22]	15
Abb. 11	Vergleich von konventionellem Designprozess und jenem mit integrierter Topologieoptimierung [24]	16
Abb. 12	Auswirkung der Netzfeinheit [19].....	20
Abb. 13	Unterdrückung von weniger belasteten Strukturen.....	22
Abb. 14	Tragstruktur White Magnolia Plaza, Shanghai China [30].....	24
Abb. 15	Qatar National Convention Centre im gebauten Zustand (Oben) [32] und das Simulationsmodell (Unten) [33].....	24
Abb. 16	Gradientenbeton [28].....	25
Abb. 17	Vergleich eines traditionellen Knotens (links) mit dem Topologieoptimierten (Mitte) und den für die Produktion angepassten (rechts) [34]	26
Abb. 18	NextGen Spaceframe Knoten (EDAG Engineering GmbH) [38].....	28
Abb. 19	Überblick von Druckverfahren [36]	30
Abb. 20	Schichtenaufbau FDM.....	32
Abb. 21	Workflow des AM [39]	33
Abb. 23	SolidThinking Inspire GUI für Topologieoptimierung. Links: Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit, rechts: Massenreduktion mit Spannungsrestriktion.....	37
Abb. 25	Größenskala der Einsatzmöglichkeiten der Topologieoptimierung im Bauwesen	42
Abb. 26	Abmessungen der untersuchten Brücke (Design-Volumen) (links oben: Draufsicht, rechts oben: Isometrie, links unten: Seitenansicht längs, rechts unten: Seitenansicht quer).....	43
Abb. 27	Berechnungsmodell 2D-Brücke in solidThinking Inspire	46
Abb. 28	Unbearbeitete optimierte Form (Steifigkeit maximieren, 20 % Restvolumen)	47
Abb. 29	Unstetigkeitsstellen (grüne Kreise).....	47
Abb. 30	Optimierte Form nachgezeichnet.....	48
Abb. 31	Optimiertes Volumen manuell überarbeitet.....	48
Abb. 32	Verformung der optimierten Form, nicht bearbeitet (5x Überhöhung)	49
Abb. 33	Verformung der optimierten Form, manuell nachgezeichnet (100x Überhöhung).....	49
Abb. 34	Verformung der optimierten Form, manuell überarbeitet (100x Überhöhung)	50
Abb. 35	Berechnungsmodell 3D-Brücke mit Lasten, Auflagern und Symmetriebedingungen.....	52
Abb. 36	3D-Brücke isometrische Perspektive (ohne Deckplatte)	53

Abbildungsverzeichnis

Abb. 37	3D-Brücke Ansicht Seite längs.....	53
Abb. 38	3D-Brücke Ansicht quer (ohne Auflageplatte)	53
Abb. 39	3D-Brücke Ansicht unten	53
Abb. 40	3D-Brücke Schnitt Randstruktur (Grün = Schnittfläche).....	54
Abb. 41	3D-Brücke Schnitt Fahrbahnrand (Grün = Schnittfläche)	54
Abb. 42	3D-Brücke Schnitt Zentrum (Grün = Schnittfläche).....	54
Abb. 43	3D-Brücke horizontaler Schnitt -1,5 m.....	55
Abb. 44	3D-Brücke horizontaler Schnitt -1,0 m.....	55
Abb. 45	3D-Brücke horizontaler Schnitt -0,5 m.....	56
Abb. 46	3D-Brücke horizontaler Schnitt -0,1 m.....	56
Abb. 47	Grundrisse der untersuchten Decken. Links: Lagerung durch Stützen, rechts: Lagerung durch Wände	60
Abb. 48	Untersuchte Decken im Grundriss und Schnitt, sowie entsprechendes statisches System. Das Design-Volumen ist mit Rot gekennzeichnet.	61
Abb. 49	Berechnungsmodell für die Optimierung in <i>solidThinking Inspire</i> . Die roten Bereiche stellen das Design-Volumen dar. Links: 40 cm Decke auf Stützen, Mitte: 80 cm Decke auf Stützen, rechts: 40 cm Decke auf Mauern.....	62
Abb. 50	Optimierte 40 cm Decken auf Stützen ohne Deckplatte. Links: <i>Fusion 360</i> , rechts: <i>solidThinking Inspire</i>	63
Abb. 51	Hauptspannungsrichtungen der Decke auf Stützen.....	63
Abb. 52	Schnitt (-0,10m) durch optimierte 40 cm Decken auf Stützen.....	64
Abb. 53	Schnitt (-0,20m) durch optimierte 40 cm Decken auf Stützen.....	64
Abb. 54	Schnitt (-0,30m) durch optimierte 40 cm Decken auf Stützen.....	65
Abb. 55	Optimierte 80 cm Decken auf Stützen ohne Deckplatte. Links: <i>Fusion 360</i> , rechts: <i>solidThinking Inspire</i>	65
Abb. 56	Schnitt (-0,10m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen.....	66
Abb. 57	Schnitt (-0,20m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen.....	66
Abb. 58	Schnitt (-0,30m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen.....	66
Abb. 59	Schnitt (-0,40m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen.....	67
Abb. 60	Schnitt (-0,50m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen.....	67
Abb. 61	Schnitt (-0,60m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen.....	67
Abb. 62	Schnitt (-0,70m) durch optimierte 80 cm Decken auf Stützen.....	68
Abb. 63	Optimierte Decken auf Wänden ohne Deckplatte. Links: <i>Fusion 360</i> , rechts: <i>solidThinking Inspire</i> ..	68
Abb. 64	Hauptspannungsrichtungen der Decke auf Wänden	69
Abb. 65	Schnitt der 40 cm Decke auf Wänden aus <i>solidThinking Inspire</i> mit überlagertem abstrahiertem Fachwerkmodell in Rot.....	69
Abb. 66	Schnitt (-0,10m) durch optimierte 40 cm Decken auf Wänden	70
Abb. 67	Schnitt (-0,20m) durch optimierte 40 cm Decken auf Wänden	70
Abb. 68	Schnitt (-0,30m) durch optimierte 40 cm Decken auf Wänden	70
Abb. 69	Verformungsfigur der 40 cm Decke auf Stützen (300x Überhöhung). Links: <i>Fusion 360</i> , rechts: <i>solidThinking Inspire</i>	71
Abb. 70	Verformungsfigur der 80 cm Decke auf Stützen (300x Überhöhung). Links: <i>Fusion 360</i> , rechts: <i>solidThinking Inspire</i>	71

Abb. 71	Verformungsfigur der 40 cm Decke auf Wänden (300x Überhöhung). Links: <i>Fusion 360</i> , rechts: <i>solidThinking Inspire</i>	72
Abb. 72	40 cm Decke auf Stützen mit Unterzügen	72
Abb. 73	3D-Druck der optimierten 40 cm Decke auf Stützen ohne Deckplatte. Links: Druckvorschau in <i>CURA</i> , rechts: gedruckte Decke.....	74
Abb. 74	Gesamtes <i>Grasshopper</i> Skript für die parametrische Modellierung.....	77
Abb. 75	Tragsystem der Überdachung.....	78
Abb. 76	Teil 1/3 des <i>Grasshopper</i> Skripts der für die Modellierung des Tragsystems und die statische Berechnung verantwortlich ist.....	78
Abb. 77	Links: Position des untersuchten Knotens Nr. 470, rechts: 3D Ansicht des Knotens (Designraum in Rot)	79
Abb. 78	Teil 2/3 des <i>Grasshopper</i> Skripts für die Bestimmung von Kennwerten (Position, Schnittkräfte und anschließende Stäbe) eines ausgewählten Verbindungsknotens.....	80
Abb. 79	Teil 3/3 des <i>Grasshopper</i> Skripts für das Erstellen aller Körper, die für die Topologieoptimierung und die Fertigung benötigt werden.....	80
Abb. 80	Optimierungsgeometrie für Knoten Nr. 470. Links: Designraum in Rot, Mitte: Anschlussvolumen in Grau, rechts zusammengesetzte Optimierungsgeometrie	81
Abb. 81	Optimierungsmodell für Knoten Nr. 470.....	81
Abb. 82	Optimierung von Knoten Nr. 470 in zwei Schritten: Ergebnis des ersten Schrittes (Sicherheitsfaktor 2,0)	82
Abb. 83	Schnitt in YZ-Ebene des optimierten Knotens Nr. 470. Die Schnittflächen sind grün dargestellt.	83
Abb. 84	Ansichten des optimierten Knotens Nr. 470.....	84
Abb. 85	Manuelle Reparatur von unterdrückten Strukturen.....	85
Abb. 86	Links: Verdickung aller Strukturelemente auf 6 mm, rechts: Glättung	86
Abb. 87	Integrieren von Anschlussrahmen	86
Abb. 88	Links: Geometrie für FE-Berechnung, rechts: Geometrie für den 3D-Druck	87
Abb. 89	FE-Berechnung des überarbeiteten Knotens Nr. 470	88
Abb. 90	3D-Druck des optimierten und überarbeiteten Verbindungsknotens. Links: Druckvorschau in <i>CURA</i> (mit Unterstützungsstruktur in Türkis), rechts: gedruckter Knoten im Maßstab 1:4	89

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Internationale Forschungsprojekte zum Thema Beton 3D-Druck [43].....	35
Tab. 2	Verwendete Materialien.....	39
Tab. 3	Teilsicherheitswerte [46]	44
Tab. 4	Nutzlasten nach Lastmodell 1 [49]	45
Tab. 5	Variantenvergleich.....	50
Tab. 6	Vergleich der optimierten Decken	73
Tab. 7	Lastfälle	76
Tab. 8	Massenvergleich der Knotenvarianten.....	87
Tab. 9	Kombinationsbeiwerte [47]	103

Anhang

Anhang A: Lastannahme für die Dachkonstruktion aus dem Anwendungsbereich Stahlknoten

Eigengewicht

Für die Berechnung des Gesamtsystems wird das Eigengewicht der Stahlträger ($78,5 \text{ kN/m}^3$) je nach eingesetztem Profil von der FE-Software verrechnet. Für die Glaseindeckung ($25,0 \text{ kN/m}^3$) wird eine gleichmäßige Flächenlast für einen 2 cm starken Aufbau angesetzt, dies ergibt $0,5 \text{ kN/m}^2$ als charakteristischen Wert bezogen auf die wahre Fläche (im Gegensatz zur Projizierten).

Nutzlast

Die ÖNORM B 1991-1-1 [39] legt für die Nutzlast eine Flächenlast ($q_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$) und eine Einzellast ($Q_k = 1,5 \text{ kN}$) für Dachkonstruktionen der Kategorie H fest. Für die weiteren Berechnungen werden die Nutzlasten jedoch zugunsten der Wind und Schneelasten vernachlässigt, wie in ÖNORM EN 1991-1-1 vorgeschlagen.

Schneelast

Die lokalen Kennwerte für die Schneelast werden nach ÖNORM B 1991-1-3 Tabelle A.1 wie folgt bestimmt:

Ort:	Graz – Zentrum
Seehöhe:	369 m
Last Zone:	2
S_k :	$1,65 \text{ kN/m}^2$
C_e :	1,00
C_t :	1,00
μ_w :	2,80 (für eine Grabensituation gemäß ÖNORM B 1991-1-3 [52])

Annahmen: $b = 6 \text{ m}$ und $h_{1/2} = 6 \text{ m}$)

Die charakteristische Schneelast auf der Dachfläche errechnet sich mit den gegebenen Kennwerten:

$$S = \mu_i * C_e * C_t * S_k = 2,80 * 1 * 1 * 1,65 = 4,62 \text{ kN/m}^2$$

Windlast

Die lokalen Kennwerte werden nach ÖNORM B 1991-1-4 Tabelle A.1 wie folgt festgelegt:

Ort:	Graz
Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$:	20,4 m/s
Basisgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$:	0,26 kN/m ²

Für Geländekategorie IV errechnet sich daraus der Spitzengeschwindigkeitsdruck q_p :

$$q_p = q_{b,0} * 1,2 * \left(\frac{z}{10}\right)^{0,38} \quad z_{min} = 15 \text{ m} \quad [53]$$

$$q_p = 0,26 * 1,2 * \left(\frac{15}{10}\right)^{0,38} = 1,66 \text{ kN/m}^2$$

Aufgrund der komplexen Geometrie wird der Außendruck vereinfacht wie für ein Flachdach mit Attika berechnet. Dabei wird das höchste durch die EN 1991-1-4 Tabelle 7.2 vorgegebene Höhenverhältnis $h_p/h=0,10$ angenommen und die Last für Bereich H auf die gesamte Dachfläche angesetzt. Somit ergibt sich der Außendruckbeiwert $c_{pe,10}$ von 0,7.

Der charakteristische Winddruck errechnet sich durch die Kombination des ungünstigsten Innen- und Außendrucks:

$$W_k = q_p(z) * (c_{pe} - c_{pi}) = 1,66 \text{ kN/m}^2 * (-0,7 - 0,2) = -1,49 \text{ kN/m}^2$$

Temperatureinwirkungen

Die Effekte von Temperaturschwankungen werden für den Fall der Erhitzung durch vollflächige Sonnenbestrahlung im Sommer errechnet. Die Tragstruktur soll sich dabei im kontrollierten Klima des Innenraumes befinden.

Kennwerte nach ÖNORM EN 1991-1-5 [54]:

Montagetemperatur T_0 :	20°C
Innentemperatur Sommer T_{in} :	25°C
Relative Absorption:	0,9
Temperaturdifferenz aus Sonneneinstrahlung T_5 :	42°C

Daraus errechnet sich die anzusetzende Temperaturdifferenz wie folgt:

$$\Delta T = T_{in} - T_0 + T_5 = 25^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} + 42^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 47^\circ\text{C}$$

Lastkombinationen

Die Topologieoptimierung erfolgt im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) unter folgender Einwirkungskombination: $E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$ [55] mit den Kombinationsbeiwerten aus *Tab. 9*.

Tab. 9 Kombinationsbeiwerte [49]

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Schneelasten im Hochbau – Höhe < 1000 m ü. NN	0,5	0,2	0
Windlasten im Hochbau	0,6	0,2	0

Unterschieden wird für die verschiedenen Lastfälle zwischen zwei Leiteinwirkungen:

ULS Leiteinwirkung Schnee:

Flächenlast Glaseindeckung:	$1,3 * 0,5 \text{ kN/m}^2 = 0,65 \text{ kN/m}^2$
Flächenlast Schnee:	$1,5 * 4,62 \text{ kN/m}^2 = 6,93 \text{ kN/m}^2$
Flächenlast Wind:	wirkt günstig → $0,00 \text{ kN/m}^2$

ULS Leiteinwirkung Wind (Sog):

Flächenlast Glaseindeckung:	$1,0 * 0,5 \text{ kN/m}^2 = 0,50 \text{ kN/m}^2$
Flächenlast Schnee:	wirkt günstig → $0,00 \text{ kN/m}^2$
Flächenlast Wind:	$1,5 * (-1,49) \text{ kN/m}^2 = -2,24 \text{ kN/m}^2$

Für die Dimensionierung des Tragsystems ist neben der Tragfähigkeit auch die Durchbiegung zu beachten, weshalb der von der ÖNORM B 1990 vorgeschriebene Grenzwert der vertikalen Verformung von $l/200$ unter der charakteristischen Lastkombination eingehalten werden soll [56]. Diese Grenzen gelten für Dachkonstruktionen, die nur zu Instandhaltungszwecken begangen werden. Die charakteristische Kombination setzt sich wie folgt zusammen:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad [57]$$

SLS Leiteinwirkung Schnee:

Flächenlast Glaseindeckung:	$0,5 \text{ kN/m}^2$
Flächenlast Schnee:	$4,62 \text{ kN/m}^2$
Flächenlast Wind:	wirkt günstig → $0,00 \text{ kN/m}^2$

Anhang B: Digitaler Anhang

Die Folgenden Dateien werden für die Informationserhaltung digital beigelegt:

Anwendungsbereich_Brücken_(Kapitel_6)

- | 2D_Brücke_optimierte_Geometrie.stl
- | 2D_Brücke_Optimierungsmodell.stmod
- | 3D_Brücke_optimierte_Geometrie.stl
- | 3D_Brücke_Optimierungsmodell.stmod

Anwendungsbereich_Decken_(Kapitel_7)

- | 40cm_Decke_auf_Stützen_(Fusion_360).stl
- | 40cm_Decke_auf_Stützen_(solidThinking_Inspire).stl
- | 40cm_Decke_auf_Stützen_Berechnungsmodell_(Fusion_360).f3d
- | 40cm_Decke_auf_Stützen_Berechnungsmodell_(solidThinking_Inspire).stmod
- | 40cm_Decke_auf_Wänden_(Fusion_360).stl
- | 40cm_Decke_auf_Wänden_(solidThinking_Inspire).stl
- | 40cm_Decke_auf_Wänden_Berechnungsmodell_(Fusion_360).f3d
- | 40cm_Decke_auf_Wänden_Berechnungsmodell_(solidThinking_Inspire).stmod
- | 80cm_Decke_auf_Stützen_(Fusion_360).stl
- | 80cm_Decke_auf_Stützen_(solidThinking_Inspire).stl
- | 80cm_Decke_auf_Stützen_Berechnungsmodell_(Fusion_360).f3d
- | 80cm_Decke_auf_Stützen_Berechnungsmodell_(solidThinking_Inspire).stmod

Anwendungsbereich_Stahlknoten_(Kapitel_8)

- | Innenhof_Grasshopper-Skript.2019.gh
- | Innenhof_Rhino.3dm
- | Innenhof.stl
- | Knoten_470_Designvolumen.stl
- | Knoten_470_Druckgeometrie.stl
- | Knoten_470_FE-Volumen.stl
- | Knoten_470_Optimierungsmodell.stmod
- | Knoten_470_Validierungsmodell.stmod