

# Parametrisches Design, dadurch entstehende Bauweisen und Topologie in Produktdesign und Architektur

Daniel Renschler

6. Oktober 2023

## Zusammenfassung

Im Jahr 2023 steht das Design vor einem potenziellen Wendepunkt. Während Architekten und Grafikdesigner bereits Computer und Software verwenden, um den Designprozess zu unterstützen, zeichnet sich eine Veränderung ab. Mathematische Algorithmen könnten in den nächsten 15 Jahren zu aktiven Mitspielern im Design werden, indem sie Körper und Flächen basierend auf gegebenen Parametern optimieren. Dieses parametrische Design verspricht nicht nur eine effiziente Materialnutzung, sondern könnte auch die Nachhaltigkeit im Design fördern.

Die Ausarbeitung erklärt wichtige Konzepte wie parametrisches Design und Topologie und zeigt deren Anwendung in Simulationen. Beispiele aus dem Bauwesen, Produktdesign und der Architektur verdeutlichen das Potenzial dieser Ansätze für die Zukunft des Designs.

Das Design steht vor spannenden Veränderungen, da mathematische Algorithmen eine aktive Rolle im Gestaltungsprozess einnehmen könnten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Was ist Parametrisches Design . . . . .	3
1.2 Was ist Topologie? . . . . .	3
<b>2 Topologische Optimierungen</b>	<b>3</b>
2.1 Herleitung der Änderung . . . . .	4
2.2 Simulation . . . . .	5
<b>3 Beispiele für Verfahren und Baustoffe</b>	<b>7</b>
3.1 Mögliche Baustoffe / 3d-Druck in der Architektur . . . . .	7
3.1.1 Beton . . . . .	7
3.1.2 Pflanzenfasern . . . . .	8
3.2 FDM-Druck für Produktdesign . . . . .	9
<b>4 Beispiele im Produktdesign</b>	<b>9</b>
4.1 Stühle . . . . .	9
4.2 Beispiele des Ingeneurswesens . . . . .	10
<b>5 Beispiele in der Architektur</b>	<b>10</b>
5.1 Zaha Hadid . . . . .	10
<b>6 Topologische Optimierung Tutorial in Solidworks</b>	<b>10</b>
<b>7 Andere CAD-Programme für Topologie</b>	<b>17</b>
7.1 RhinoCAD . . . . .	17
7.2 Fusion360 . . . . .	17
<b>8 Empfohlene Literatur</b>	<b>19</b>

# 1 Einleitung

Noch immer, im Jahre 2023 hatte das Design keine digitale Revolution, zwar benutzen Architekten und Grafikdesigner hauptsächlich Computer und Programme von Anfang bis Ende des Designprozess aber letztendlich ist es nur ein Werkzeug zum erleichtern der Arbeit und kein partizipierender Akteur im Designprozess.

Ich behaupte dies wird sich in den nächsten 15 Jahren ändern, nicht im Sinne von generativer künstlicher Intelligenz wie in z.B. Bild-Generatoren wie Midjourney (Oppenlaender 2022), sondern im Sinne der Verwendung von Mathematischen Algorithmen<sup>1</sup> zum erzeugen Körper und Flächen welche mathematisch Optimiert sind zu gebenen Parametern. Damit wäre erstmals ein Teil des Designs generiert, nicht von Menschen aber von einem der Werkzeuge.

Mit Parametrischem Design kann man mathematisch “perfekt” Materialverbrauch optimieren - siehe Sektion 1.2 - und da die Frage der Nachhaltigkeit eine immer presantere sein wird ist dies ein weiteres Indiz für die These der Notwendigkeit dieses Mittels im Design.

In den folgenden Sektionen werde ich einzelne Begriffe und Konzepte erklären, sodass der Leser später keine Probleme beim folgen des Inhalts hat.

## 1.1 Was ist Parametrisches Design

Parametrisches Design ist Design welches Algorithmisch generiert wurde. Hierzu gibt man “einfach” die Parameter nach denen optimiert werden soll, Einschränkungen und z.B. Flächen die man behalten will wenn man einen Körper optimiert. Im weiteren Schritt macht der Computer dann mit Programmen die mathematische Algorithmen durchführen Optimierungen welche minimieren, bzw. Maximieren. Zum Beispiel wird auf Materialverbrauch minimiert oder auf statische Belastungsfähigkeit maximiert.

Oft muss man bei einer Optimierung wie “minimales Gewicht, maximale Tragkraft” einen Kompromiss finden, aber dies ist auch Mathematisch möglich indem Algorithmisch durch viele mögliche Konstellationen iteriert wird.

## 1.2 Was ist Topologie?

Die Topologie ist ein eher abstraktes Teilgebiet der Mathematik, sie beschäftigt sich mit der Mengenlehre, Anordnung geometrischer Gebilde im Raum und Geometrie. Im weiteren kann man mit ihr Isomorphismen und Mannigfaltigkeiten finden, bzw. definieren. Die Topologie gibt es in zwei-Dimensionalen Räumen aber auch in  $x \in \mathbb{N}$  Dimensionen<sup>2</sup>, was es für Design interessant macht.

# 2 Topologische Optimierungen

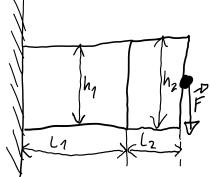
Zum verstehen was eine topologische Optimierung optimiert siehe Abbildung 4.

Mit der Abbildung wird klar wie optimiert wird, wo die Größen Optimierungen nur zwei Parameter je Rechteck ändern kann, kann die Form-Optimierung sich von der Geometrischen “Vorgaben” des Rechtecks Lösen. Die Topologische Optimierung ist dann im Stande sich von

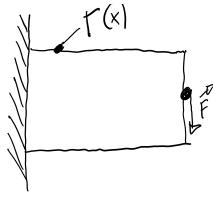
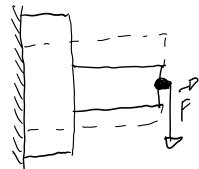
---

<sup>1</sup>Man beachte: Die meisten Künstlichen “Intelligenzen” zum erstellen von Bildern nutzen auch Algorithmen, hier ist dies aber zu verstehen als Algorithmen ohne künstliche Neuronale Netzwerke.

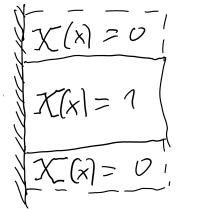
<sup>2</sup> $x \in \mathbb{N}$  ist zu verstehen als positive Ganzzahl Dimensionen. Theoretisch kann die Topologie auch mit  $\mathbb{Q}^+$  (Rationalen Räumen) umgehen aber dies ist weitaus komplexer und in diesem Kontext nicht realisierbar.



Optimierung



Optimierung



Optimierung

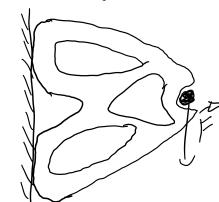


Abbildung 1: Größen Optimierung

Abbildung 2: Form Optimierung

Abbildung 3:  
Topologische Optimierung

Abbildung 4: Unterschied zwischen verschiedenen Optimierungen

der Homotopieäquivalenzklasse<sup>3</sup> zu lösen, dies ist dann der Schritt in dem das meiste Material gespart werden kann.

## 2.1 Herleitung der Änderung

Aus der Erklärung Topologischer Optimierungen in Sektion 2 geht noch nicht hervor wie diese Homotopieäquivalenzklassen Änderung zustande kommt, dies wird in dieser Sektion langsam erklärt.

Bei topologischen Optimierungen sind ein paar Formeln und Faktoren entscheidend, angefangen mit der Kostenfunktion

$$c = \frac{1}{2} \vec{U}^T K \cdot \vec{U} \quad (1)$$

Hier repräsentiert  $c$  das Konstenmaß,  $\vec{U}$  Verschiebung und Deformation in einem System,  $K$  eine Steifigkeits-, bzw. Elastizitätsmatrix und  $\vec{U}^T$  die transponierte Form des Vektors.

Dem kann man dann entnehmen das die Multiplikation  $\vec{U}^T K \vec{U}$  eine quadratische Form die in der Elastizitätstheorie und Finite-Element-Analyse verwendet wird.

Die nächste essentielle Formel ist für die Elastische Energie:

$$c = \frac{1}{2} f u = \frac{1}{2} k u^2 \quad (2)$$

hier repräsentiert  $c$  die elastische Energie,  $f$  die auf das System ausgeübte Kraft,  $u$  die Deformation im System und  $k$  die Federkonstante des Systems.

Zuletzt benötigt man noch die Statische Gleichung:

$$k \vec{u} = f \quad (3)$$

---

<sup>3</sup>Grob gesagt: Anzahl der Löcher

Hier ist  $k$  die Steifigkeitsmatrix bzw. Federkonstante <sup>4</sup>,  $\vec{u}$  die Verformung im System und  $f$  die auf das System ausgeübte Kraft.

Diese sind dann Final von einigen Bedingungen abhängig:

- $ku = F$ : Diese Formulierung repräsentiert die statische Gleichgewichtsgleichung, die besagt, dass die resultierende Verformung  $u$  im System gleich der externen angewandten Kraft  $F$  ist.
- $\rho_i \in \{1 (\text{vorhanden}), 0 (\text{leer})\}, \forall i$ : Dies gibt an, dass  $\rho_i$  entweder den Wert 1 (vorhanden) oder 0 (leer) haben kann. Dabei repräsentiert  $i$  die einzelnen Elemente des Systems.
- $g = \sum_i \rho_i - V_0 \leq 0$ : Dies ist die letzte Nebenbedingung, die besagt, dass die Summe der  $\rho_i$  Werte minus  $V_0$  kleiner oder gleich null sein muss, wobei  $V_0$  eine bestimmte Schwelle für das Erscheinen der Elemente im System darstellt.

## 2.2 Simulation

Die letzte einführende Sektion wird sich mit einer Simulations Software (Aage 2014) der Dänmarks Tekniske Universitet (Technische Universität Dänemark) beschäftigen, diese ist zweidimensional und gut um Zusammenhänge intuitiv zu zeigen.

Ich werde einige Beispiele zeigen und empfehle, dass wenn Interesse besteht man es selbst versucht.

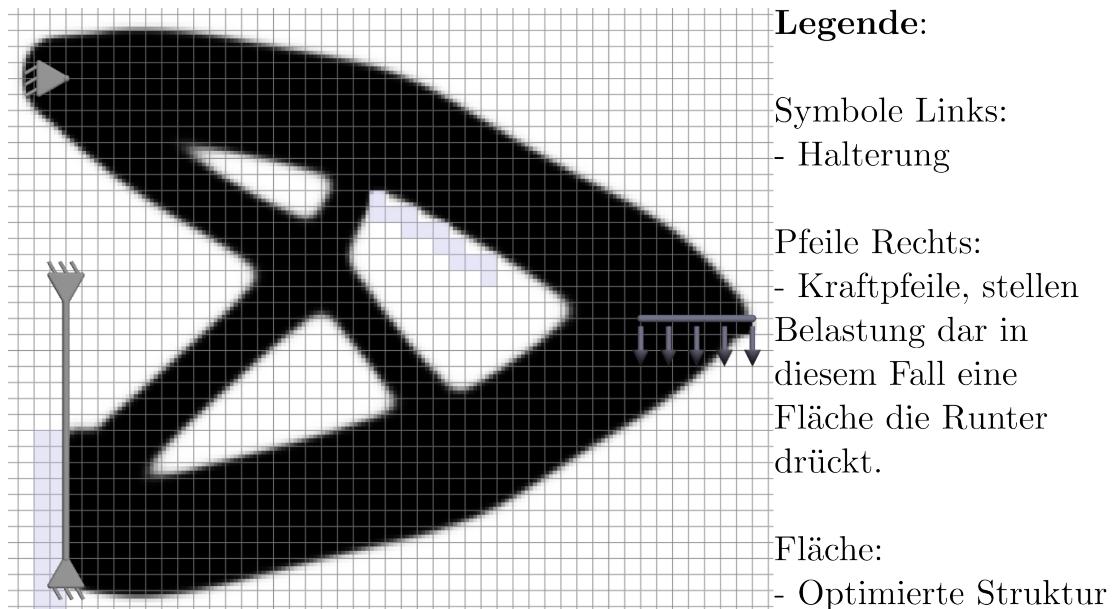


Abbildung 5: Legende zur Simulation

Um es nochmal zu erwähnen, die schwarzen Strukturen sind komplett nach den Angezeigten Parametern generiert.

---

<sup>4</sup>Abhängig von der Anzahl der zu berücksichtigten Dimensionen.

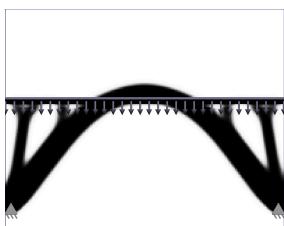


Abbildung 6: Brücke

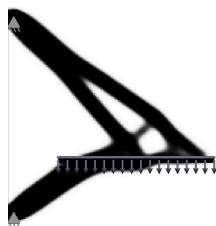


Abbildung 7: Tragfläche

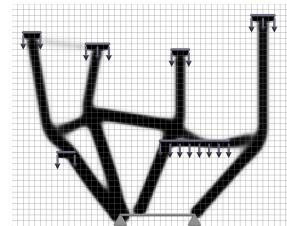


Abbildung 8: Baum

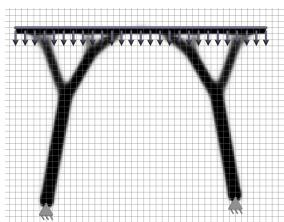


Abbildung 9: Tisch

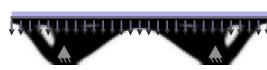


Abbildung 10: Palette

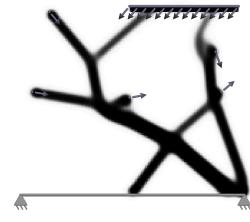


Abbildung 11: Abstraktes Gebilde

Die Abbildungen 6 bis 11 sind benannt nach Dingen die sie evtl. zeigen könnten, was ich am spannensten fand war die Brücke welche tatsächlich wie eine normale Brücke aussieht da Statiker und Ingeneure sehr viel Zeit für die Verbesserung der Struktur verwendeten.

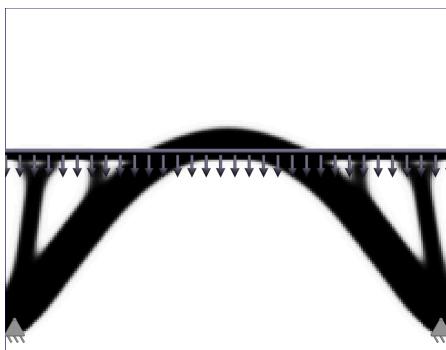


Abbildung 12: Simulierte Brücke



Abbildung 13: Hafen Brücke Sydney(Rabich 2023)

Man sieht dies auch hier am Beispiel der “Sydney Harbour Bridge”, diese wurde 1932 fertig gestellt, gebaut mit reinen Berechnungen, ohne jegliche Hilfe von Algorithmen.

Hier sehe ich eine Chance für diverse Algorithmen und Simulationen die einen solchen Prozess erleichtern könnten. Nicht nur Topologische Optimierungen aus statischer Sicht, auch andere Simulationen um Strukturen z.B. unter extremen Wind Bedingungen auf Resonanz zu prüfen.

### 3 Beispiele für Verfahren und Baustoffe

In den folgenden Sektionen werde ich mich aus Gestalterischer- und Produktionssicht mit Verfahren und Baustoffen auseinandersetzen.

Die Institution von der ich hier die meisten Erkenntnisse nehme ist die DART Michigan (Digital Architecture Research & Technologies), dies ist ein Kolleg der Universität Michigan, fokussiert auf Architektur-Forschung mit Schwerpunkt auf neue Baumaterialien und Parametrischem Design.

Selbst konnte ich in diesem Bereich keine Erfahrungen machen da alle benötigten Maschinen ohne Ausnahme sehr teuer sind, wenn überhaupt der Öffentlichkeit zugänglich.

Eine andere große Institution in dieser Forschung ist die Technische Uni München, diese ist aber meines Wissens nur in den Computationalen und Topologischen Aspekten des Designs beschäftigt.

#### 3.1 Mögliche Baustoffe / 3d-Druck in der Architektur

Die Materialforschung ist wahrscheinlich eine immer present und interessante Sparte der Wissenschaft, meiner Meinung nach vor allem die aktuellen Erkenntnisse der FDM Materialien für Bau sowie Produktdesign. Technologie macht es möglich alles von Plastik bis Beton, Sandstein und Holz zu drucken, was vor wenigen Jahrzehnten undenkbar war, insbesondere der Gedanke das einige Privatleute zuhause sich alles aus Plastik drucken können was sie wollen statt auf Hersteller Angewiesen sein zu müssen.

Aus Zeit und Platigründen kann ich im folgenden nur Beispiele verschiedener Institutionen vorstellen statt eine gebührende Analyse zu den einzlnen Bauwerken zu machen.

##### 3.1.1 Beton



Abbildung 14: Gedruckte Betonstruktur leer  
(Meibodi 2023)

Hier sieht man links Abbildung 14, in diesem Bild wurden gerade die oberen Schichten gedruckt. Auf der rechten Abbildung 15 sieht man das Gedruckte einen Schritt weiter, der Beton wurde gefüllt und mit Stahl verstärkt. Aus diesem Beispiel kann man Ableiten was auf einem Größeren Maßstab mit richtigen Maschinen machen kann, Ich sehe hier einen Weg wie man z.B. Rohbau für Häuser mit diesem Verfahren machen kann.



Abbildung 15: Gedruckte Betonstruktur gefüllt (Meibodi 2023)

Mitlerweile ist der FDM-Druck nichtmehr in Frage nach Möglichkeit, sondern im entstehen als valides Werkzeug in der Bauindustrie, zur Zeit sind es “Starchitekten<sup>5</sup>” aber ich gehe stark davon aus das wir 3d-Druck immer mehr im Bau sehen werden in der Zukunft wir sind noch viele Jahre davon entfernt das es “normal” ist, aber diese Zeit wird kommen.

### 3.1.2 Pflanzenfasern

Mit Pflanzenfasern kann man noch keine Häuser bauen aber denoch möchte ich hier ein Verfahren erwähnen das die Bauindustrie unerstüttzt, die folgende Forschung ist aus der oben erwähnten DART Institution (Kahn 2023).

Eine Akteurin in der Parametrischen Architektur war Zaha Hadid mit einem ihrer Werke werde ich mich in der Sektion 5.1 auseinandersetzen, für jetzt mit den Bauweisen des Phænos Wolfsburg um diese in Kontrast zu setzen mit einer anderen neu-entwickelten Lösung der DART (Kahn 2023).



Abbildung 16: Phæno Bau (Mayer 2023)



Abbildung 17: Phæno Bau (Mayer 2023)

Hier in den Abbildungen 16 & 17 sieht man die Verwendung von unmengen an Plastik, Holzplanken die verstärkt werden müssen und vielem weiterem. Vor einem Jahr beschäftigte ich mich im Rahmen einer anderen Ausarbeitung unter anderem mit diesem Bauwerk und wunderte mich über die nahezu verschwenderische Verwendung von Plastik. Wie es (Mayer 2023) in dem Titel eines Fachartikels des “Expertenforum Beton” gut sagt: “SCC<sup>6</sup> als Antwort auf die Herausforderung architektonischer Wunschvorstellungen”. Diese Aussage der Betonexperten sagt mir das diese nichtmehr überlegen ob etwas möglich ist, sondern eher davon aussgehen können das alles was man sich selbst oder ein Architekt vorstellen kann möglich ist mit den neusten Verfahren.

Dies bekräftigt auch die DART Forschung zu Druckbarem Holz, bzw. Pflanzenfasern im Allgemeinen. Diese ist nämlich darauf gekommen, dass man durch Druck von Organischem Material eine Form für Giesbeton machen könnte welche Kompostierbar ist und den Müll der Normalerweise entstehen würde nahezu ablöst und das Giesen von SCC weniger bis auf den Beton an sich kaum bedenklich macht.

---

<sup>5</sup>Berühmte Architekten, die sich mehr trauen können.

<sup>6</sup>SCC: Selbstverdichtender Beton der diese Verfahren möglich macht.



Abbildung 18: (Kahn 2023)



Abbildung 19: (Kahn 2023)

### 3.2 FDM-Druck für Produktdesign

Der FDM<sup>7</sup>-Druck hat sich im letzten Jahrzehnt gut im Produktdesign etabliert, weniger zum erstellen von Produkten aber als essentielles Werkzeug beim Prototyping. Da der Designprozess fast 100% digital läuft kann man sich einfach den aktuellen Stand des Projektes ausdrucken. Die Drucker werden auch für Privatpersonen und z.B. Studenten immer Leistbarer Teils Drucker guter qualität für unter 300€.

## 4 Beispiele im Produktdesign

### 4.1 Stühle

Es gibt einige Topologisch optimierte Stühle, hier werde ich den von Joris Laarman (Laarman 2006) nehmen da dieser der erste war (erstmals hergestellt 2006).



Abbildung 20: Bone Chair (Laarman 2006)

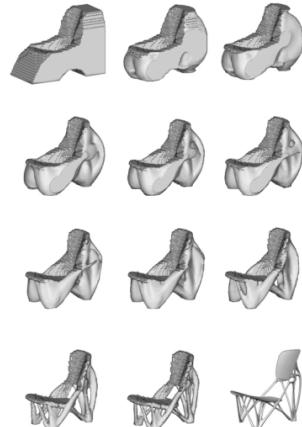


Abbildung 21: Iterative Berechnung. (Stals u. a. 2015)

Hier sieht man zum einen gut das organisch-knochenartige Design des Stuhls links in Abb. 20, zum anderen den iterativen prozess des topologischen Algorithmus, der mit den gegebenen Flächen, Außenbegrenzungen und Kräften nach und nach den Stuhl rendert.

---

<sup>7</sup>Fused Deposit Modeling

## 4.2 Beispiele des Ingeneurswesens

Beim hören von minimalem Material und Maximaler Stärke denkt man an das Ingeneurswesen. Diese haben auch einen Großen nuzten von der Erkenntnis aus der topologischen Forschung mit Stahl als einfach bearbeitbarem Werkstoff.

Ich werde nicht tief auf diese Verwendung eingehen aber einzelne Bilder zur Veranschauung und aus Forschung von Firmen erwähnen.

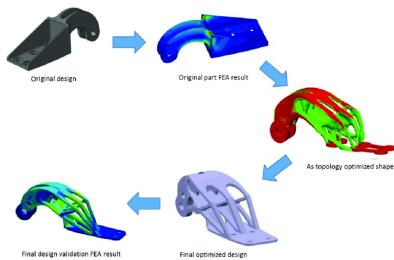


Abbildung 22: Workflow mit Parametrischem Design (Gebisa und Lemu 2017).



Abbildung 23: Iterative Berechnung.

## 5 Beispiele in der Architektur

### 5.1 Zaha Hadid

Wenn man über Parametrisches Design in der Architektur nachdenkt und ansatzweise Architektur interessiert ist fällt einem wahrscheinlich direkt Zaha Hadid ein.

Sie war die Architektin des Parametrischen Design, von Ende der 70 Jahre bis nach Ihrem Tod 2016 war Sie essentiell für den Parametrischen Stil. Man kann noch nicht sagen wie groß ihr Einfluss in der Architektur ist, aber definitiv beachtlich.

In ihren Werken ist der Fokus der Parametrie aber nicht auf z.B. Topologie, sondern eher auf kontinuierliche Linien wie in Abbildung 24 oder Kubismus-artige Gebilde wie in Abbildung 25.

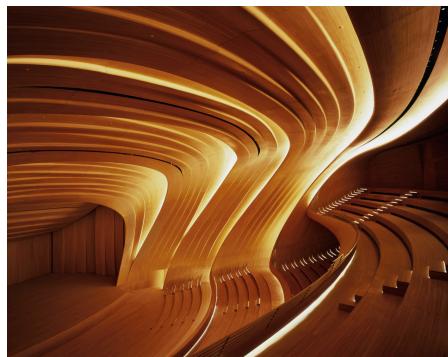
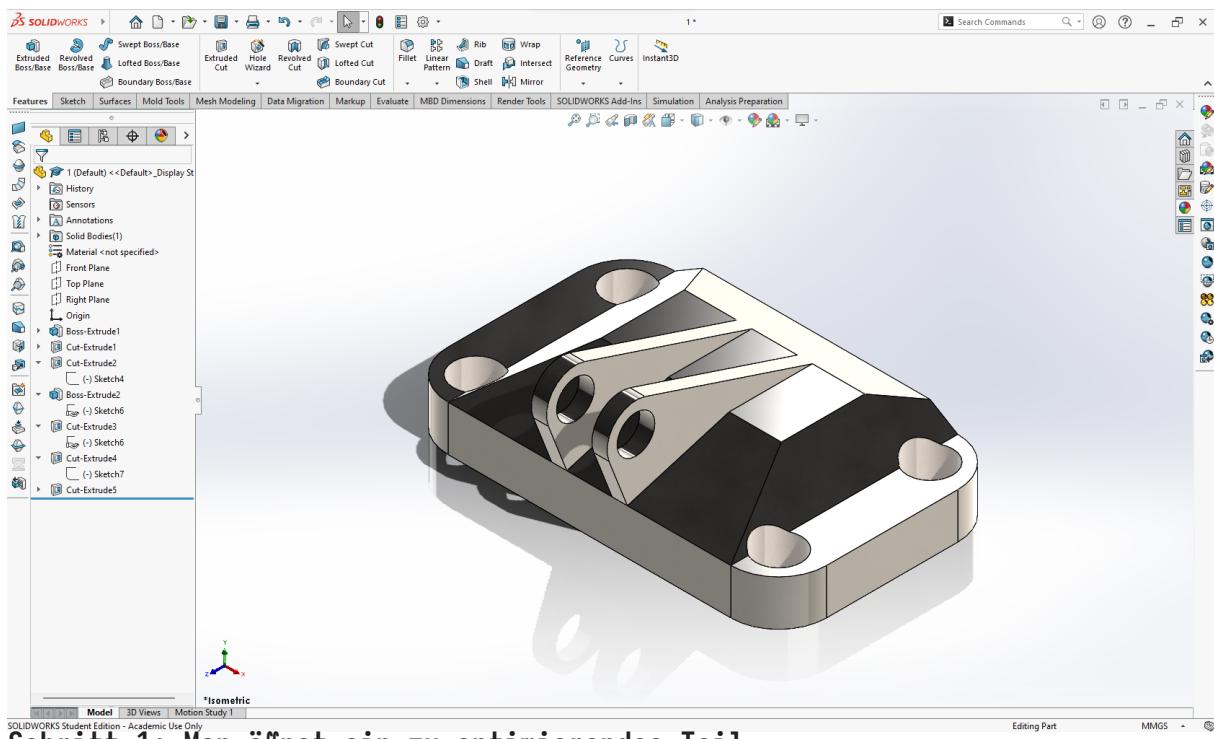


Abbildung 24: Heydar Aliyev Center  
Azerbaijan

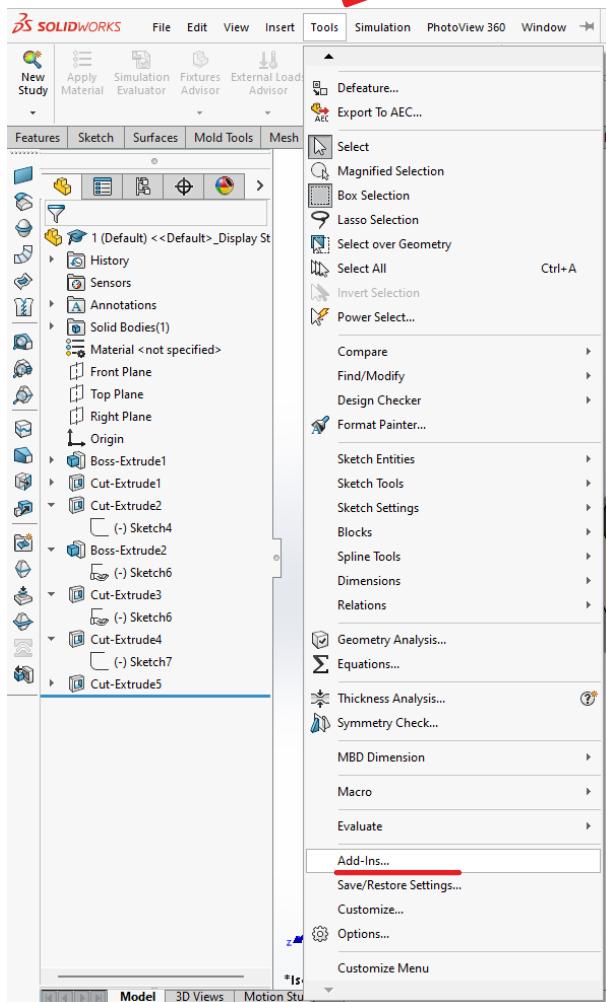


Abbildung 25: Port House Antwerp

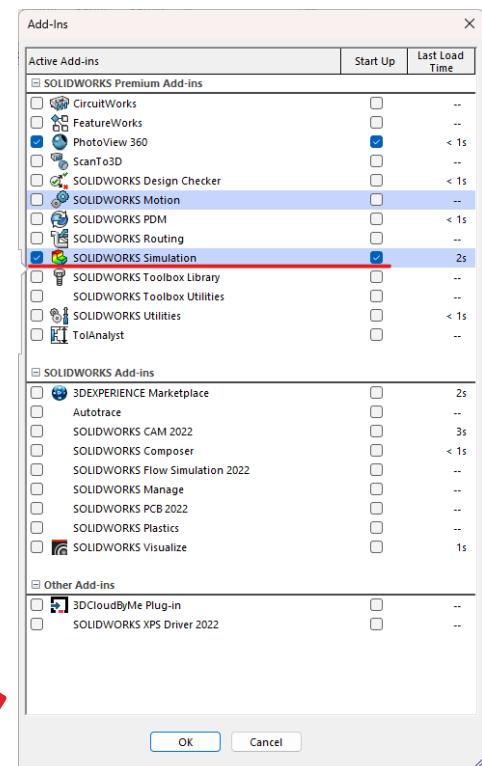
# Tutorial: Topologische Optimierung in SolidWorks 2023



Schritt 1: Man öffnet ein zu optimierendes Teil.



Schritt 2: Man prüft ob das Simulations Add-in verfügbar ist.



### Schritt 3

Ist es verfügbar?

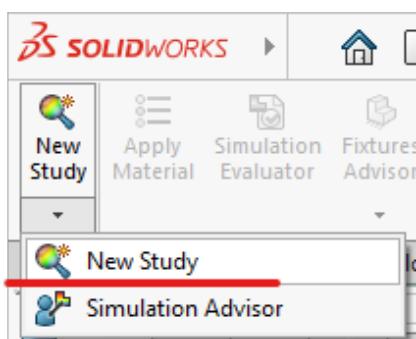
Ja

Nein



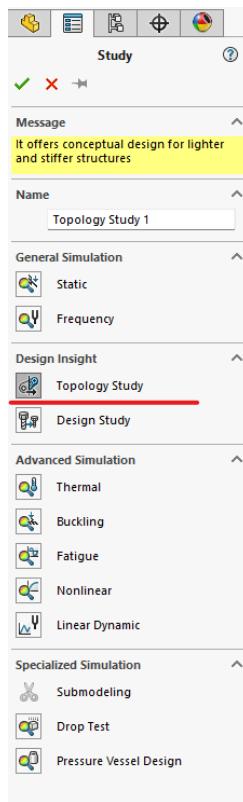
Prüfe die Solidworks Lizenz, wenn Sie richtig ist und das Feature nicht vorhanden ist, ist hier das Ende

Schritt 4: Gehe in den "Simulation" Tab und wähle "Neue Simulation".



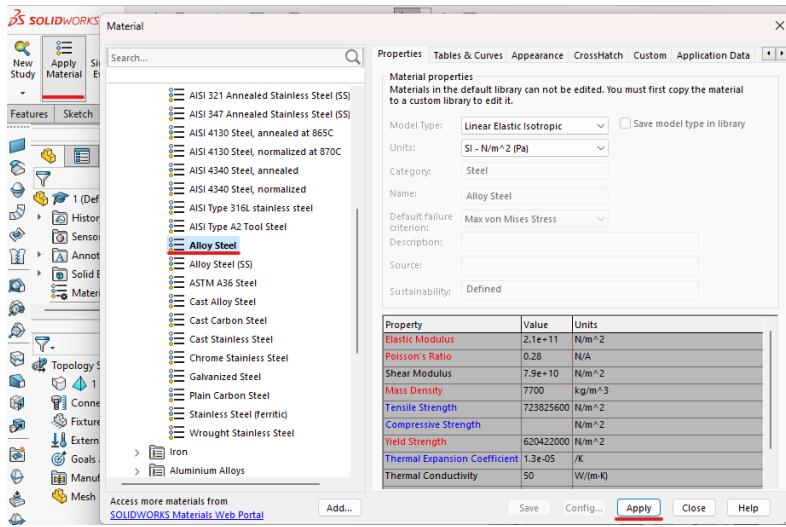
Schritt 5: Wenn du nicht weist was für eine Simulation du machen willst, dann gehe auf das Berater Männchen.

Wenn du es weist geh auf "Neue Simulation".



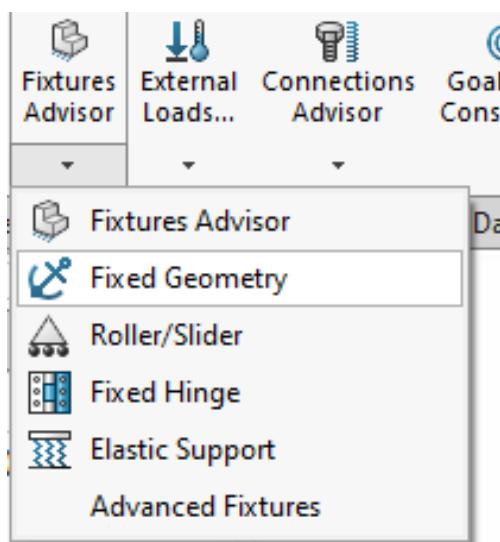
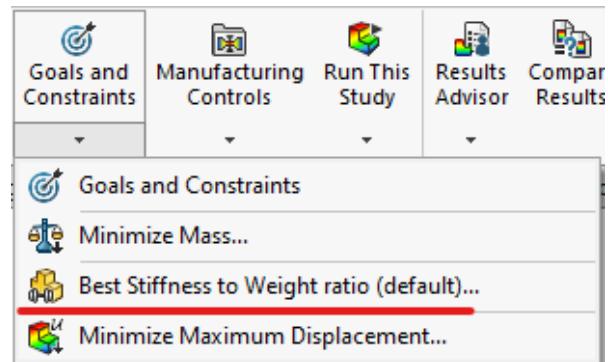
Schritt 6: Wähle die Topologische Studie, gegeben du möchtest eine machen.



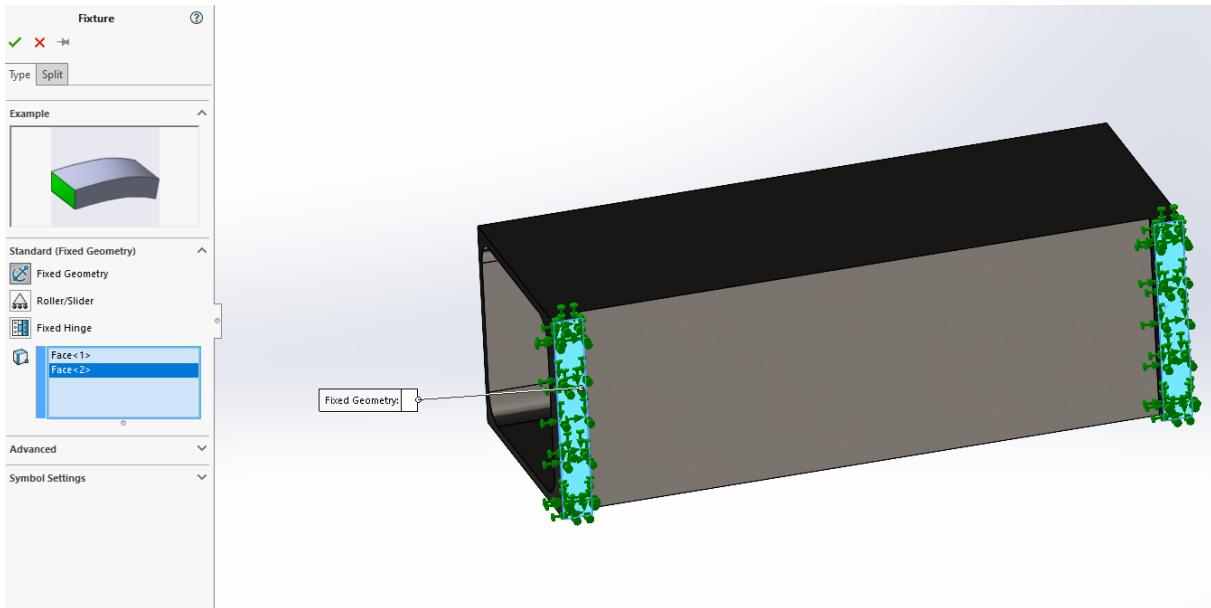


Schritt 7: Man wählt das gewünschte Material. Hier müssen einige Werte erfüllt sein, sonst kann man nicht weitermachen. Aber Solidworks wird darauf hinweisen. Man muss nur die Fehlermeldungen Lesen.

Schritt 8: Man wählt das Ziel, das man erreichen will. Meistens ist dies "beste Statik zu kleinstem Gewicht".



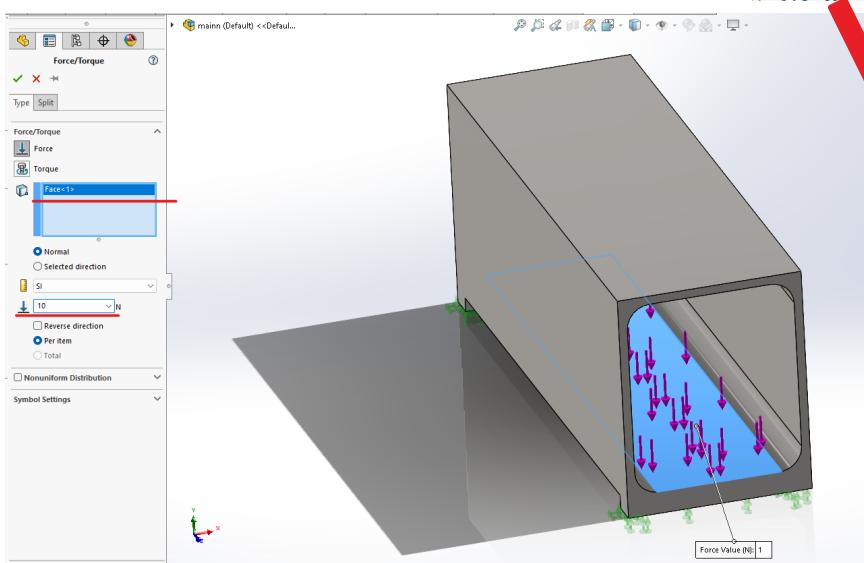
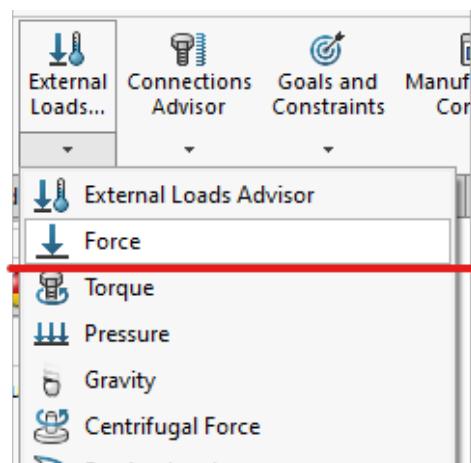
Schritt 9: Man fügt flächen hinzu, die fest bleiben sollen, sich nicht bewegen dürfen.



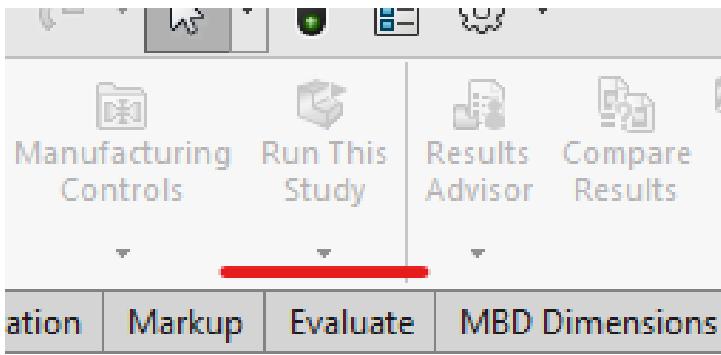
Schritt 10: Wenn man auf dem feature ist definiert man die Flächen, die fest bleiben sollen.



Schritt 11: Man fügt ein Gewicht hinzu, sodass die Optimierung auf diesen Parameter optimieren kann.



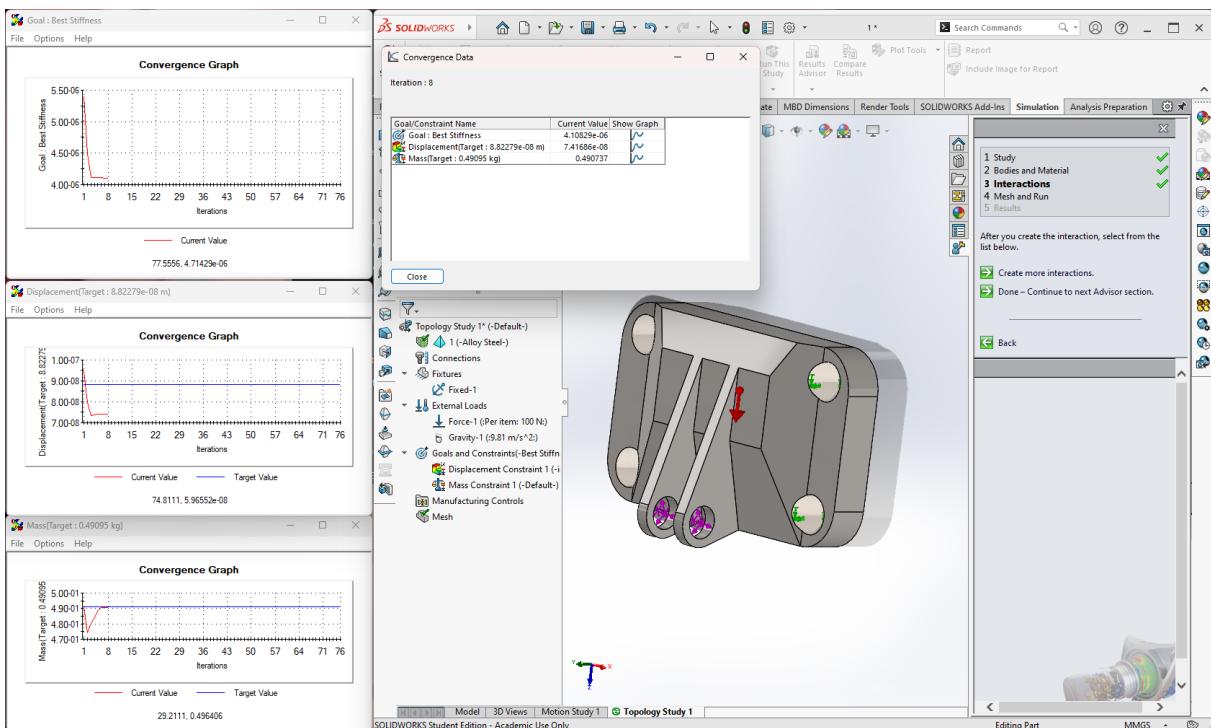
Schritt 12:  
Für das Gewicht wählt man auch eine Fläche.



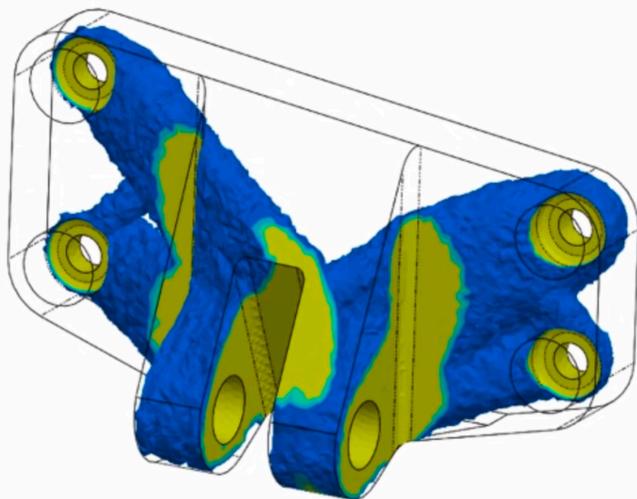
Schritt 13: Man lässt die Simulation laufen.



Schritt 14: Man wartet bis die 76 Iterationen des Algorithmus durchgelaufen sind und einem die Ergebnisse liefern.



Schritt 15: Man erhält ein  
Optimiertes Design.



Schritt 16: Dieses  
"Mathematische" Design muss  
man noch um-entwickeln in  
ein Baubares.



## 7 Andere CAD-Programme für Topologie

### 7.1 RhinoCAD

RhinoCAD bietet viele Möglichkeiten für Parametrisches Design, vor allem mit der “Grasshopper” Extension. Dort hat man Blender-artige Nodes um Komplexe Funktionen und Strukturen zu erstellen.

Es hat eine weitaus größere Eintrittsbarriere als viele andere Software wie Solidworks oder Fusion, ist aber kostenlos und am funktionalsten für das Parametrische designen.

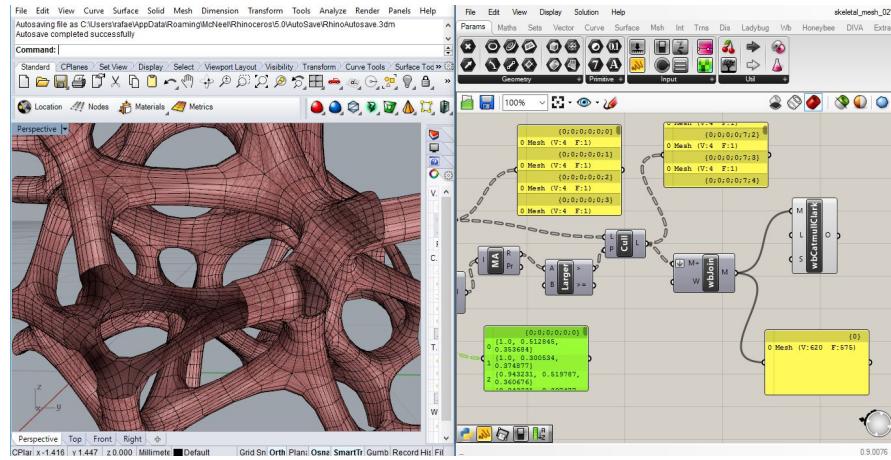


Abbildung 26: RhinoCAD Beispiel

### 7.2 Fusion360

Fusion360 ist ein sehr beliebtes Programm im Hobby-Bereich, hat aber viele Punkte die es mir nicht sinnvoll erscheinen lassen es in einer Professionellen Umgebung zu nutzen.

Z.B. kann man Analysen nicht selbst simulieren, und ohne Schülerlizenzen kosten diese um die 3 Euro pro Stück. Das ist sehr ärgerlich wenn man selbst einen Rechenintensiven Compute hat, aber im generellen mit jedem modernen Computer sollte dies zu rechnen kein Problem sein.

Der essentielle Vorteil von Fusion360 gegenüber SolidWorks ist, dass es für Privatpersonen kostenlos ist, wenn auch sehr eingeschränkt.

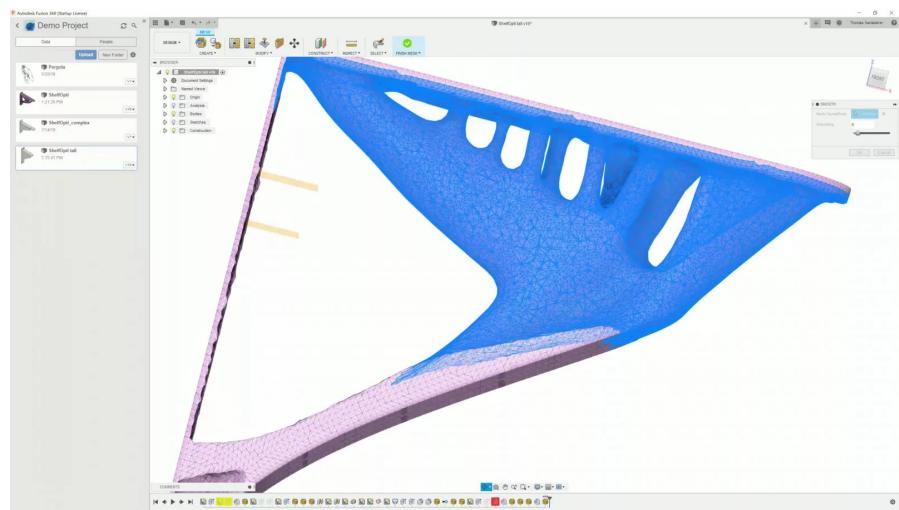


Abbildung 27: Fusion360 Beispiel

## 8 Empfohlene Literatur

Die folgende Literatur kann ich für vertiefte Studien empfehlen.

- Roland Hudson und roly hudson (1. Jan. 2010). „Strategies for Parametric Design in Architecture. An Application of Practice Led Research“

### Anmerkung zur Quelle

Hudson schrieb seine Disseratiaton für ein Ph.D. in Architektur über Topologische Optimierungen, es ist ein guter Überblick über die Verwendung von Topologischen Optimierungen in der Architektur.

- Dart (2023). *Publications*. DART LAB. URL: <https://dartlab.umich.edu/publications/> (besucht am 03.10.2023)

### Anmerkung zur Quelle

Das “Dart Lab” ist eine Einrichtung der Universität Michigan welche im Bereich Topologische Optimierungen Forscht, sowie über Verfahren . Ich denke Sie könnte in den Zukunft essentielle Erkenntnisse werfen die der Industrie helfen werden.

- Jun Wu (2023). *Jun Wu Website*. URL: <http://www.jun-wu.net/>

### Anmerkung zur Quelle

Jun Wu ist ein Forscher und Assistenz Professor an der “Deanmarks Tekniske Universitet”, er hat einen Doktor der Mathematik aus China und einen Doktor der Informatik aus der Technischen Universität München. Seine Forschung ist im Bereich der Topologie, aber auch in der Anwendung mit FDM-Druckern.

## Literatur

- Aage, Nieels (25. März 2014). *Interactive 2D TopOpt App - TopOpt*. Version 2.4. Danmarks Tekniske Universitet. URL: <https://www.topopt.mek.dtu.dk/apps-and-software/interactive-2d-topopt-app> (besucht am 02.10.2023).
- Dart (2023). *Publications*. DART LAB. URL: <https://dartlab.umich.edu/publications/> (besucht am 03.10.2023).
- Gebisa, Aboma und Hirpa Lemu (1. Dez. 2017). „A Case Study on Topology Optimized Design for Additive Manufacturing“. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 276, S. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012026.
- Hudson, Roland und roly hudson (1. Jan. 2010). „Strategies for Parametric Design in Architecture. An Application of Practice Led Research“.
- Kahn, Muhammad Dayyem (2023). *BioMatters*. DART LAB. URL: <https://dartlab.umich.edu/research-project/biomatters/> (besucht am 03.10.2023).
- Laarman (2006). *Bone Chair*. Joris Laarman. URL: <https://www.jorislaarman.com/work/bone-chair/> (besucht am 03.10.2023).
- Mayer, Roland (2023). *SCC als Antwort auf die Herausforderung architektonischer Wunschvorstellungen*. VÖZ Literatur Recherche. URL: <https://literatur.zement.at/themen/29-architektur/5956-scc-als-antwort-auf-die-herausforderung-architektonischer-wunschvorstellungen> (besucht am 03.10.2023).
- Meibodi (2023). *Branch Wall: Geometrically Informed Non-Planar Toolpath and Material Deposition*. DART LAB. URL: <https://dartlab.umich.edu/research-project/branch-wall-non-planar-toolpath/> (besucht am 03.10.2023).
- Oppenlaender, Jonas (16. Nov. 2022). „The Creativity of Text-to-Image Generation“. In: *Proceedings of the 25th International Academic Mindtrek Conference*, S. 192–202. DOI: 10.1145/3569219.3569352. arXiv: 2206.02904 [cs]. URL: <http://arxiv.org/abs/2206.02904> (besucht am 01.10.2023).
- Rabich, Dietmar (2. Okt. 2023). *Sydney Harbour Bridge*. In: *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sydney\\_Harbour\\_Bridge&oldid=1178195108](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sydney_Harbour_Bridge&oldid=1178195108) (besucht am 03.10.2023).
- Stals, Adeline u. a. (1. Aug. 2015). „Challenges in Teaching Architectural Morphogenesis“. In: Wu, Jun (2023). *Jun Wu Website*. URL: <http://www.jun-wu.net/>.