



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Florian Schulze

## **Lineare Strukturberechnung zur Ermittlung des Leichtbaupotentials eines Multimaterial- Hybridbauteils**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

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

**Florian Schulze**

**Lineare Strukturberechnung zur  
Ermittlung des Leichtbaupotentials eines  
Multimaterial-Hybridbauteils**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
MAXKON Engineering GmbH  
Hein-Saß-Weg 36  
21129 Hamburg

Erstprüfer: Prof.-Dr. Thomas Grätsch  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Sven Janke

## **Zusammenfassung**

**Florian Schulze**

### **Thema der Bachelorthesis**

Lineare Strukturberechnung zur Ermittlung des Leichtbaupotentials eines Multimaterial-Hybridbauteils

### **Stichworte**

FEM, Leichtbau, Fahrzeugbau, Organoblech

### **Kurzzusammenfassung**

Mit der steigenden Bedeutung des Leichtbaus wird in der Fahrzeugindustrie nach neuen Konstruktionsansätzen und Werkstoffen gesucht, die bei gleichen Sicherheits- und Belastungsanforderungen, eine Minderung des Bauteilgewichts mit sich bringen. Dies wird in dieser Arbeit an einem Modell eines Pedallagerbocks untersucht, welches mit unterschiedlichen Werkstoffen konstruiert und anschließend mit Hilfe einer FEM-Software bezüglich der Belastungen ausgewertet wird. Die Auswertung zeigt, dass insbesondere bei Bauteilen aus Organoblech eine deutliche Gewichtsreduzierung erzielt werden kann.

**Florian Schulze**

### **Title of the paper**

Linear structure analysis to determine the lightweight-potential of a multi-material hybrid-component

### **Keywords**

FEM, lightweight design, automotive, organic sheet

### **Abstract**

With the increasing importance of lightweight design in the automotive industry, there is a search for new design approaches and materials, that fulfill the same safety and load requirements, while reducing the components weight.

This paper evaluates the model of a brake pedal bracket, which is designed with different materials and afterwards calculated via a finite element model regarding its loads and stresses. The results show a significant weight reduction with the use of organic sheet components.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung und Vorgehen</b>	<b>5</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Finite Elemente Methode	6
2.2 Leichtbau	13
<b>3 CAD-Konstruktion und FEM-Erstellung</b>	<b>15</b>
3.1 Aluminium-Spritzguss-Modell	15
3.2 Hybrid-Varianten	20
3.2.1 Erstellung des CAD-Modells	20
3.2.2 FE-Modell	23
3.2.3 Variantenerstellung	25
<b>4 Auswertung und Vergleich der FE-Ergebnisse</b>	<b>28</b>
4.1 Auswertung des Aluminium-Spritzguss-Modells	28
4.2 Auswertung der Stahl-Kunststoff-Hybride	31
4.2.1 Stahlblech-Dicke 3 mm	31
4.2.2 Stahlblech-Dicke 2 mm	34
4.2.3 Stahlblech-Dicke 1,5 mm	35
4.3 Auswertung des Organoblech-Kunststoff-Hybrides	36
4.4 Vergleich der Varianten	38
<b>5 Fazit</b>	<b>41</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>42</b>
<b>Anhang</b>	<b>43</b>
Anhang A Datenblätter	43
Anhang B CAD-Ansichten	46
Anhang B1 Aluminium-Variante	46
Anhang B2 Hybrid-Variante	50

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Konventionelle CAE-Prozesskette [2, S. 6].....	6
Abbildung 2.2: Ablauf einer FEM Berechnung [1, S. 4].....	8
Abbildung 2.3: Impulsbetrachtung am linearen Stab-Element [2, Kap. 5].....	8
Abbildung 2.4: Formfunktionen für Stab-Element .....	9
Abbildung 2.5: RBE2 Verschiebungen.....	11
Abbildung 2.6: Kopplung von Scheibe und Platte zu Schale .....	12
Abbildung 2.7: Gewebebeispiele [5, Kap. 2].....	13
Abbildung 2.8: Organoblech Halbzeug und fertiges Bauteil [6] .....	14
Abbildung 3.1: CAD-Modell des Pedallagerbocks.....	15
Abbildung 3.2: Casting Tool Parameter .....	16
Abbildung 3.3: Netz-Verbesserung.....	17
Abbildung 3.4: FE-Modell Pedallagerbock .....	18
Abbildung 3.5: Pedal und FE-Kopplung.....	19
Abbildung 3.6: Flächen der Blechgeometrie .....	20
Abbildung 3.7: Innere Kunststoffgeometrie .....	21
Abbildung 3.8: Äußere Kunststoffgeometrie.....	22
Abbildung 3.9: Durchgangsloch der Lagerstelle .....	22
Abbildung 3.10: Anschraubgeometrie BKV.....	22
Abbildung 3.11: Mittelflächenmodell der Hybridvariante .....	23
Abbildung 3.12: Kunststoff-Materialkarte.....	24
Abbildung 3.13: Faserrichtung FE-Modell.....	25
Abbildung 3.14: Materialkarte Organoblech .....	26
Abbildung 3.15: 2/2 Twill Gewebe [7].....	26
Abbildung 4.1: Verschiebungen im Aluminium-Modell.....	28
Abbildung 4.2: Spannungen im Aluminium-Modell .....	29
Abbildung 4.3: Spannungen um Lagerstelle.....	30
Abbildung 4.4: 3 mm Blech- und Kunststoff-Spannungswerte.....	31
Abbildung 4.5: 3 mm Blech-Spannungswerte .....	32
Abbildung 4.6: Spannungen im Kunststoff.....	33
Abbildung 4.7: Spannungen an den Rippen.....	33
Abbildung 4.8: 2 mm Blech- und Kunststoff-Spannungswerte.....	34
Abbildung 4.9: 2 mm Blech-Spannungswerte .....	34
Abbildung 4.10: 1,5 mm Blech- und Kunststoff-Spannungswerte.....	35
Abbildung 4.11: 1,5 mm Blech-Spannungswerte .....	35
Abbildung 4.12: Organoblech- und Kunststoff-Spannungswerte.....	36
Abbildung 4.13: Organoblech-Spannungswerte .....	36
Abbildung 4.14: Spannungswerte an der Organo-Kunststoffgeometrie.....	37

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Spannungsvergleich.....	38
Tabelle 4.2: Gewichtsvergleich der Varianten .....	39

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Symbole

Symbol	Bedeutung des Symbols
A	Fläche
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
$\vec{F}$	Kraftvektor
G	Schubmodul
k	Federkonstante / Elementsteifigkeitsmatrix
K	Gesamtsteifigkeitsmatrix
L	Länge
m	Massenmatrix
N	Normalkraft
p	Impuls
u	Verschiebung
$\vec{U}$	Verschiebungsvektor

### Griechische Symbole

Symbol	Bedeutung des Symbols
$\sigma$	Spannung
$\varepsilon$	Dehnung
$\nu$	Poissonzahl
$\rho$	Dichte

## Abkürzungsverzeichnis

BKV	Bremskraftverstärker
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DGL	Differentialgleichung
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
GEH	Gestaltänderungsenergiehypothese
RBE	Rigid Body Element

## 1 Einleitung und Vorgehen

Durch den erhöhten Anspruch an Komfort und Sicherheit ist das Gewicht von Fahrzeugen stetig angestiegen. Um dem damit einhergehenden erhöhten Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß entgegenzuwirken, hat die Automobilindustrie stets das Bestreben, die Effizienz ihrer Produkte zu steigern und das Gewicht bei gleichbleibenden Sicherheiten zu verringern. Moderne Konstruktionsmethoden, wie die Hybrid-Technik und neuartige Materialien, wie die Faserverbundwerkstoffe gewinnen daher immer mehr an Bedeutung.

Zusammen mit der Firma MAXKON Engineering GmbH wurde die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit entwickelt, um das Leichtbaupotential von Multimaterial-Hybriden bei der Verwendung an einem Pedallagerbock festzustellen. Hierfür wird ein bestehendes Aluminium-Spritzguss-Bauteil nachkonstruiert, in ein finite Elemente Modell umgewandelt und bezüglich seiner Spannungen ausgewertet. Anschließend wird das Bauteil in eine Hybrid-Variante umkonstruiert und erneut mittels FEM berechnet. Die Berechnung der Hybrid-Variante wird mit verschiedenen Material-Kombinationen durchgeführt, um in Erfahrung zu bringen, welche dieser Kombinationen das höchste Leichtbaupotential besitzt.

Die Arbeit beginnt mit einem Einstieg in die Grundlagen der FEM sowie einem kurzen Überblick über den Leichtbau und den in dieser Arbeit verwendeten Verbundwerkstoff, das Organoblech.

Der Hauptteil der Arbeit besteht aus:

- CAD-Erstellung der Spritzguss-Variante (in Siemens NX)
- FE-Modellierung der Spritzguss-Variante in (in ANSA der Firma Beta CAE)
- CAD-Erstellung einer Hybrid-Variante
- FE-Modellierung der Hybrid-Varianten (4 verschiedene Varianten)
- Berechnung der FE-Modelle (mit dem Solver Nastran NX)
- Auswertung der FE-Ergebnisse (in META der Firma Beta CAE)

Anschließend werden die Ergebnisse der Bauteile verglichen und ihr Leichtbaupotential wird ermittelt. Nach dem Vergleich erfolgt eine Zusammenfassung in Form des Fazits sowie ein Ausblick darüber, welche Veränderungen in zukünftigen Modellen eingefügt werden könnten, um eine Verbesserung der Ergebnisse zu erzielen.

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Einarbeitung in die grundlegenden Wissensgebiete, die für das Verständnis der Bachelorarbeit nötig sind.

### 2.1 Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode (FEM) ist ein rechnergestütztes Hilfsmittel, um im Ingenieurwesen Berechnungsaufgaben durchzuführen und Erkenntnisse über die physikalischen Eigenschaften von Bauteilen und Strukturen zu erhalten. Historisch betrachtet ist die FEM eine junge Methode, die sich erst durch die Verbreitung von leistungsstarken Personal Computer (PC) vollständig etablieren konnte [1, Kap. 1].

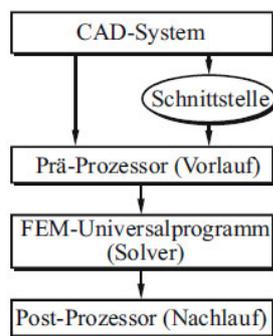


Abbildung 2.1: Konventionelle CAE-Prozesskette [2, S. 6]

Heutzutage gibt es eine Vielzahl von FEM-Programmen auf dem Markt, so dass je nach Bedürfnissen das passende Programm ausgewählt werden kann. Der grundlegende Ablauf einer Computer Aided Engineering (CAE) Prozesskette wird in Abbildung 2.1 deutlich. Zunächst wird ein CAD-Modell des zu untersuchenden Bauteils erstellt und daraufhin direkt oder über eine Schnittstelle an den Prä-Prozessor weitergeleitet. Hier wird das CAD-Modell zu einem FE-Modell aufbereitet. Dies geschieht durch das Vernetzen, bei dem das Bauteil in endlich viele kleine Bereiche aufgeteilt wird, die namensgebenden finiten Elemente. Diese sind an ihren Endpunkten, den Knoten, miteinander verbunden. Randbedingungen, äußere Lasten und die Materialeigenschaften werden in diesem Vorgang ebenfalls in das Modell integriert. Im nächsten Schritt wird dieses FE-Modell vom Solver berechnet und die Ergebnisse des Solvers werden im Post-Prozessor ausgewertet.

Die Grundlage der linearen FEM findet man im Hooke'schen Gesetz, welches die Spannung  $\sigma$  als Produkt des Elastizitätsmodul  $E$  und der Dehnung  $\varepsilon$  beschreibt [3, Kap. 2].

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.1)$$

Mit

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

und

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

ergibt sich daraus das Federgesetz:

$$F = k * u \quad \text{mit} \quad k = \frac{E * A}{L_0}; \quad u = \Delta L \quad (2.4)$$

Durch die Aufteilung in finite Elemente erhält man für jedes Element eine Elementsteifigkeitsmatrix und die gesuchten unbekanntenen Verschiebungen und Rotationen an den Knotenpunkten. Die Elementsteifigkeiten werden in der FEM in der Gesamtsteifigkeitsmatrix  $K$ , die Verschiebungen und Rotationen im Vektor  $\vec{U}$  und äußere Kräfte im Kraftvektor  $\vec{F}$  zusammengefasst.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

In (2.5) ist das umgeformte Hooke'sche Gesetz aus (2.4) zu erkennen. Da die Elementsteifigkeiten in den Zeilen und Spalten der dazugehörigen Knoten in der Gesamtsteifigkeitsmatrix eingetragen werden, sind die meisten Elemente außerhalb der Hauptdiagonalen gleich Null. Sobald diese Daten vorhanden sind, können die gesuchten Verschiebungen/Rotationen über die Lösung des Gleichungssystems berechnet werden. Mithilfe dieser Ergebnisse werden durch Rückrechnungen die auftretenden Spannungen und unbekannte Kräfte, wie z.B. Auflagerreaktionen, berechnet. Dieser Ablauf ist in Abbildung 2.2 dargestellt [1, Kap. 1].

Es gibt mehrere Arten von finiten Elementen. Diese reichen von einfachen Stab- und Balkenelementen, über Dreiecks- und Vierecksschalenelemente bis hin zu Tetra- und Hexaederelementen. Sie unterscheiden sich anhand ihrer Form, der Anzahl ihrer Knoten und den Freiheitsgraden an diesen. Jedes dieser Elemente besitzt eine eigene Elementsteifigkeitsmatrix, für dessen Berechnung sogenannte Formfunktionen benutzt werden. Formfunktionen stellen das Verschiebungsfeld  $U(x, y)$  eines Finiten Elements durch die Verschiebung seiner Knoten dar [3, Kap. 4]. Dadurch wird deutlich, dass die Genauigkeit der errechneten Verschiebung innerhalb eines Elementes abhängig vom Polynomgrad bzw.

der Knotenanzahl ist, da bei, exemplarisch 2 Knoten, nur ein linearer Verlauf darstellbar wäre. Dies bedeutet für die Handhabung eines FEM-Programmes, dass der Nutzer stets die Anforderungen des Modells mit den Möglichkeiten der Elementwahl vergleichen muss. Als Richtlinie kann hier gelten:

- Stahlbaustrukturen mit stabartigen Elementen (Stab, Balken)
- Dünnwandige Bauteile mit ebenen Elementen (Scheibe, Platte, Schale)
- Dickwandige Bauteile mit volumetrischen Elementen (Volumina, Kreisring-Elemente)

nachzubilden [2, Kap. 14].

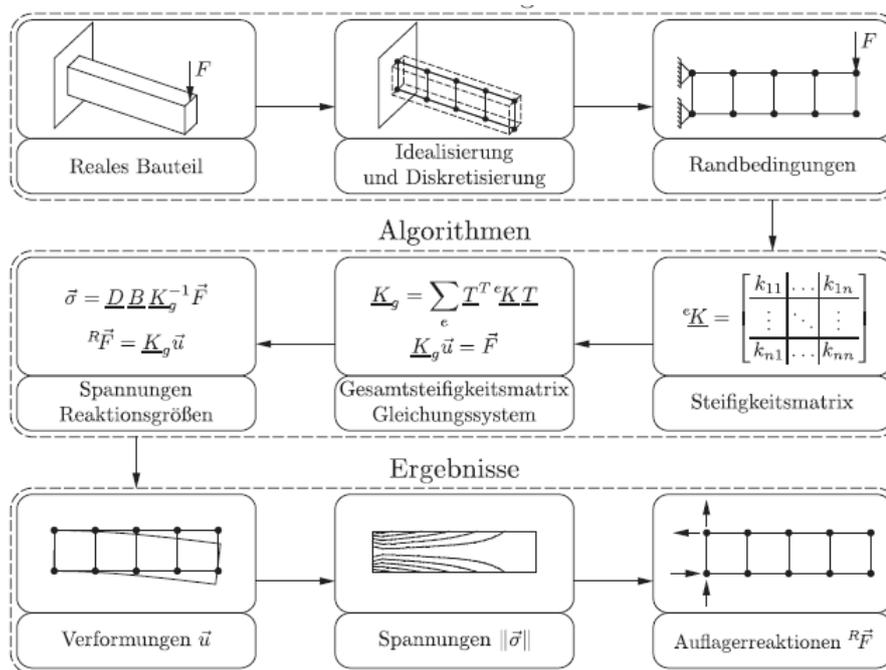


Abbildung 2.2: Ablauf einer FEM Berechnung [1, S. 4]

Als Beispiel wird im Folgenden die Herleitung eines ebenen Stab-Elements betrachtet (Abbildungen und Formeln aus [2, Kap. 5]).

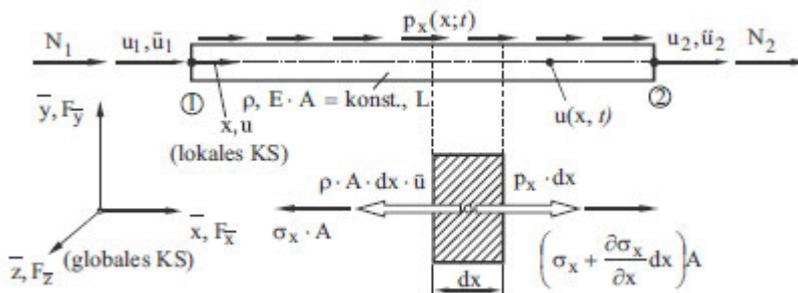


Abbildung 2.3: Impulsbetrachtung am linearen Stab-Element [2, Kap. 5]

Zuerst wird der Impulssatz des Stab-Elements (s. Abbildung 2.3) aufgestellt und wir erhalten folgende Differentialgleichung (DGL):

$$\rho * A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E * A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - p_x = 0 \quad (2.6)$$

Diese wird anschließend mit einer noch unbekanntem Formfunktion  $g_j(x)$  multipliziert und über  $L$  integriert:

$$\int_0^L \left( \rho * A * g_j \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E * A * g_j \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - g_j * p_x \right) dx = 0 \quad j = 1,2 \quad (2.7)$$

Um eine einfache Schwingungsdifferentialgleichung zu erhalten wird der mittlere Term, unter Zuhilfenahme der Produktregel der Differentiation, um eine Ordnung heruntersgesetzt, daraus folgt:

$$\int_0^L \left( \rho * A * g_j \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + E * A * \frac{\partial g_j}{\partial x} * \frac{\partial u}{\partial x} - g_j * p_x \right) dx - \left( E * A * g_j \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_0^L = 0 \quad (2.8)$$

Nun wird ein Ansatz für die unbekanntem Verschiebungen eingeführt:

$$u(x; t) = \sum_{i=1}^2 g_i(x) * u_i(t) = g_1(x) * u_1(t) + g_2(x) * u_2(t) \quad (2.9)$$

Mit den erforderlichen Ableitungen und in die ausintegrierte Formel (2.8) eingesetzt, wird die aufgelöste Gleichung zu:

$$\sum_{i=1}^2 \left( \int_0^L \rho * A * g_j * g_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \int_0^L E * A \frac{\partial g_j}{\partial x} * \frac{\partial g_i}{\partial x} dx * u_i \right) = \left( \int_0^L g_j * p_x * dx \right) + (N_2 * g_j(L) + N_1 * g_j(0)) \quad j = 1,2 \quad (2.10)$$

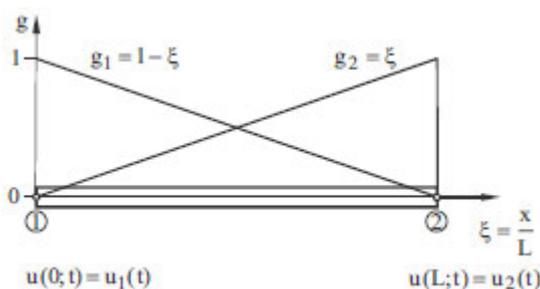


Abbildung 2.4: Formfunktionen für Stab-Element

Für die linearen Formfunktionen (s. Abbildung 2.4) werden folgende Funktionen benutzt:

$$g_1 = 1 - \frac{x}{L} \quad (2.11)$$

$$g_2 = \frac{x}{L} \quad (2.12)$$

Eingesetzt in (2.9):

$$u(x; t) = \left(1 - \frac{x}{L}\right) * u_1(t) + \frac{x}{L} * u_2(t) \quad (2.13)$$

In (2.10) steckt die gesuchte Schwingungs-DGL:

$$m * \ddot{u} + k * u = p_o + p_K \quad (2.14)$$

Durch das Einsetzen von (2.13) in (2.10) können die einzelnen Koeffizienten der Matrizen ausgerechnet werden:

$$m_{11} = \rho * A \int_0^L g_1 * g_1 dx = \rho * A \int_0^L \left(1 - 2\frac{x}{L} + \frac{x^2}{L^2}\right) dx = \frac{\rho * A}{3} L \quad (2.15)$$

$$m_{21} = \rho * A \int_0^L g_2 * g_1 dx = \rho * A \int_0^L \left(\frac{x}{L} - \frac{x^2}{L^2}\right) dx = \frac{\rho * A}{6} L \quad (2.16)$$

$$m_{22} = \rho * A \int_0^L g_2 * g_2 dx = \rho * A \int_0^L \frac{x^2}{L^2} dx = \frac{\rho * A}{3} L \quad (2.17)$$

$$k_{11} = E * A \int_0^L g_1' * g_1' dx = E * A \int_0^L \frac{1}{L^2} dx = \frac{E * A}{L} \quad (2.18)$$

$$k_{21} = E * A \int_0^L g_2' * g_1' dx = E * A \int_0^L -\frac{1}{L^2} dx = -\frac{E * A}{L} \quad (2.19)$$

$$k_{22} = E * A \int_0^L g_2' * g_2' dx = E * A \int_0^L \frac{1}{L^2} dx = \frac{E * A}{L} \quad (2.20)$$

Dadurch ergibt sich für die Massenmatrix des Stab-Elements:

$$m = \rho * A * L \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ 1 & 1 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Und für die Element-Steifigkeitsmatrix:

$$k = \frac{E * A}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Mit mehreren Elementen im System, können nun die einzelnen Element-Steifigkeitsmatrizen in der Gesamtsteifigkeitsmatrix (2.5) zusammengefasst werden.

Nachfolgend werden die Begriffe der Singularitäten, RBE2-Elemente und Schalen erklärt.

Innerhalb der FEM-Berechnungen kann es zu Singularitäten kommen. Dies sind lokale Spannungsspitzen, die bei einer Verfeinerung des Netzes gegen unendlich laufen, das heißt, sie konvergieren nicht zu einem bestimmten Wert. Singularitäten befinden sich an Orten der Krafteinleitung, Einspannungen oder bei scharfen Kanten des Bauteils.

Durch die Netzverfeinerung lässt sich ermitteln, ob es sich bei dem lokalen Maximum um eine Singularität handelt. Sobald dies festgestellt wurde kann die Veränderung des Modells, z.B. Linienlast anstatt einer punktuellen Last oder eine Berechnung der Spannung mithilfe von Extrapolation oder einer Durchschnittsberechnung, zu einer besseren Nachbildung der Realität führen.

Bei den Rigid Body Elements(RBE), handelt es sich um Verbindungen von Knoten und Elementen. Die RBE2 Elemente (s. Abbildung 2.5) stellen eine starre Verbindung zwischen beliebig vielen abhängigen und einem einzigen unabhängigen Knoten her.

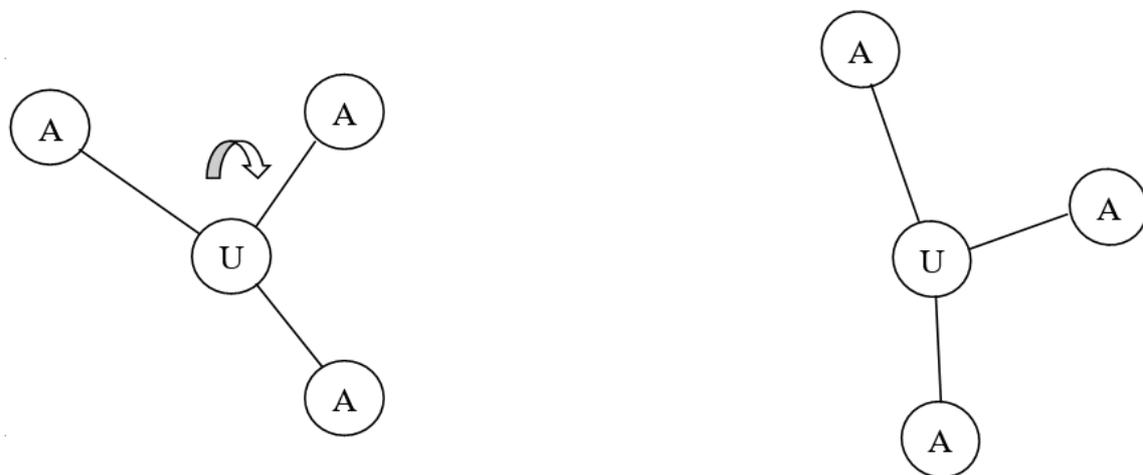


Abbildung 2.5: RBE2 Verschiebungen

Durch diese Verbindung werden die Rotationen und Verschiebungen des unabhängigen Knotens auf die abhängigen Knoten übertragen. Verdrehungen werden exakt übertragen, Verschiebungen haben jedoch noch den Anteil der Verdrehung \* Hebelarm integriert.

In dieser Arbeit werden für die Modellierung der Bauteile Schalenelemente (s. Abbildung 2.6) benutzt. Hierbei handelt es sich um eine Kopplung aus Scheiben- und Plattenelementen. Für Scheiben gilt, dass die Belastung in der Scheibenebene liegt und bei Platten senkrecht zur Mittelfläche der Platte. Durch die Kopplung dieser beiden Elemente entsteht die Schale, welche 6 Freiheitsgrade an jedem Knoten besitzt und somit beide Belastungsarten nachbilden kann.

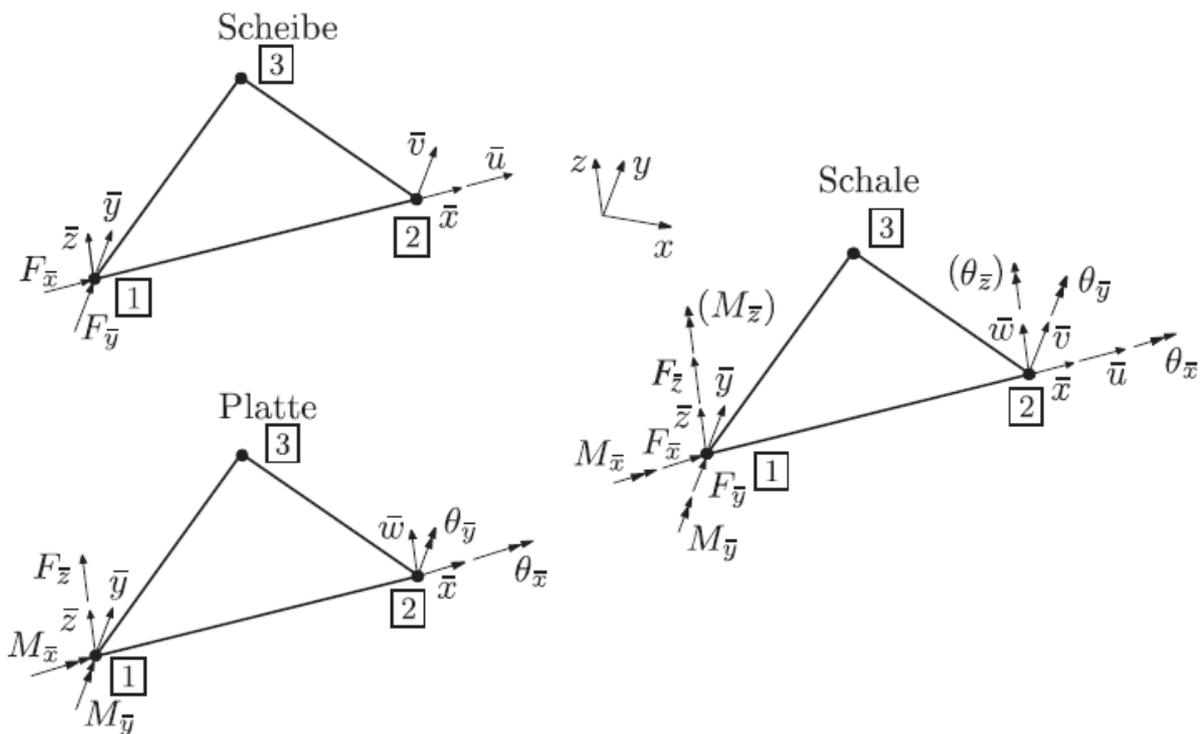


Abbildung 2.6: Kopplung von Scheibe und Platte zu Schale

Alle drei Elemente müssen eine deutlich geringe Dicke als ihre anderen Abmessungen aufweisen. Diese Dicke wird in der FEM virtuell als Eigenschaft des Elements aufgebracht. Hierdurch lassen sich gleiche Geometrien mit verschiedenen Dicken, schnell berechnen.

## 2.2 Leichtbau

Durch den Wunsch, die Effizienz von mechanischen Systemen zu steigern gewinnt der Leichtbau in der Fahrzeugindustrie immer mehr an Bedeutung. Die Vorteile liegen beispielsweise in der Steigerung der Nutzlast für Nutzfahrzeuge sowie der Minderung von Roll- und Beschleunigungswiderstand, was zu einer Verringerung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen führt. Bei einer Gewichtsreduzierung von 100 kg können so 0,5 l Kraftstoff/100 km und 12 g/km CO<sub>2</sub> eingespart werden [4, Kap. 1].

Da das Aufkommen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen stetig zunimmt spielt der Leichtbau auch hier eine große Rolle, denn die Energiespeicher dieser Autos haben ein hohes Gewicht, welches durch die Leichtbaukonstruktion anderer Bauteile kompensiert werden muss. Es ist jedoch stets zu gewährleisten, dass die Sicherheit der Insassen nicht vermindert wird.

Die Fortschritte in den Materialwissenschaften haben dazu geführt, dass immer mehr hybride Lösungen eingesetzt werden. Dies sind Bauteile, in denen mehrere Materialien miteinander vereint werden. Durch eine belastungsspezifische Verteilung der Materialien im Bauteil können so hohe Steifigkeiten bei minimalem Gewicht erzielt werden [4, Kap. 1]. Gewichtsreduzierung kann einerseits über die Konstruktion, andererseits über die Materialauswahl erzielt werden. Verbundwerkstoffe sind Materialien, die immer öfter zum Einsatz kommen. Sie bestehen aus Fasern, welche mit einem Matrixwerkstoff umschlossen werden. Die Fasern bestehen zum Beispiel aus Glas oder Kohlenstoff. Die Vorteile sind unter anderem eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei niedriger Dichte sowie Korrosionsbeständigkeit.

In dieser Arbeit werden Bauteile aus Organoblech betrachtet. Dies sind Endlosfasergewebe, die in einer thermoplastischen Matrix eingebettet sind. Die Fasern in dem Gewebe stehen rechtwinklig zueinander und sind in Kett- und Schussrichtung meist gleichmäßig verteilt. Je nach Belastung des Bleches, kann dieser Verteilung auch angepasst werden. Auf Abbildung 2.7 ist ein solches Gewebe dargestellt.

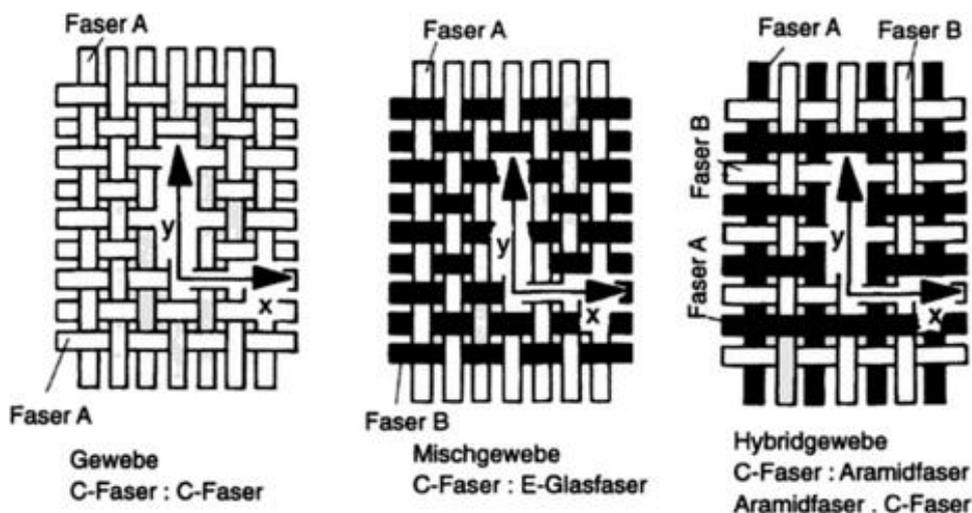


Abbildung 2.7: Gewebebeispiele [5, Kap. 2]

Da die Organobleche in einer thermoplastischen Matrix eingebettet werden, können sie leicht umgeformt werden. Um daraus anschließend ein Hybridbauteil zu fertigen, werden die Organobleche mit faserverstärktem Polyamid umspritzt (s. Abbildung 2.8). Bei einer gut gewählten Konstruktion können die Arbeitsschritte des Tiefziehens und des Spritzgießen in einem Werkzeug durchgeführt werden. Hierdurch kommt es zu deutlichen Zeiteinsparungen in der Produktion. Da bei einem Organoblech die Matrix sowie der umspritzende Kunststoff aus demselben Material bestehen, entsteht eine stoffschlüssige Verbindung. Diese Verbindungen können mit einer Verklebung oder Verschweißung verglichen werden und erhöhen die mechanischen Kennwerte des Gesamtbauteils. [6]



**Abbildung 2.8: Organoblech Halbzeug und fertiges Bauteil [6]**

### 3 CAD-Konstruktion und FEM-Erstellung

Bei dem zu betrachtenden Bauteil handelt es sich um einen Pedallagerbock. Die Hauptfunktion dieses Bauteils besteht darin, das Bremspedal zu lagern und die auftretenden Kräfte an die Struktur des Fahrzeugs weiterzuleiten. Zusätzlich ist der Bremskraftverstärker (BKV) an dem Bauteil angebracht, welcher die Betätigung des Bremspedals mit einer aufgebrauchten Kraft unterstützt. Im Zuge dieser Arbeit werden folgende Kräfte angenommen:

$$\text{Betätigungskraft} \quad F_B = 2300 \text{ N} \quad (3.1)$$

$$\text{BKV-Kraft} \quad F_{BKV} = 3000 \text{ N} \quad (3.2)$$

Diese Kräfte sind als Extremwerte zu betrachten, die bei einer Vollbremsung in Notsituationen entstehen können. Es muss sichergestellt werden, dass das Bauteil auch in solchen Lastfällen fehlerfrei funktioniert.

#### 3.1 Aluminium-Spritzguss-Modell

Zuerst wird die ursprüngliche Variante, ein Aluminium-Spritzguss-Bauteil, erstellt. Dieses wird in Siemens NX erstellt. Die Geometrie lag zu Beginn der Arbeit bereits vor, daher wird hier nicht auf die detaillierte Konstruktion des Bauteils eingegangen.

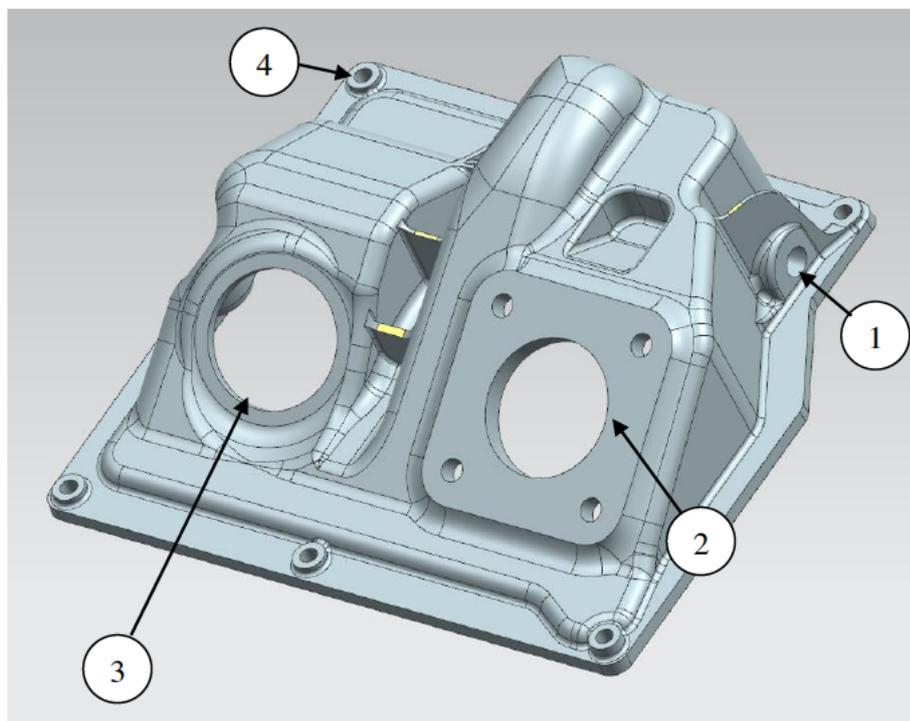


Abbildung 3.1: CAD-Modell des Pedallagerbocks

Die Hauptmerkmale des Bauteils sind die Lagerung des Pedals (Pos. 1), die Anschraubstelle des BKV (Pos. 2), eine Durchführung der Lenksäule (Pos. 3) sowie die Anbindung an die Struktur des Fahrzeuges über sieben Verschraubungspunkte (Pos. 4), die sich auf einem Kragen um das Bauteil herum befinden (s. Abbildung 3.1). Für eine Verbesserung der Stabilität und des Kraftflusses sind Stützrippen in das Bauteil eingebracht. Weitere Ansichten sind in Anhang B zu finden.

Das fertiggestellte CAD-Modell wird nun in das Datenformat STEP umgewandelt, um es in den Prä-Prozessor ANSA einlesen zu können.

Mithilfe des in ANSA integrierten Casting Tools erfolgt eine automatische Erzeugung eines Mittelflächenmodells anhand von einstellbaren Parametern, wie der Elementlänge oder des Element-Typs, zu sehen in Abbildung 3.2. In diesem Fall wurde für die Dicke und die Elementlänge 1 mm gewählt. Auf diese virtuell angelegten Mittelflächen werden in diesem Schritt die Schalenelemente gesetzt, die für die Berechnung benötigt werden.

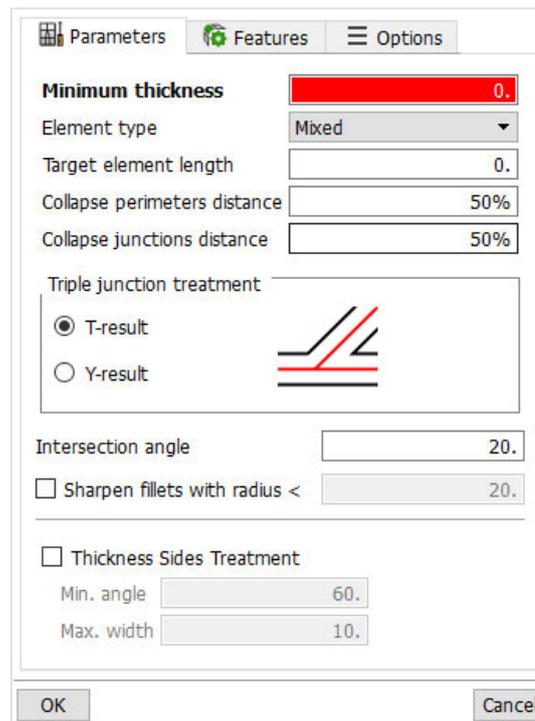


Abbildung 3.2: Casting Tool Parameter

Simple Geometrien im Bauteil, wie Flächen und große Radien, werden mit diesem Casting Tool bereits sehr gut erstellt, jedoch muss der Benutzer im Detail einiges nacharbeiten, so dass am Ende ein FE-Netz entsteht, welches bei der Berechnung zuverlässige Ergebnisse liefert. Hierfür wird der Align Manager benutzt, mit welchem der Nutzer die Mittelflächen den zugehörigen CAD-Geometrien zuordnen kann.

Auf Abbildung 3.3 ist eine solche Nachbesserung des FE-Netzes an einem der Anschraubpunkte für die Struktur des Fahrzeugs zu sehen. Der Zylinder des Durchgangslochs wird nicht korrekt erkannt und es muss eine neue Zylinder-Geometrie erzeugt werden. Dies geschieht mithilfe eines Zylinder-Tools. Mit Angabe von jeweils 3 Punkten auf einem Kreis werden zwei Mittelpunkte ausgewählt. Diese dienen als Anfangs- und Endpunkt der Zylinder-Achse. Nach Eingabe des Durchmessers wird daraufhin der Zylinder erstellt.

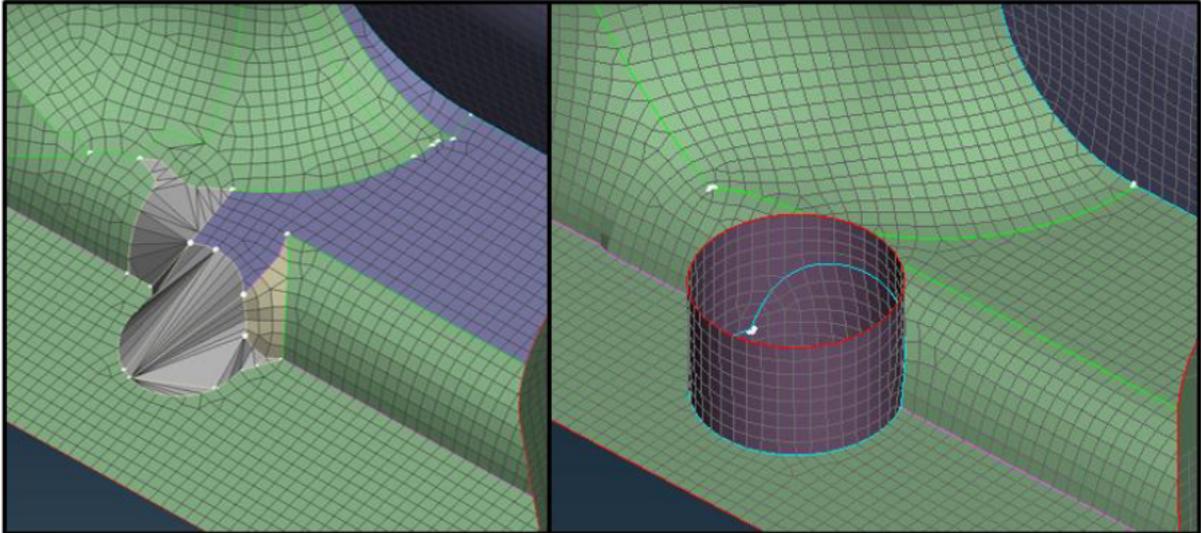


Abbildung 3.3: Netz-Verbesserung

Nachdem die Netzfehler beseitigt wurden, erhält man ein FE-Modell, siehe Abbildung 3.4, welches nun noch mithilfe von Qualitätskriterien überprüft wird.

Diese Kriterien beinhalten Punkte wie:

- Aspect ratio = Das Seitenlängenverhältnis eines Elements
- Skewness = Winkel zwischen den Mittelpunktlinien eines Elements
- Warping = Abweichung eines Quad-Elements innerhalb einer Ebene
- Min/max length = Minimale und maximale Länge einer Element-Seite

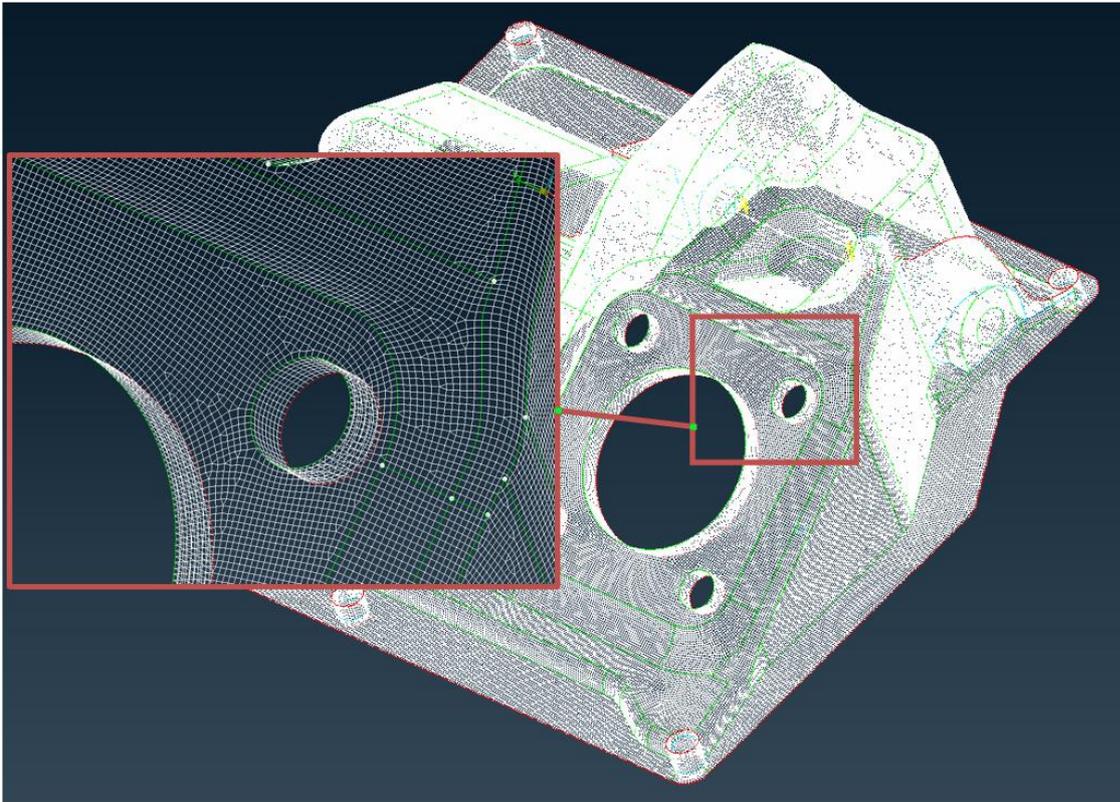


Abbildung 3.4: FE-Modell Pedallagerbock

Durch eine programminterne Funktion lässt sich das FE-Netz in Kombination mit den Qualitätskriterien verbessern, so dass ein Großteil der Fehler eliminiert wird. Durch manuelle Nacharbeit werden die restlichen Fehler behoben und man erhält ein nahezu fehlerfreies Netz. Dies ist wichtig, da so ein falsches Rechenergebnis aufgrund von Netzungenauigkeiten ausgeschlossen werden kann und ein Vergleich zwischen mehreren FE-Modellen möglich ist.

Dem fertigen Netz werden nun die Materialkennwerte und Eigenschaften zugeordnet. Hierfür wird eine Materialkarte erstellt, die die Materialeigenschaften beinhaltet. Dazu zählen:

- E-Modul  $E$  = 70000 N/mm<sup>2</sup>
- Poissonzahl  $\nu$  = 0,34
- Dichte  $\rho$  = 2,7 g/cm<sup>3</sup>

Nachdem die Karte erstellt wurde, wird sie den Properties, also den Eigenschaften der finiten Elemente, des Modells zugeordnet. In diesen Properties befinden sich zusätzlich die Informationen über die Dicke der jeweiligen Bereiche. Durch das Anfertigen von mehreren Karten können so auch Multimaterial-Bauteile modelliert werden.

Im nächsten Schritt werden die Aufbringung und Weiterleitung der Kräfte sowie die Randbedingungen im System betrachtet.

Hierfür werden mit Hilfe von Mittelflächen-Modellen (s. Abbildung 3.5), das Bremspedal (Pos. 1) und der Umlenkhebel (Pos. 2) dargestellt. Die Achse dieser Teile ist in diesem Modell als einfaches Balkenelement realisiert. Die Anschraubgeometrie des BKV (Pos. 3) wird mit RBE2 Elementen in einem Primary-Knoten verbunden, auf welchen die Kraft  $F_{BKV}$  (3.2) aufgebracht wird. Ebenso wird diese Kraft, entgegengesetzt der Krafrichtung an der Anschraubgeometrie, am Umlenkhebel angesetzt. Dieses bildet die, für die Bedienung des Bremspedals, unterstützende Kraft sowie die Reaktionskräfte an den Verschraubungen ab. Mit einem RBE2 (Rigid Body Element 2) lassen sich mehrere Knoten miteinander koppeln. Es gibt einen unabhängigen und mehrere abhängige Knoten. Sämtliche Verschiebungen und Rotationen des unabhängigen Knoten werden auf die abhängigen Knoten übertragen. Es besteht eine starre Verbindung zwischen den Knoten, sie sind raumfest zueinander.

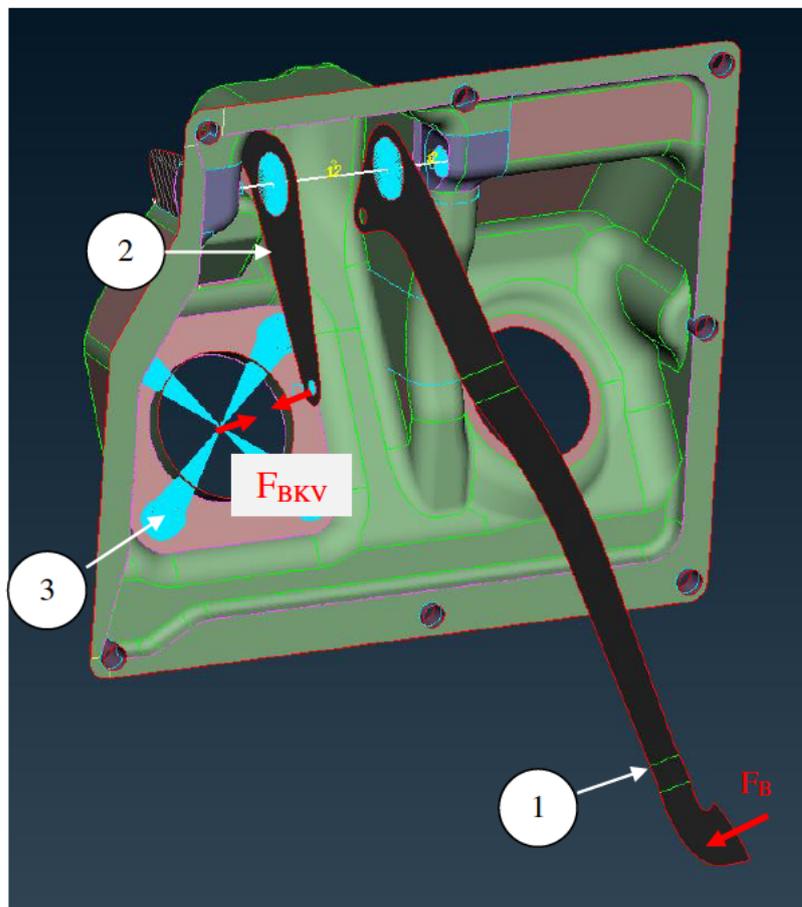


Abbildung 3.5: Pedal und FE-Kopplung

Für die Verbindung des Bremspedals und des Umlenkhebels werden ebenfalls RBE2-Verbindungen eingefügt. Durch diese starre Verbindung der Knoten wird die Annahme getroffen, dass das Lager klemmt und das komplette Moment in den Pedallagerbock geleitet wird. Die Kraft  $F_B$  (3.1) wird am freihängenden Ende des Bremspedals, normal zur vorderen Fläche, aufgebracht und die Freiheitsgrade der äußeren Verschraubungspunkte werden blockiert, was eine feste Einspannung simuliert.

### 3.2 Hybrid-Varianten

In diesem Abschnitt wird der Pedallagerbock in eine Hybrid-Variante umkonstruiert und anschließend per FEM berechnet. Es wird ein Kunststoff-Metall- und ein Kunststoff-Organo-Hybrid betrachtet. Beide Hybrid-Varianten besitzen die gleiche Geometrie. Sie unterscheiden sich in den Materialien, welche in den FE-Modellen zugeordnet werden.

#### 3.2.1 Erstellung des CAD-Modells

Bei der Konstruktion des CAD-Modells wird das Aluminium-Modell als Grundlage verwendet. Zunächst wird hierfür eine einfache Blechkonstruktion mit einer Dicke von 3 mm innerhalb des Baumraums erstellt. Durch das Ursprungsmodell sind die seitlichen (1), hinteren (2) und die oberen (3) Flächen, sowie die Anschlussfläche, bereits definiert (auf Abbildung 3.6 zu sehen). Die verbleibende Fläche, die zu definieren ist, ist die vordere Schräge (4), an der der BKV angebracht wird. Da der BKV an der Kunststoffkonstruktion verschraubt werden soll, wird die schräge Fläche parallel zu der Anschlussfläche des BKV um 6 mm nach innen verschoben.

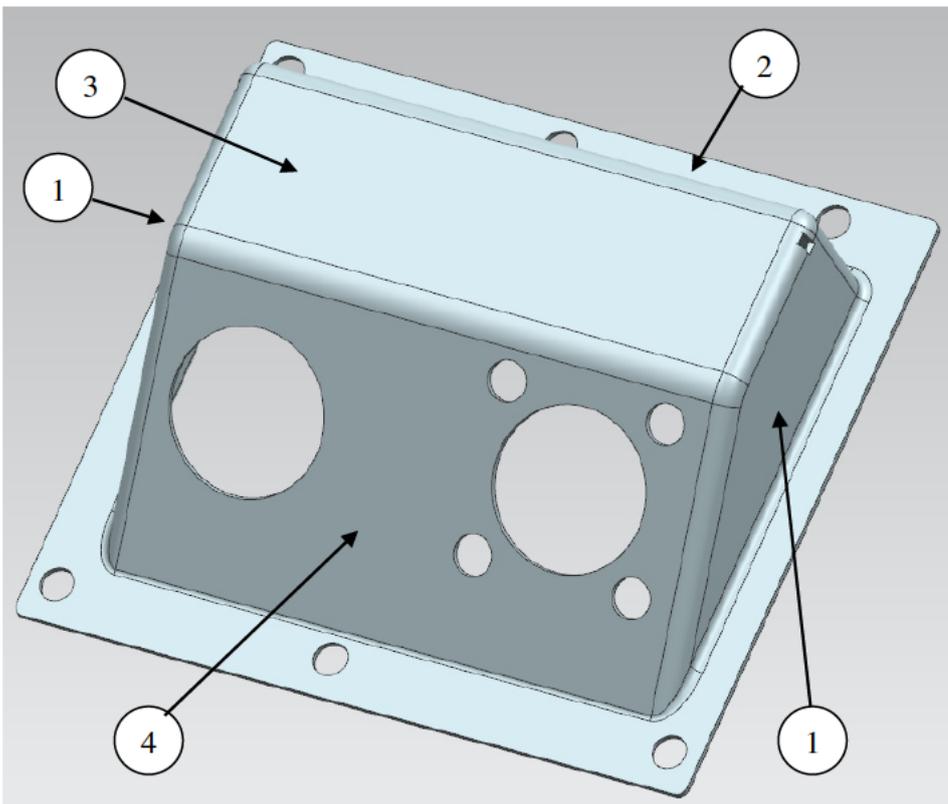


Abbildung 3.6: Flächen der Blechgeometrie

Die Positionen der Durchgangslöcher für die Anschraubpunkte an der Struktur des Fahrzeuges, der Lenksäule sowie des BKV wurden von dem Aluminiummodell übernommen. Der Radius dieser Löcher wurde um 4 mm vergrößert, da an diesen Stellen die Kunststoffgeometrie eingebracht wird.

Die Kunststoffgeometrie, welche in Abbildung 3.7 zu sehen ist, orientiert sich an den Lagerpunkten des Pedals. Hier werden 4 mm dicke Zylinder-Elemente (1) für die Lagerung eingefügt. Von diesen verlaufen senkrechte Stützrippen (2) mit einer Dicke von 6 mm bis zu der Innenfläche des Blech-Bauteils. Um die auftretenden Kräfte auf eine größere Fläche zu verteilen sind schräg verlaufende Stützrippen (3) angebracht. Diese haben eine Breite von 10 mm und 8 mm. Die 10 mm Rippen sind an der pedalzugewendeten Seite angebracht, da hier, anhand der FEM-Ergebnisse des Spritzguss-Bauteils, die größeren Kräfte auftreten. Um eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte auf der Blechoberfläche zu erhalten, wird auf der Grundfläche eine 10 mm hohe Rippenstruktur (4) erstellt.

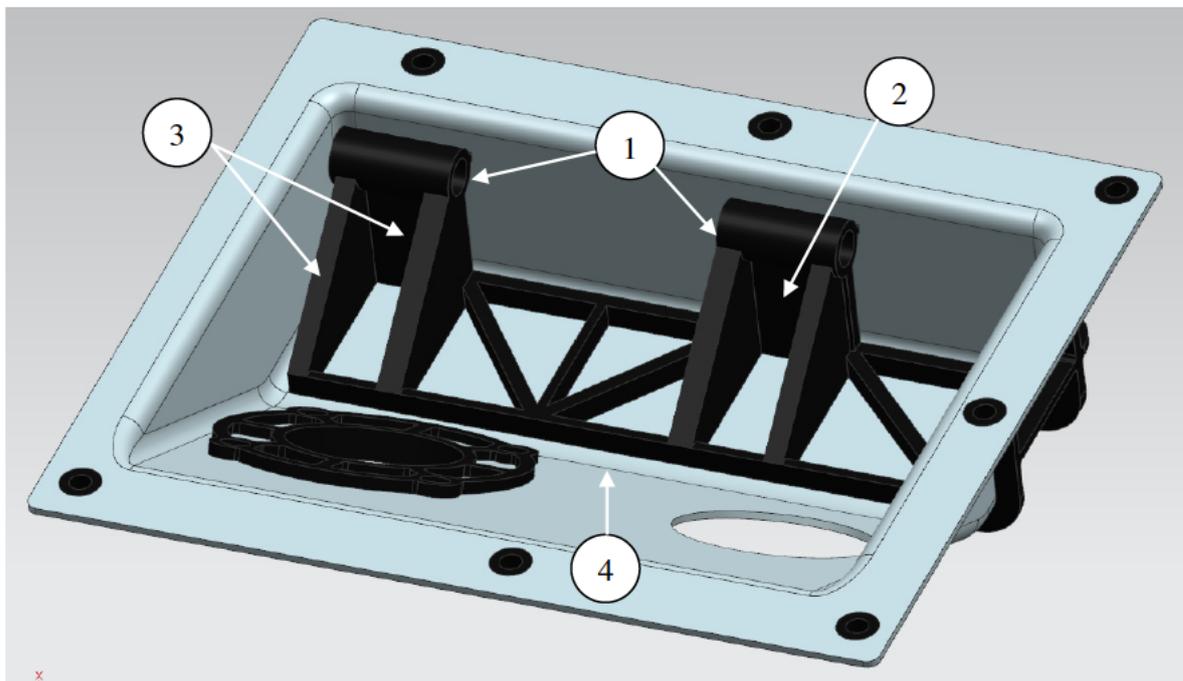


Abbildung 3.7: Innere Kunststoffgeometrie

Die Außenseite ist ebenfalls mit einer Kunststoffgeometrie umspritzt (s. Abbildung 3.8). Dies dient der Kraftverteilung im gesamten Bauteil, sowie der Verbindung zu den Anschraubpunkten (1) der Fahrzeugstruktur. Auch hier sind die Rippen 10 mm hoch und besitzen eine Dicke von 6 mm (z.B. umlaufende Rippe am Kragen (2)) oder 4 mm (z.B. horizontal verlaufende Rippen (3)). Die Außen- und Innengeometrie sind an mehreren Punkten miteinander verbunden, dies wird durch Löcher im Blech realisiert. Eine dieser Stellen sieht man in Abbildung 3.6 oben rechts im Blech. Auf der linken Seite ist ebenfalls ein solches Durchgangsloch. Abbildung 3.9 (das Blech ist transparent dargestellt) zeigt ein Durchgangsloch (1) für den Kunststoff direkt an der Lagerstelle. Hierdurch können die entstehenden Torsions- und Horizontalkräfte aufgenommen und weitergeleitet werden.

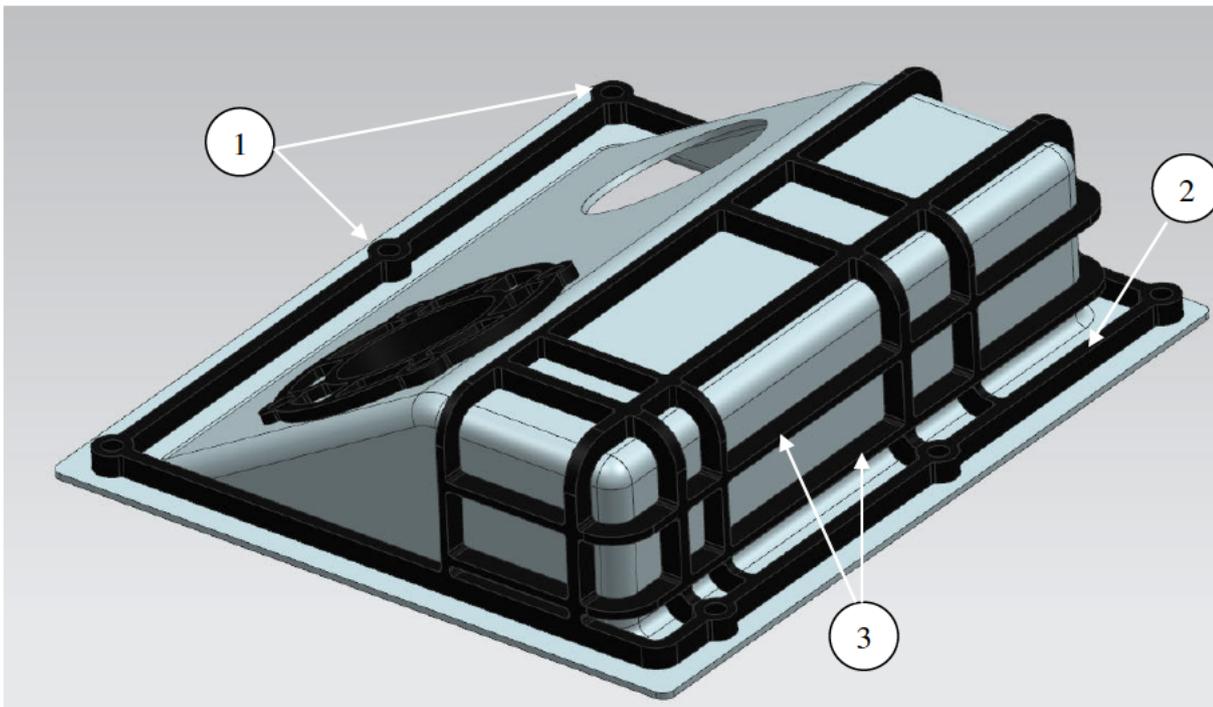


Abbildung 3.8: Äußere Kunststoffgeometrie

Für die Anbindung des BKV (s. Abbildung 3.10) werden die Anschraubpunkte mit Kunststoff, kreisförmig mit einem Radius von 63 mm, verbunden. Die Anschraubpunkte selbst und die Hauptdurchführung in der Mitte bestehen aus 4 mm dicken Zylindern. Die Hauptdurchführung und der äußere Ring sind mit 6 mm breiten Rippen verbunden. Die Geometrie befindet sich sowohl außerhalb als auch innerhalb des Blechs, so dass eine feste Verbindung besteht.

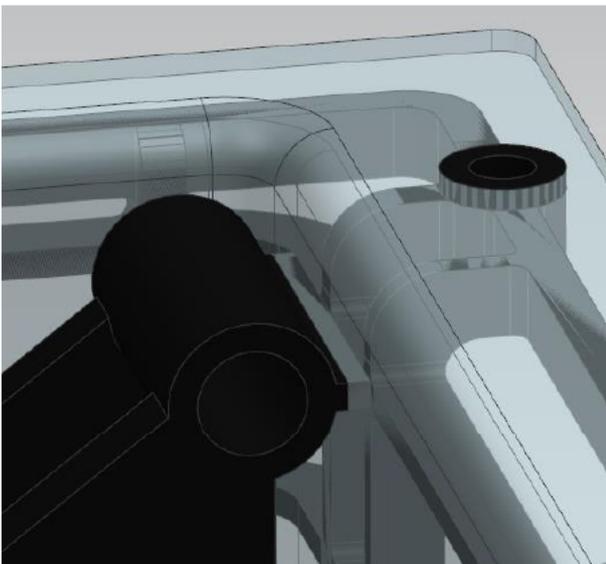


Abbildung 3.9: Durchgangslot der Lagerstelle

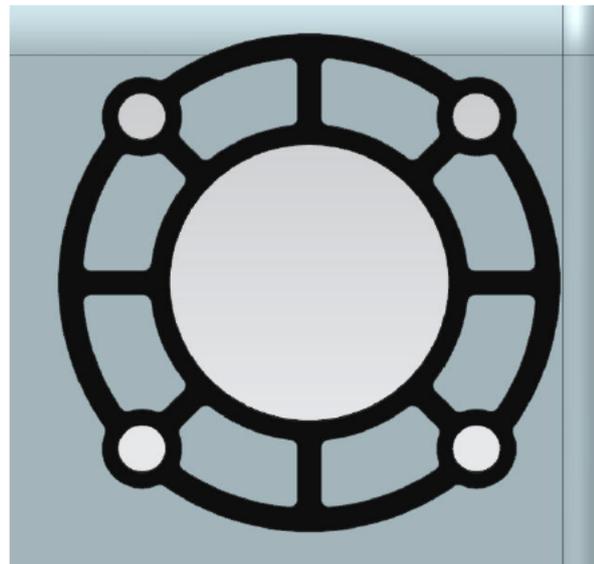


Abbildung 3.10: Anschraubgeometrie BKV

Nachdem das Modell fertiggestellt wurde, wird es in das Step-Datenformat umgewandelt und an ANSA übergeben.

### 3.2.2 FE-Modell

Das CAD-Modell wird nun wie auch bei der Aluminium-Variante in ANSA in ein FE-Modell umgewandelt. Hierfür wird erneut das Casting-Tool zur Hilfe genommen. Da das Modell simpel gehalten wurde und die Rippen deutlich höher als breit sind, können die Mittelflächen leicht erstellt werden. An bestimmten Stellen, wie den Anschraubpunkten, muss erneut nachgearbeitet werden, der Aufwand ist jedoch deutlich geringer. Auf Abbildung 3.11 ist das fertige Mittelflächenmodell zu sehen.

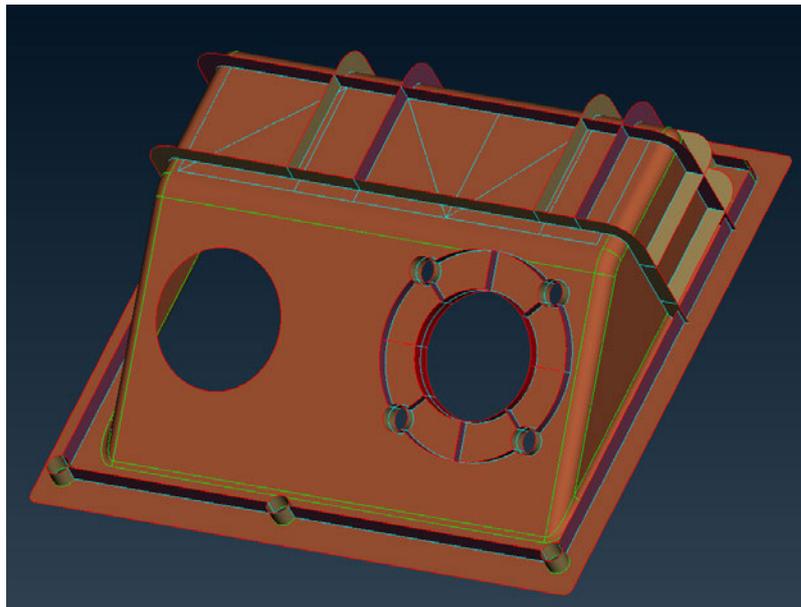


Abbildung 3.11: Mittelflächenmodell der Hybridvariante

Nachdem die Flächen erstellt wurden, werden auch hier die Qualitätskriterien aus Kapitel 3.1 eingeführt und das FE-Netz daraufhin angepasst. Hierdurch können die unterschiedlichen Modelle besser miteinander verglichen werden, da die Netze dieselben Eigenschaften besitzen.

Den einzelnen Flächen werden nun ihre Dicken, welche in Kapitel 3.2.1 angegeben sind, zugeordnet. Bei dem Blech handelt es sich hierbei um die Dicke und bei den Rippen um deren Breite.

Anschließend werden die Materialdaten eingetragen und den Flächen zugeordnet. Das Stahlblech erhält die Werte:

- E-Modul  $E$  = 210000 N/mm<sup>2</sup>
- Poissonzahl  $\nu$  = 0,3
- Dichte  $\rho$  = 7,85 g/cm<sup>3</sup>

Die Materialkarte (s. Abbildung 3.12) des Kunststoffs wird mit folgenden Werten angelegt:

- E-Modul E = 20400 N/mm<sup>2</sup>
- Poissonzahl  $\nu$  = 0,38
- Dichte  $\rho$  = 1,69 g/cm<sup>3</sup>

Bei dem Kunststoff handelt es sich um CELSTRAN® PA6-GF60-01 (s. Datenblatt Anhang A), dies ist ein faserverstärkter Polyamid(PA)-Werkstoff. Er wird zusätzlich mit 60% Glasfasern verstärkt. Dieser Kunststoff wurde ausgewählt da das später verwendete Organoblech ebenfalls eine Matrix aus PA und ein Gewebe aus Glasfasern besitzt. Durch die Verwendung desselben Materials in Matrix und Kunststoff-Umspritzung entsteht die in Kapitel 1.2 angesprochene stoffschlüssige Verbindung zwischen den Bauteilen.

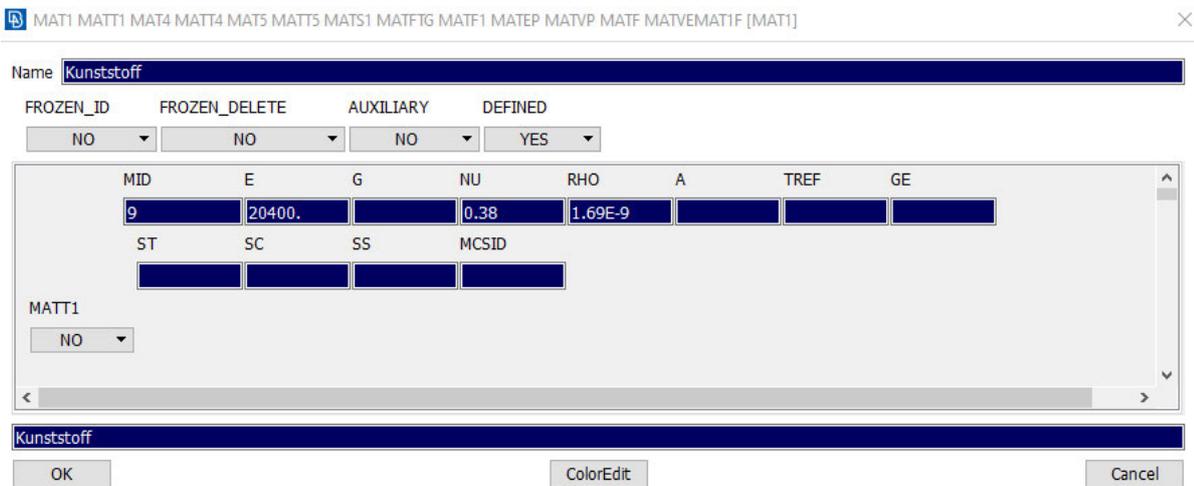


Abbildung 3.12: Kunststoff-Materialkarte

Für die Kraftereinleitung folgt, entsprechend dem Vorgehen aus Kapitel 3.1, die Erstellung von RBE2-Elementen an den Lagerstellen und an den Mittelflächenmodellen der Pedale. Die Kraftangriffspunkte, ihre Richtung und Größe wurden nicht verändert, da die Rahmenbedingungen der Modelle gleich sind und so ein Vergleich der Varianten möglich wird. Mit dem fertiggestellten FE-Modell können im nächsten Schritt die verschiedenen Varianten erstellt werden.

### 3.2.3 Variantenerstellung

Das jetzt vorliegende FE-Modell dient als Grundlage für sämtliche zu berechnende Hybrid-Varianten. Hierfür müssen in den Flächen- und Materialeigenschaften einige Parameter angepasst werden.

Zum einen wird der Stahlblech-Hybrid mit mehreren Blechdicken berechnet, da die zunächst erstellte 3 mm Stärke ein zu hohes Gewicht zur Folge hat. Es werden 3 verschiedene Modelle angelegt - mit 3 mm, 2 mm und 1,5 mm Blechstärke. Da es sich um Mittelflächen handelt und die Dicken symmetrisch auf die Flächen aufgetragen werden, muss lediglich in den Eigenschaften, der entsprechenden Flächen, die Dicke verändert werden. Die aufgetragenen Kräfte und Einspannungen bleiben, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, unverändert.

Als nächstes wird die Organoblech-Variante angelegt. Hier sind noch andere Punkte zu beachten, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Da das Material Organoblech ein Fasergewebe in einer Matrix ist, hat es kein isotropes Verhalten (gleiche Steifigkeiten in alle Richtungen) wie Stahl oder Aluminium, sondern ein orthotropes Materialverhalten. Dies bedeutet, dass das Verhalten des Materials nicht in alle Richtungen gleich ist, da die Fasern den Hauptanteil der Spannungen und Kräfte aufnehmen und dies nur in ihre Faserrichtung tun. Um dieses Verhalten zu simulieren, wird zunächst die Hauptfaserrichtung im FE-Modell angegeben (s. Abbildung 3.13). Durch das Markieren von Bauteilkanten kann die Richtung der Material-Koordinatensysteme vorgegeben werden und sämtliche finite Elemente werden somit in eine bestimmte Richtung ausgerichtet. Hier wurde jeweils die linke und rechte Außenkante der Blechgeometrie verwendet.

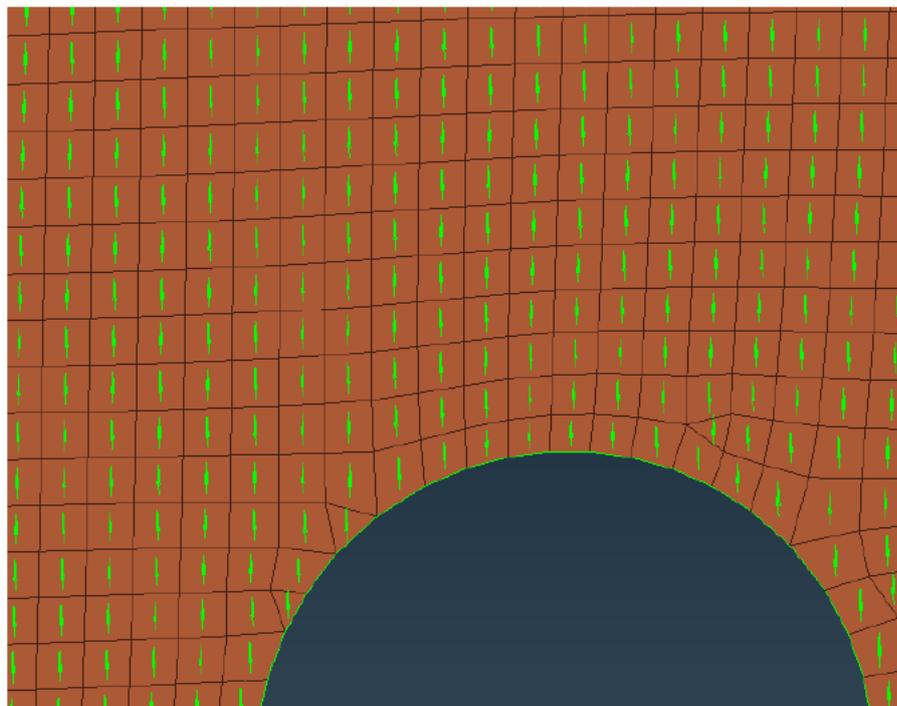


Abbildung 3.13: Faserrichtung FE-Modell

Anschließend wird eine MAT8 Materialkarte (s. Abbildung 3.14) angelegt. Mit dieser können orthotrope Materialeigenschaften für das Element bestimmt werden.

MID	E1	E2	NU12	G12	G1Z	G2Z	RHO
10	18000.	18000.	0.3	5990.			1.8E-9

A1 A2 TREF Xt Xc Yc Yc S

GE F12 STRN

MATT8 NO

Abbildung 3.14: Materialkarte Organoblech

Es ist zu erkennen, dass man zwei unterschiedliche E-Module eintragen muss, da orthotrope Materialien unterschiedliche E-Module in ihre Hauptfaserrichtung und rechtwinklig dazu besitzen können. Das verwendete Organoblech Tepex® dynalite 102-RG600(x)/47% (s. Datenblatt Anhang A) besitzt ein 2/2 Twill-Gewebe (s. Abbildung 3.15), dies ist ein gleichmäßig verteiltes Gewebe und die Fasern sind in Kett- und Schussrichtung gleich verteilt. Hierdurch kommt es zu einem gleichbleibenden E-Modul in beiden Richtungen.



Abbildung 3.15: 2/2 Twill Gewebe [7]

Das Organoblech hat folgende Kennwerte:

- E-Modul  $E_{1/2}$  = 18000 N/mm<sup>2</sup>
- Poissonzahl  $\nu$  = 0,3
- Dichte  $\rho$  = 1,8 g/cm<sup>3</sup>

Für das Schubmodul  $G$  wurde der Wert 5990 N/mm<sup>2</sup> gewählt, dieser stammt aus Erfahrungswerten. Die vier Hybrid-Modelle werden nun in NX-Nastran mit Hilfe des Solvers 101 (linear statisch) berechnet und anschließend werden die Ergebnisse im Postprozessor META ausgewertet.

## 4 Auswertung und Vergleich der FE-Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die auftretenden Spannungen der Modelle aufgezeigt und anschließend die Modelle bezüglich ihres Gewichts untersucht.

### 4.1 Auswertung des Aluminium-Spritzguss-Modells

Das fertiggestellte FE-Modell wird in den Solver NX-Nastran übertragen und dort berechnet, anschließend wird die Berechnung mit dem Postprozessor META ausgewertet. Für die Auswertung der Ergebnisse schauen wir uns die Verschiebungen, auf Abbildung 4.1, und die auftretenden Spannungen, auf Abbildung 4.2, im Detail an.

Bei den Verschiebungen entsteht ein Maximum von 0,12 mm im Bereich der Verstärkungsrippe (Pos. 1) zwischen Außenhaut und dem Anschlag des Umlenkhebels. Eine Verstärkung der Rippe oder das Anbringen einer weiteren Rippe auf der Außenseite könnte diese Verschiebung verringern.

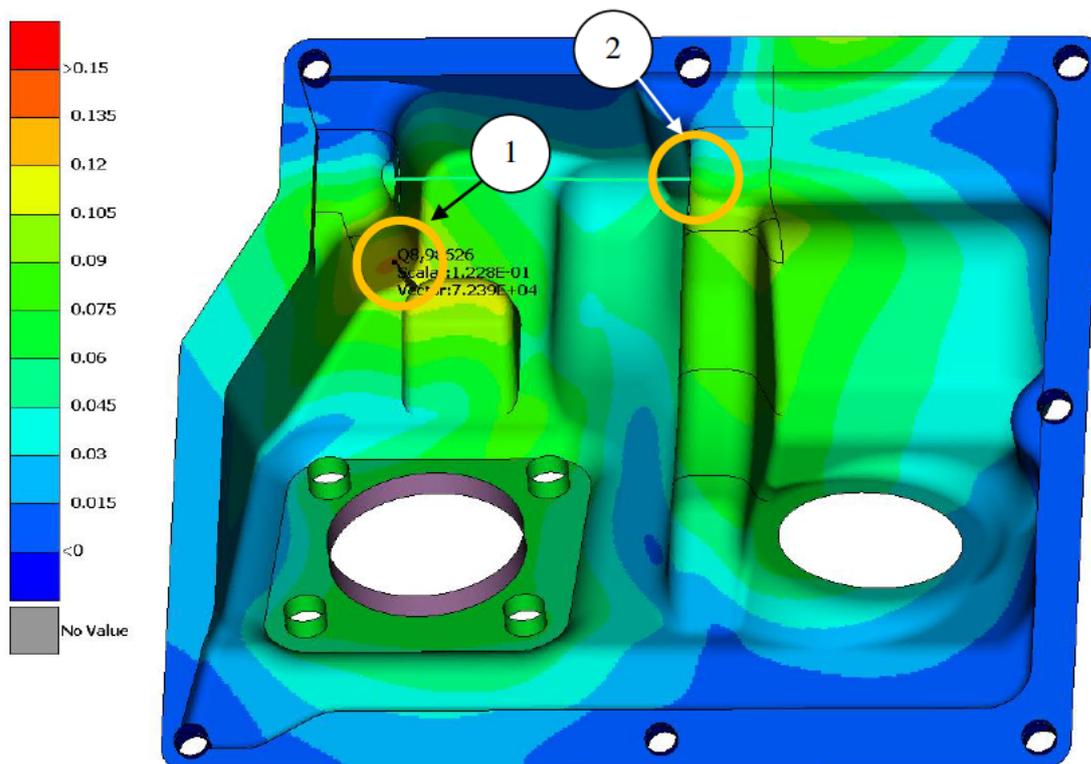


Abbildung 4.1: Verschiebungen im Aluminium-Modell

In Abbildung 4.21 ist zu erkennen, dass sich an der rechten Lagerstelle (Pos. 2) die Stelle mit den zweithöchsten Verschiebungen befindet. Da es der Punkt der Krafteinleitung im Bauteil ist, war dies zu erwarten.

Aus den Verschiebungen errechnet das FEM-Programm die Spannungen im Bauteil. Es wird die von Mises-Spannung, auch als Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) bekannt, angezeigt. Bei dieser handelt es sich um eine Vergleichsspannung, die einen mehrachsigen Spannungszustand in einen einachsigen Spannungszustand umrechnet. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die Festigkeit des Bauteils ziehen, indem die Zugfestigkeit mit der errechneten Spannung der GEH verglichen wird.

Da NX-Nastran die Ausgabe in den Einheiten Millinewton für Kraft, Millimeter für Länge und Sekunden für die Zeit tätigt, muss eine Division durch 1000 stattfinden um die für Festigkeits-Untersuchungen typische Einheit  $N/mm^2$  zu erhalten.

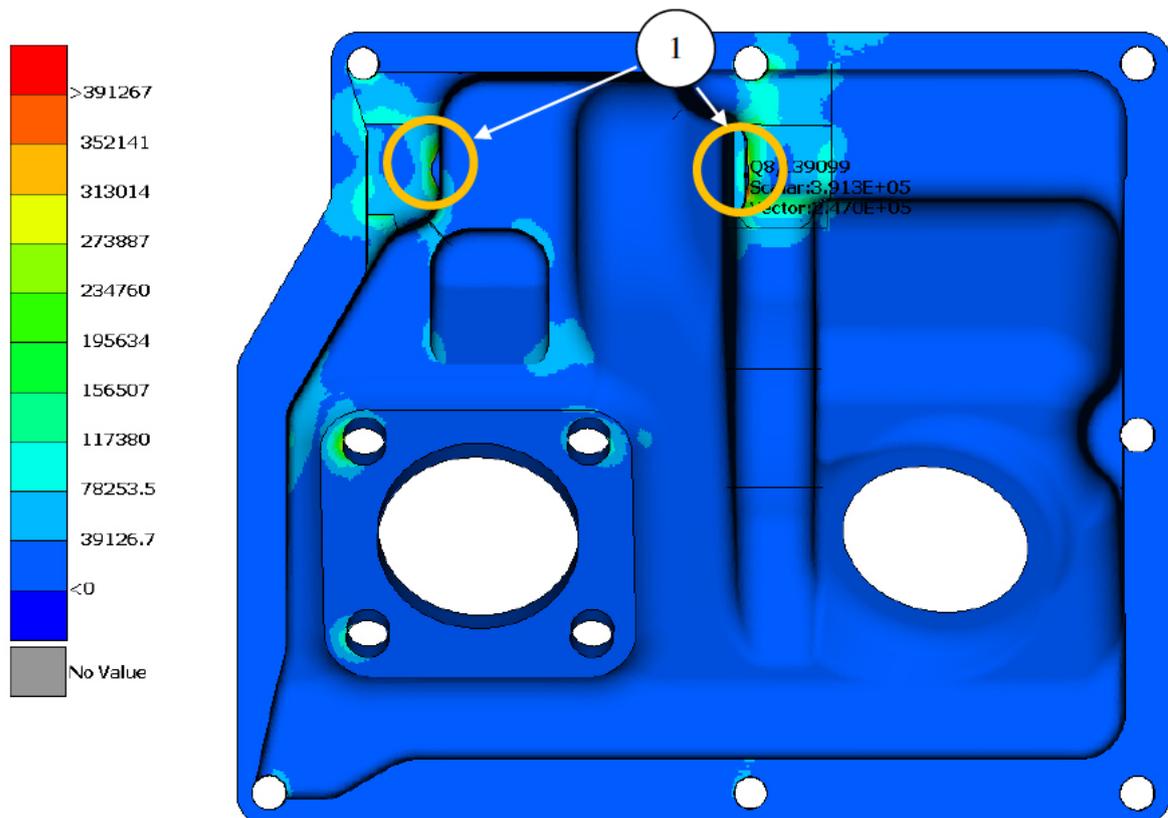


Abbildung 4.2: Spannungen im Aluminium-Modell

Die maximalen Spannungen befinden sich an den Lagerstellen des Pedals (Pos 1) mit  $391 \text{ N/mm}^2$  (s. Abbildung 4.2). Die meisten Bereiche des Bauteils weisen eine Spannung zwischen 0 und  $\sim 40 \text{ N/mm}^2$  auf. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist zu sehen, dass die hohen Spannungen direkt um das Lager auftreten, hier wird die Kraft durch das RBE2-Element in das Bauteil eingeleitet.

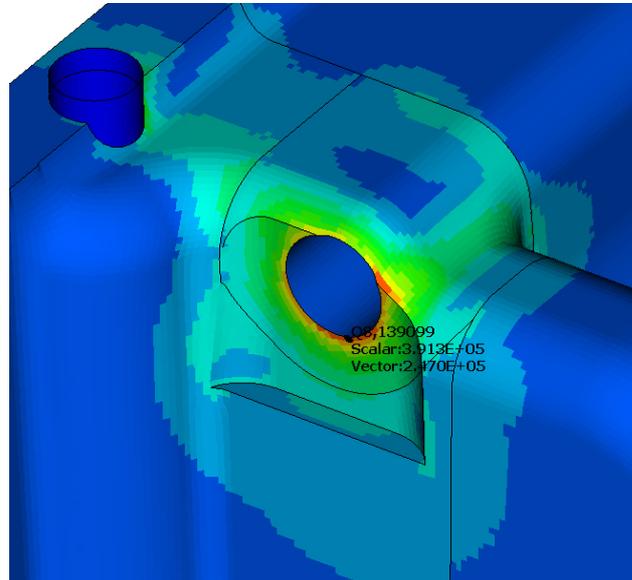


Abbildung 4.3: Spannungen um Lagerstelle

Der verwendete Werkstoff ist die Aluminium-Legierung EN AC-45500 (s. Datenblatt Anhang A) er weist eine Streckgrenze von 240 MPa und eine Einheitsbruchlast von 320 MPa auf. Um sicherzustellen, dass es zu keinem Bauteilversagen kommt, können verschiedene Schritte getätigt werden:

- Eine Neuberechnung der Lagerstelle mithilfe eines veränderten Modells
- Eine konstruktive Verstärkung der Lagerstelle mit anderen Werkstoffen, zum Beispiel eine eingesetzte Lagerhülse aus Stahl
- Ein Prototypentest unter realen Bedingungen

## 4.2 Auswertung der Stahl-Kunststoff-Hybride

Folgend werden die Ergebnisse der drei Stahl-Hybrid-Varianten mit den Dicken 3 mm, 2 mm und 1,5 mm betrachtet.

### 4.2.1 Stahlblech-Dicke 3 mm

Zunächst wird die 3 mm Variante betrachtet, wobei die Spannungen im Blech und in der Kunststoffgeometrie untersucht werden. Abbildung 4.4 zeigt die Spannungen im gesamten Hybrid-Modell.

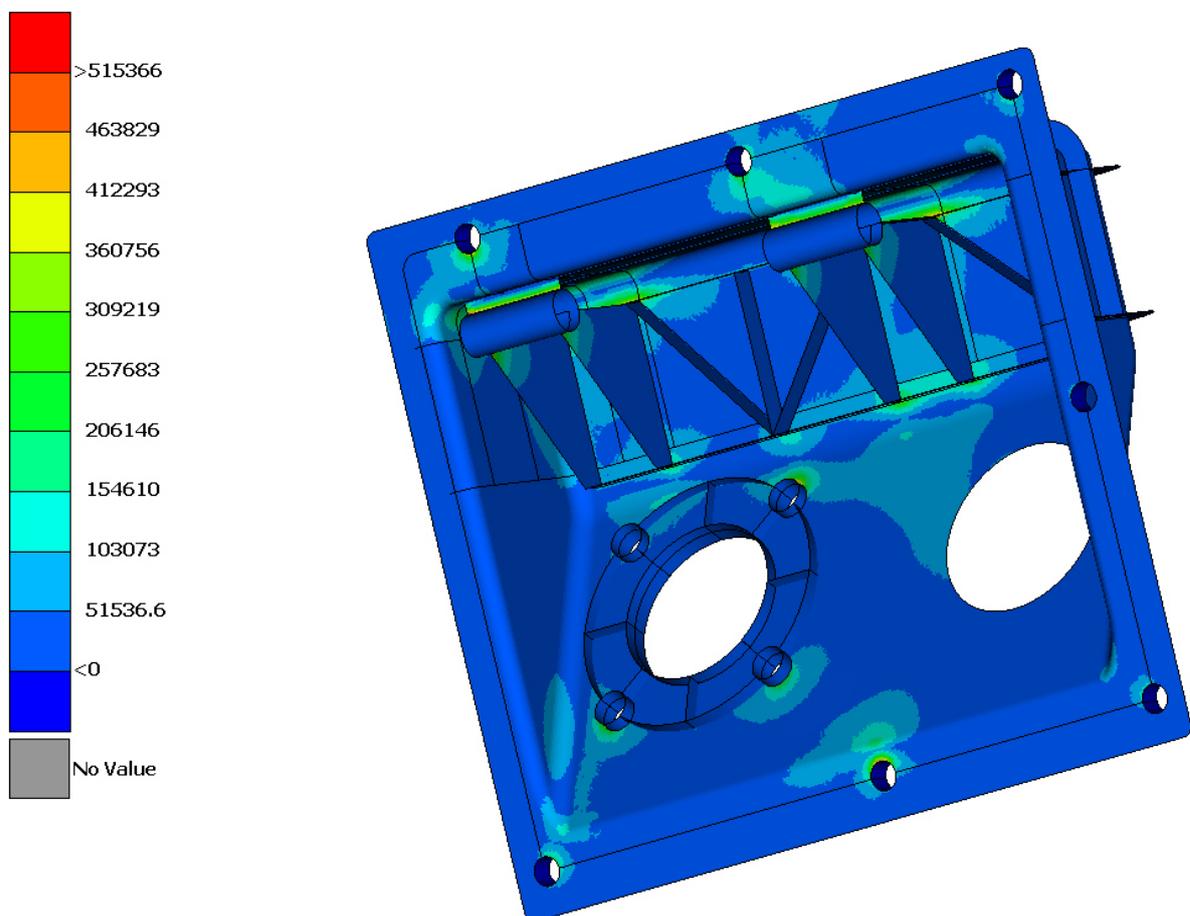


Abbildung 4.4: 3 mm Blech- und Kunststoff-Spannungswerte

Durch das Ausblenden des Kunststoffes ist zu erkennen, dass die höchsten Spannungen mit  $515 \text{ N/mm}^2$  im Blech und nicht in der Kunststoffgeometrie zu finden sind (s. Abbildung 4.5). Direkt unterhalb der Lagerstelle (1) befinden sich die Maximalwerte der Spannungen. Die zweit- und dritthöchsten Werte sind in dem mittleren unteren Strukturanschraubpunkt (2) und einem der BKV Anschraubpunkte (3) zu finden.

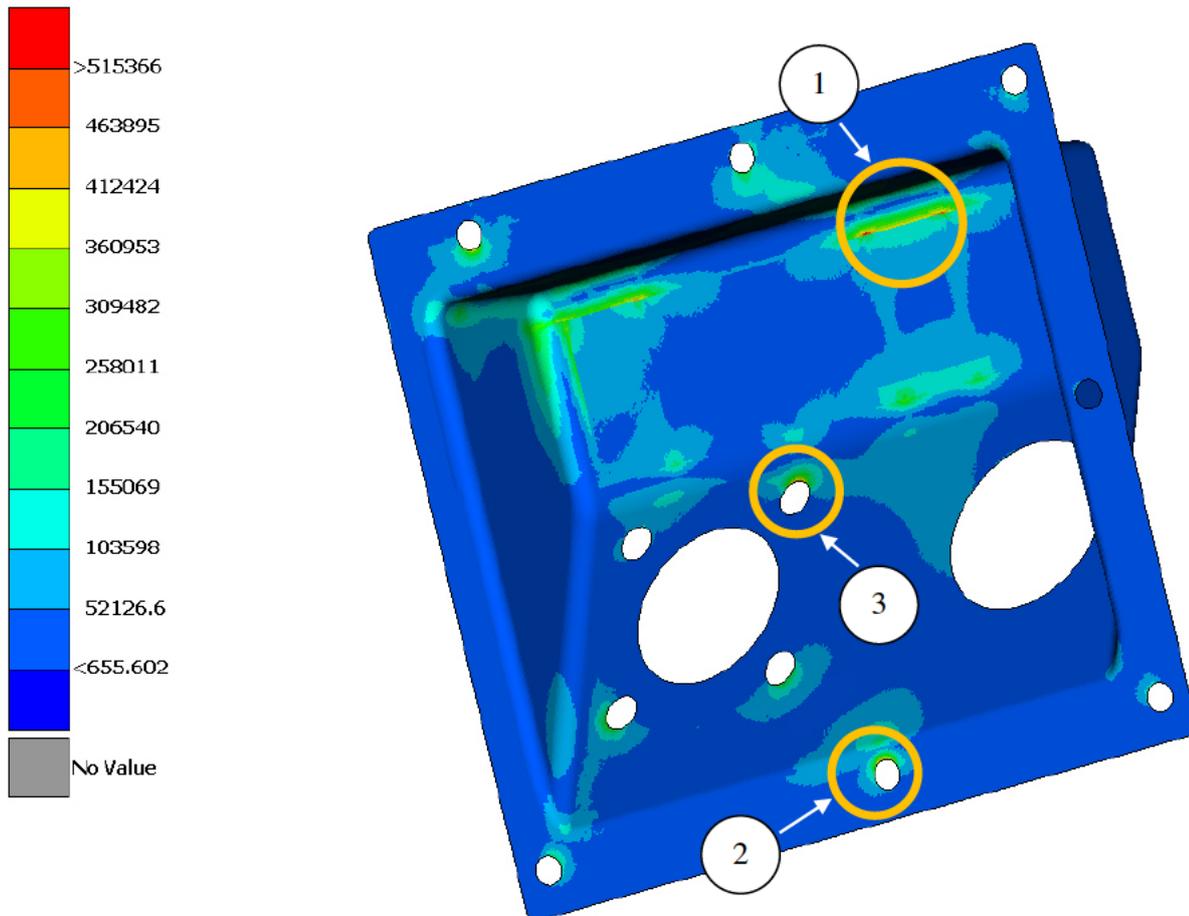


Abbildung 4.5: 3 mm Blech-Spannungswerte

Um die Spannungen am Kunststoff auszuwerten, wird nun das Blech ausgeblendet (s. Abbildung 4.6). Da der gewählte Kunststoff Spannungen bis  $280 \text{ N/mm}^2$  aushält, wurde die Skala auf  $280 \text{ N/mm}^2$  gestellt und alle Werte, die diesen überschreiten, werden rot angezeigt. Dadurch ist zu erkennen, dass die horizontale Rippe (1) am stärksten belastet ist. Es treten Maximalspannungen von  $466 \text{ N/mm}^2$  auf.

In Abbildung 4.7 sind die Lagerstellen ausgeblendet, hierdurch sind die lokalen Spannungsspitzen an den darunterliegenden Rippen zu erkennen.

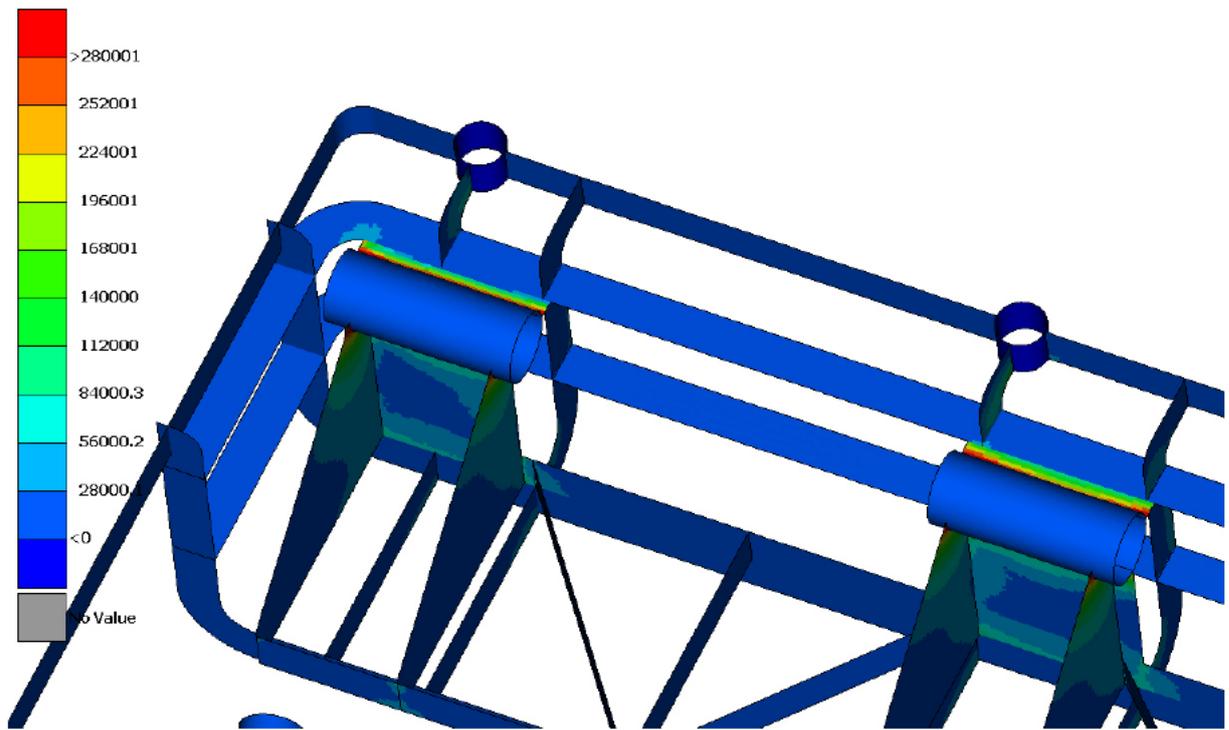


Abbildung 4.6: Spannungen im Kunststoff

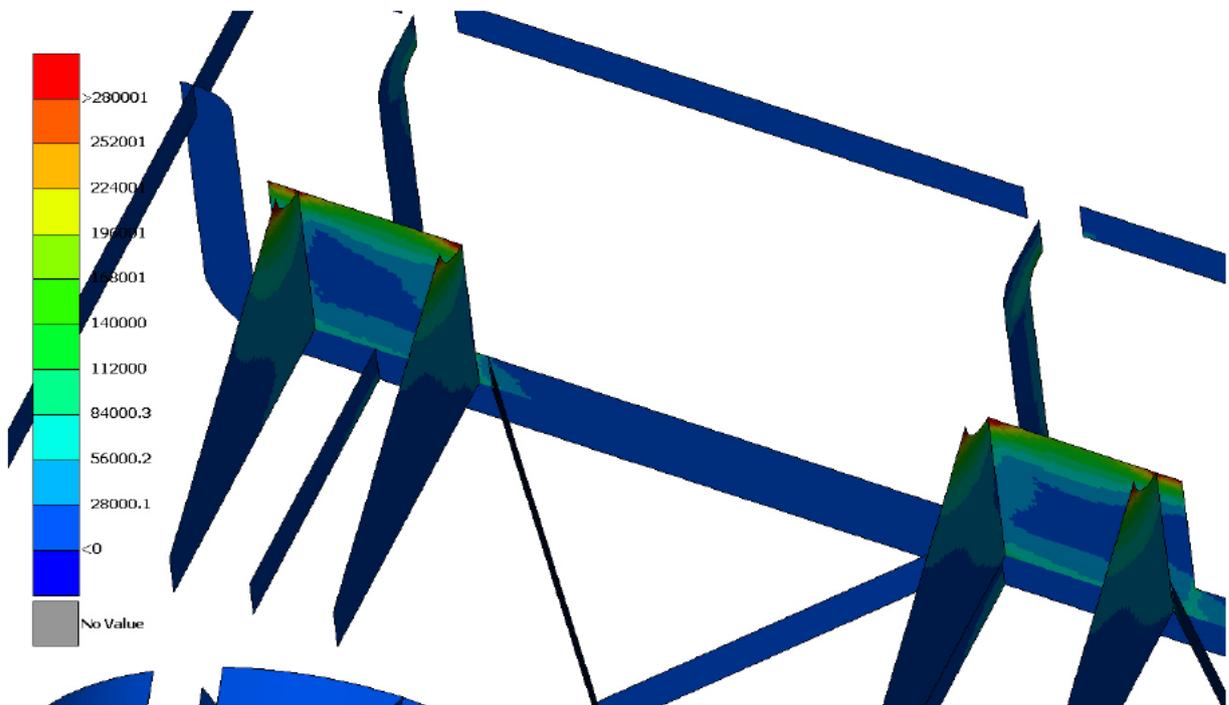


Abbildung 4.7: Spannungen an den Rippen

### 4.2.2 Stahlblech-Dicke 2 mm

Hier wird die 2 mm Variante (s. Abbildung 4.8) betrachtet. Da an der Kunststoffgeometrie bereits im ersten Modell zu hohe Spannungen festgestellt wurden, wird diese nicht erneut detailliert abgebildet.

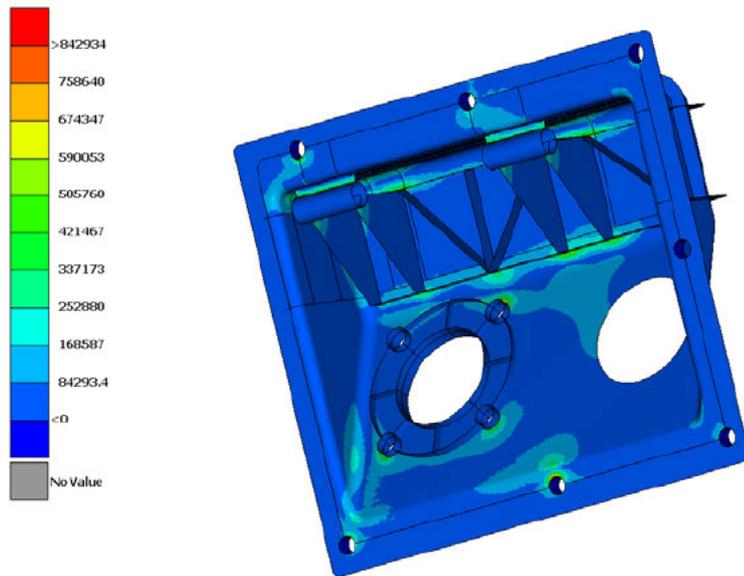


Abbildung 4.8: 2 mm Blech- und Kunststoff-Spannungswerte

Durch die verminderte Dicke des Blechs erhöhen sich die Spannungen im Bauteil. Es treten Maximalspannungen von  $843 \text{ N/mm}^2$  auf (s. Abbildung 4.9). Die höchsten Spannungen befinden sich in dieser Variante an dem Strukturanschraubpunkt (1).

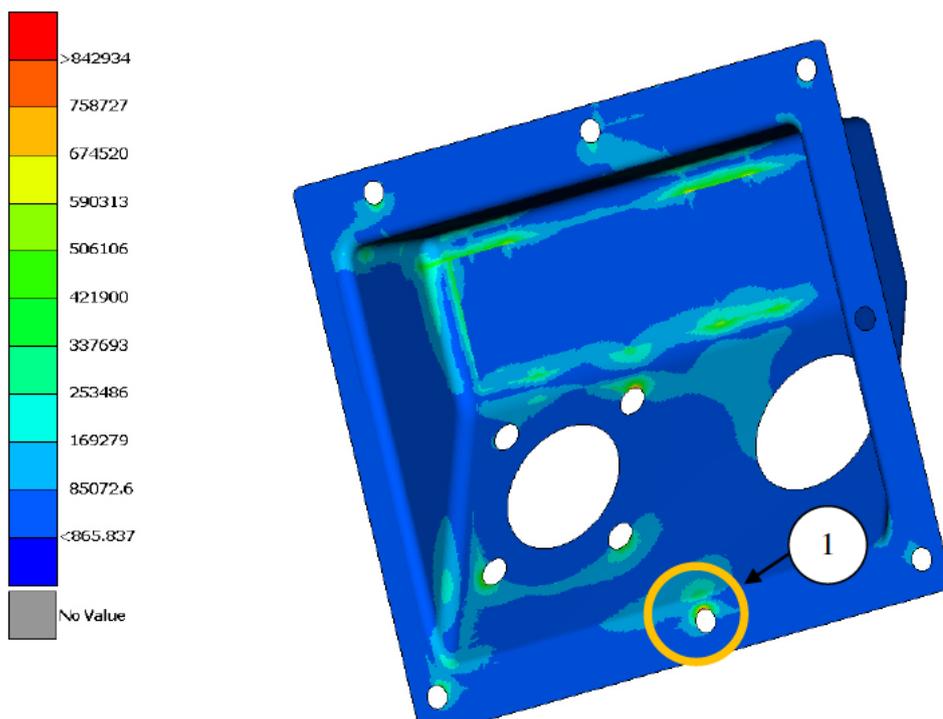


Abbildung 4.9: 2 mm Blech-Spannungswerte

### 4.2.3 Stahlblech-Dicke 1,5 mm

Als letzter der drei Stahlblech-Hybride wird die 1,5 mm Variante (s. Abbildung 4.10) ausgewertet.

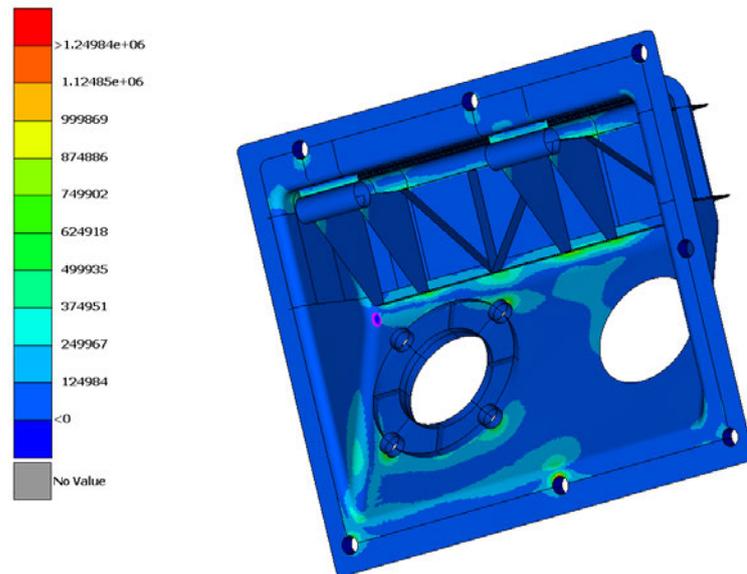


Abbildung 4.10: 1,5 mm Blech- und Kunststoff-Spannungswerte

Die Spannungen erhöhen sich durch die wiederholte Reduzierung der Blechdicke erneut. Es kommt zu Werten von  $1250 \text{ N/mm}^2$  (s. Abbildung 4.11), welche sich, wie bei den vorherigen Varianten, an dem Struktur- und BKV-Anschraubpunkt befinden.

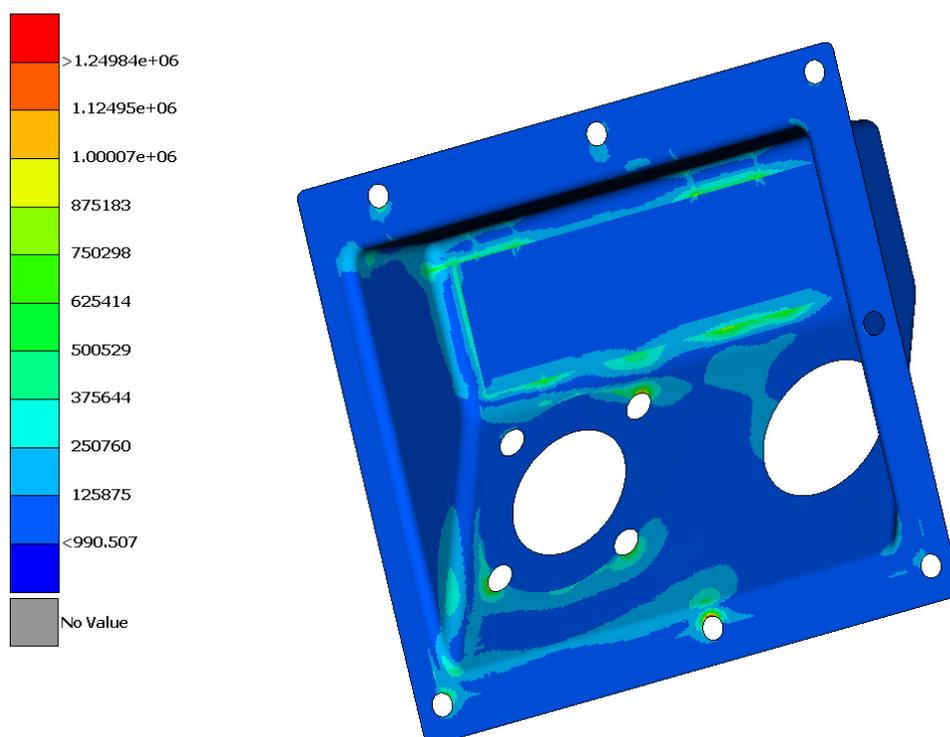


Abbildung 4.11: 1,5 mm Blech-Spannungswerte

### 4.3 Auswertung des Organoblech-Kunststoff-Hybrides

Abschließend wird die Organoblech-Variante (s. Abbildung 4.12) betrachtet.

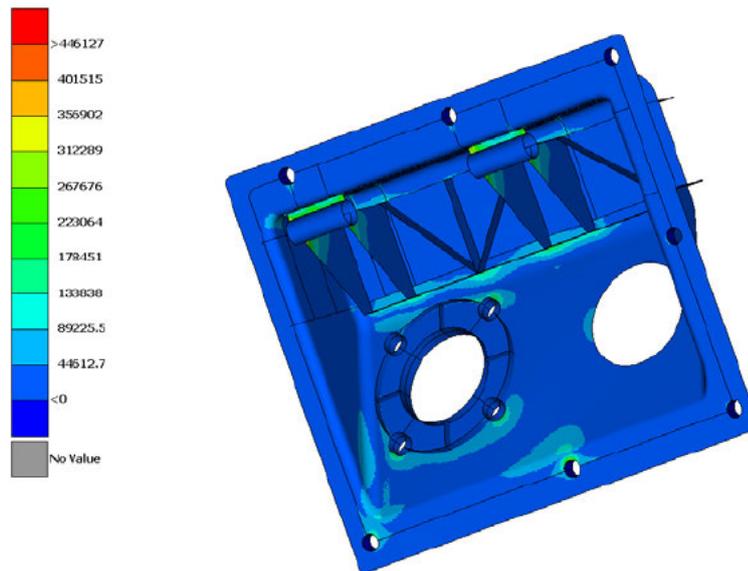


Abbildung 4.12: Organoblech- und Kunststoff-Spannungswerte

Im Blech belaufen sich die Maximalspannungen auf  $303 \text{ N/mm}^2$  (s. Abbildung 4.13). Auch hier befinden sie sich an dem Struktur- sowie BKV-Anschraubpunkt, (1) und (2).

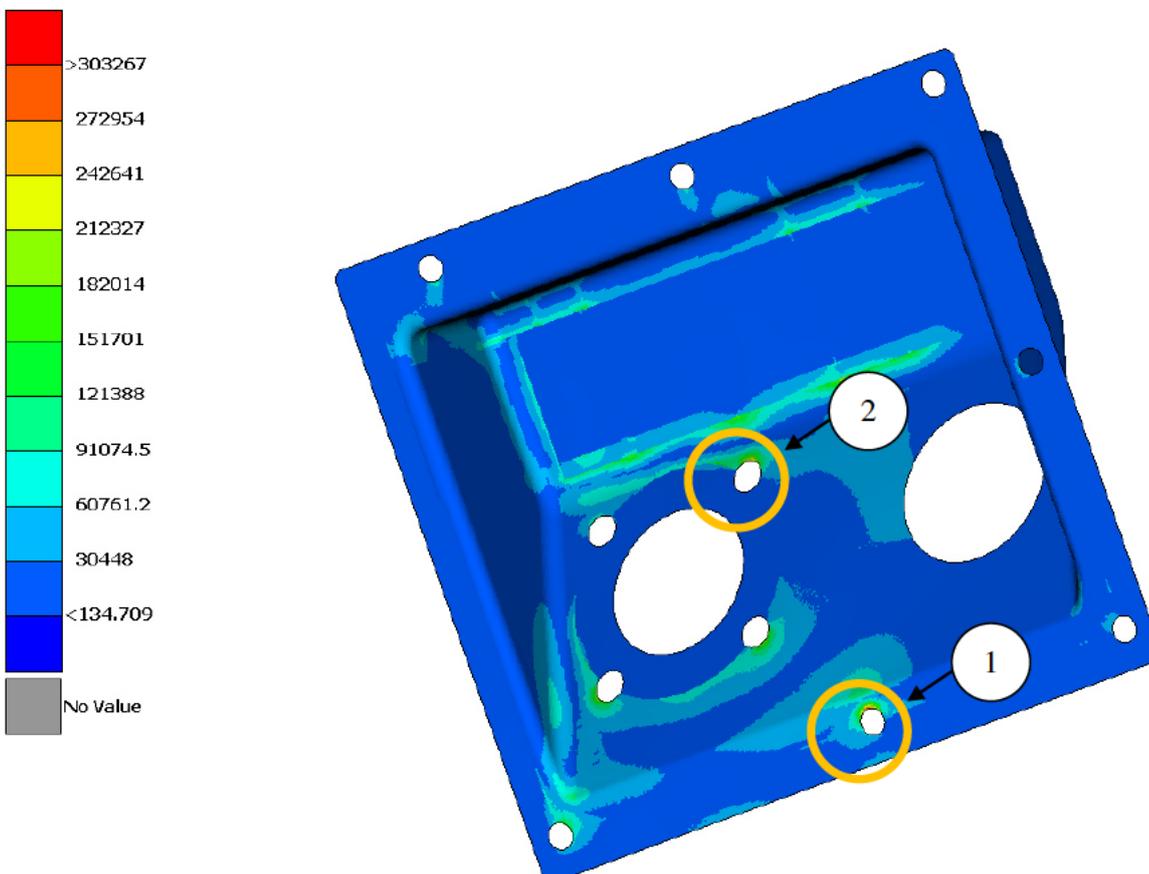


Abbildung 4.13: Organoblech-Spannungswerte

Im Kunststoffbereich (s. Abbildung 4.14) sind Maximalspannungen bis zu  $446 \text{ N/mm}^2$  zu sehen. Sie befinden sich an den Stützrippen der Lagerstellen.

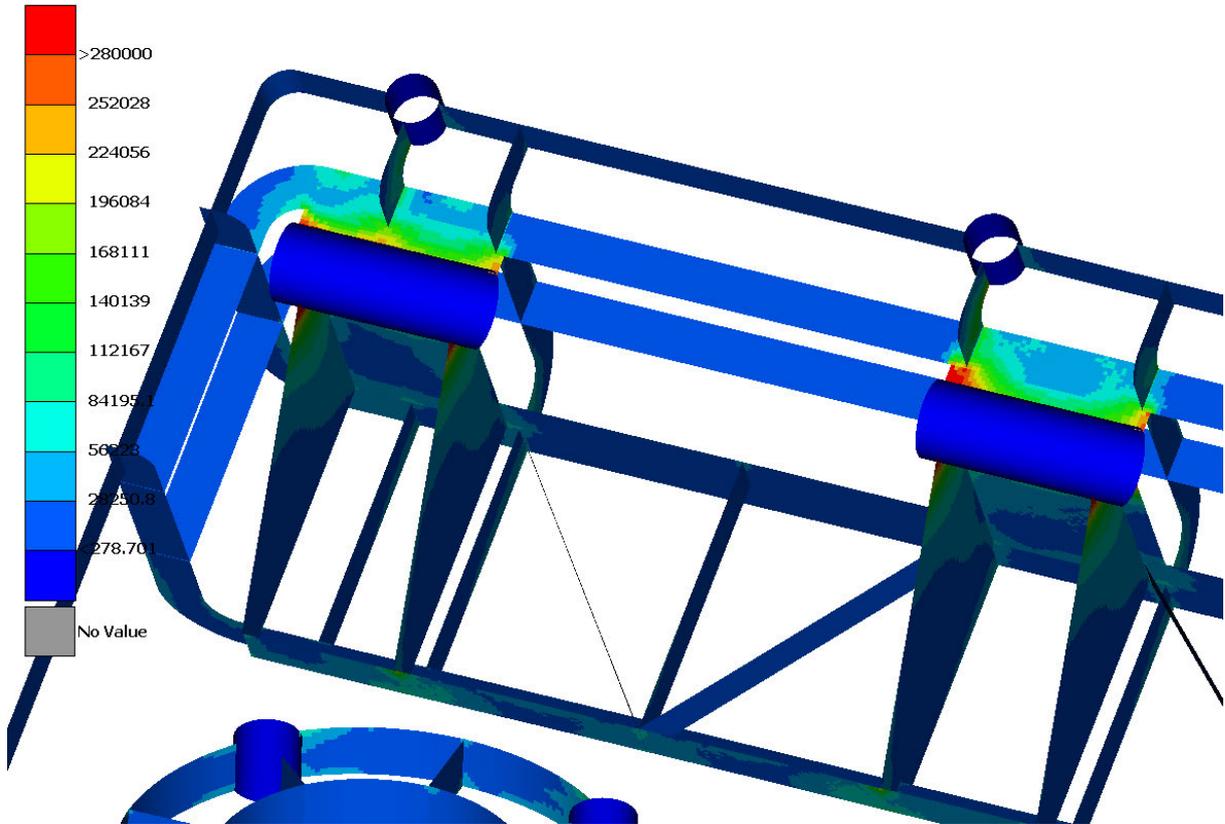


Abbildung 4.14: Spannungswerte an der Organo-Kunststoffgeometrie

#### 4.4 Vergleich der Varianten

Um einen besseren Überblick über die einzelnen Varianten zu bekommen, werden die Spannungswerte mit den zugehörigen Zugfestigkeiten verglichen (s. Tabelle 4.1).

Variante	Maximalspannungen[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Aluminium-Spritzguss</b>	391	250
<b>Stahlblech, 3 mm Hybrid</b>	515	-
<b>Stahlblech, 2 mm Hybrid</b>	843	-
<b>Stahlblech, 1,5 mm Hybrid</b>	1250	-
<b>Organoblech, 3 mm Hybrid</b>	303	380
<b>Kunststoff, Stahlhybrid</b>	466	275
<b>Kunststoff, Organoblechhybrid</b>	446	275

Tabelle 4.1: Spannungsvergleich

Für die Stahlbleche wurde kein bestimmter Werkstoff ausgewählt, in der Literatur lassen sich jedoch passende Stähle finden. Bei der 1,5 mm Variante ist man im Bereich der Einsatzstähle [8, Kap. 4.3]. Es ist zu erkennen, dass die Spannungen in vielen Bauteilen auf den ersten Blick zu hoch für ihre Materialien sind. Da diese Maximalspannungen aber nur lokal an den Krafteinleitungspunkten und Einspannungen auftreten, handelt es sich um Singularitäten (s. Kapitel 2.1). Dies ist sehr wahrscheinlich, um es jedoch genau sagen zu können, muss das Modell noch weiter untersucht werden. Mit Hilfe einer Netzverfeinerung kann zukünftig geklärt werden, ob die Spannungen gegen unendlich laufen oder zu einem Wert konvergieren. Nachdem die Singularitäten genauer betrachtet wurden, kann durch Veränderungen im Modell ein besseres Ergebnis erzielt werden. Möglichkeiten hierfür sind:

- Lokale Abbildung durch Volumenelemente
- RBE3 anstatt RBE2 für die Krafteinleitung nutzen
- Durchschnittliche Spannungen am Bereich der Singularitäten errechnen

RBE3 Elemente verhalten sich etwas anders als RBE2 Elemente, da sie keine starre Verbindung zwischen den Knoten erstellen. Hierdurch bringen sie keine höhere Steifigkeit in das Modell.

Sollten die Spannungen trotz der Veränderungen zu hoch sein, muss an diesen Stellen eine Verstärkung des Bauteils eingeplant werden. Dies könnten beispielsweise stärkere Rippen an der Kunststoff-Geometrie, eine Lagerhülse aus einem Werkstoff mit höherer Zugfestigkeit als Aluminium für die Lagerstelle der Spritzguss-Variante oder eine lokale Verstärkung der Blechgeometrien sein.

Variante	Gewicht [kg]	Gewichts- reduzierung [kg]	Prozentuale Gewichtsreduzierung
<b>Aluminium-Spritzguss</b>	2,761	-	-
<b>Stahlblech 3 mm Hybrid</b>	4,381	-	-
<b>Stahlblech 2 mm Hybrid</b>	3,205	-	-
<b>Stahlblech 1,5 mm Hybrid</b>	2,616	0,145	5,25
<b>Organoblech 3 mm Hybrid</b>	1,660	1,101	39,88

Tabelle 4.2: Gewichtsvergleich der Varianten

In Tabelle 4.2 sieht man den direkten Gewichtsvergleich der Varianten. 0,85 kg der Hybrid-Varianten sind dem Kunststoff zuzuordnen. Es ist zu erkennen, dass die Organoblech-Variante eine erhebliche Gewichtsreduzierung von ~40% mit sich bringt. Durch die deutlich höhere Dichte von Stahl führen die Stahlblech-Varianten nur in der 1,5 mm Variante zu einer Gewichtsreduzierung, jedoch sind hier die Spannungen im Bauteil sehr hoch. Eine Überarbeitung des Modells, welches nur lokale Stahlblecheinleger und einen höheren Kunststoffanteil aufweist, könnte zu der gewünschten Gewichtsreduzierung führen. So könnten bei einer Reduzierung von 50% des Stahls, bei der 2 mm Variante, ein Gewicht von 2,2 kg ermöglicht werden. Um genaue Aussagen darüber treffen zu können, müsste dies jedoch in einer separaten Arbeit untersucht werden.

Mit den in Kapitel 2.2 erwähnten Einsparungen in Kraftstoff und CO<sub>2</sub> kann überschlägig berechnet werden, zu wieviel Einsparungen die Gewichtsreduzierung des Organobleches führt.

Mit:

$$100kg = \frac{0,5 l}{100km} \quad (4.1)$$

Ergibt sich eine Einsparung von 0,005505 l/100 km, bei einer durchschnittlichen Laufzeit von 200000 km können so 1101 l Kraftstoff eingespart werden.

Für die CO<sub>2</sub> Emissionen gelten:

$$100kg = \frac{12g}{100km} \quad (4.2)$$

Hier können, durch den Einbau der Organoblech-Variante, die Emissionen um 26424g CO<sub>2</sub> auf 200000 km verringert werden.

Aufgrund der in Kapitel 2.2 beschriebenen Kombination von Tiefziehen und Spritzgießen in einem Fertigungsschritt ist eine Reduzierung der Produktionskosten ebenfalls möglich. Da es hier aber je nach Produktionsart viele Variablen gibt, kann keine genaue Aussage getroffen werden. Dies müsste ebenfalls in einer weiterführenden Arbeit untersucht werden.

## 5 Fazit

Um diese Arbeit abzuschließen, soll in diesem Kapitel zusammengefasst werden, was in den einzelnen Kapiteln bearbeitet und welche Ergebnisse erzielt wurden. Zudem werden mögliche Verbesserungen der Modelle für nachfolgende Arbeiten im Ausblick erörtert.

Nach der Einleitung und einer Aufarbeitung der Grundlagen wurden die CAD-Modelle der Bauteile erstellt. Das Spritzguss-Modell ist einer bestehenden Konstruktion nachempfunden und die Hybrid-Version wurde innerhalb desselben Bauraumes möglichst materialsparend konstruiert.

Die anschließende FE-Modellierung wurde durch das Casting-Tool der Software ANSA deutlich vereinfacht, da die Mittelflächen der Modelle relativ genau erkannt werden. Aufgrund der Wahl von Schalenelementen konnten die verschiedenen Materialstärken der Varianten schnell ausgetauscht werden, so dass kein komplett neues FE-Modell erstellt werden musste.

Die Auswertung zeigt, dass die Modelle noch weiter verbessert werden müssen, um genauere Aussagen bezüglich ihrer Tragfähigkeit machen zu können, jedoch zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere das Organoblech ein sehr hohes Leichtbaupotential durch die geringe Dichte bei sehr hohen Steifigkeiten besitzt. In dem berechneten Modell belaufen sich diese Gewichteinsparungen auf ~40% im Vergleich zu der Aluminium-Spritzguss-Variante.

In zukünftigen Arbeiten könnten die Modelle an ihren Punkten der maximalen Spannungen verstärkt und die FE-Modellierung könnte verändert werden. Hier wären eine Krafteinleitung mithilfe von RBE3-Elementen und eine lokale Nutzung von Volumenelementen denkbar. Eine Überarbeitung der Geometrie und eine Reduzierung der Blechelemente könnte bei den Stahl-Hybriden zu einer Erhöhung des Leichtbaupotentials führen. Diese neu erstellten Modelle müssten daraufhin erneut auf ihre Festigkeit untersucht werden, um genaue Aussagen tätigen zu können.

## Literaturverzeichnis

- [1] Steinke, P.: Finite-Elemente-Methode. Rechnergestützte Einführung, 5. Auflage, Springer, 2015
- [2] Klein, B.: FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 10. Auflage, Springer, 2015
- [3] Riek, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: Finite Elemente Analyse für Ingenieure. Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora, 6., vollständig überarbeitete Auflage, Hanser, 2019
- [4] Klein, B.; Gänsicke, T.: Leichtbau-Konstruktion. Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung, 11. Auflage, Springer, 2019
- [5] Zepf, H.-P.: Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung, Expert-Verlag, 1997
- [6] Lanxess: Organoblech – die Innovation in der Hybridtechnik, [https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/docguard/TI\\_2009-003\\_DE\\_thermoplastische\\_Faserverbundwerkstoffe.pdf?docId=12427922](https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/docguard/TI_2009-003_DE_thermoplastische_Faserverbundwerkstoffe.pdf?docId=12427922), Letzter Besuch: 09.07.2021
- [7] Munalli, D.: 2/2 twill woven fabric made of TR30S 3k, <https://www.researchgate.net/profile/Daniela-Munalli/publication/337389257/figure/fig1/AS:827262232457216@1574246094207/2-2-twill-woven-fabric-made-of-TR30S-3k.jpg>, Letzter Besuch: 09.07.21
- [8] Fischer, U.; Gomeringer, R.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Näher, F.; Oesterle, S.; Paetzold, H.; Stephan, A.: Tabellenbuch Metall, 44., neu bearbeitete Auflage, Europa Lehrmittel, 2008

## Anhang

## Anhang A Datenblätter

**Tepex®**  
**MATERIAL DATA SHEET**



**LANXESS**  
Energizing Chemistry

**Tepex® dynalite 102-RG600(x)/47%**  
**Roving Glass - PA6 Consolidated Composite Laminate**

Layup	Test Condition	According to Standard	Unit	Value	
				Longitudinal	Transversal
Fiber	-	-	-	E-Glass	
Weaving style	-	DIN ISO 9354	-	Twill 2/2	
Area weight (dry fabric)	-	DIN EN 12127	g/m <sup>2</sup>	600	
Yarn/Yarn count	-	DIN EN 12654-2/3	tex	1200	
Yarn density	-	DIN EN 1049-2	1/cm	2.5	2.5
Weight rate	-	-	%	50	50
Polymer	-	-	-	Polyamide 6 (PA6)	
Fiber content (nominal)	-	-	vol.-%	47	
Thickness per layer (nominal)	-	-	mm	0.5	
Laminate density	-	ISO 1183-1	g/cm <sup>3</sup>	1.80	

Mechanical properties	Test Condition	According to Standard	Unit	Value	
				Longitudinal	Transversal
Tensile modulus	23 °C, ISO 1110	ISO 527-4/5 <sup>1)</sup>	GPa	18	
Tensile strength	23 °C, ISO 1110	ISO 527-4/5 <sup>1)</sup>	MPa	380	
Tensile elongation at break	23 °C, ISO 1110	ISO 527-4/5 <sup>1)</sup>	%	2.3	
Tensile modulus	23 °C, dry	ISO 527-4/5 <sup>1)</sup>	GPa	23	
Tensile strength	23 °C, dry	ISO 527-4/5 <sup>1)</sup>	MPa	390	
Tensile elongation at break	23 °C, dry	ISO 527-4/5 <sup>1)</sup>	%	2.2	
Flexural modulus	23 °C, ISO 1110	ISO 14125 <sup>2)</sup>	GPa	16	
Flexural strength	23 °C, ISO 1110	ISO 14125 <sup>2)</sup>	MPa	300	
Flexural modulus	23 °C, dry	ISO 14125 <sup>2)</sup>	GPa	20	
Flexural strength	23 °C, dry	ISO 14125 <sup>2)</sup>	MPa	580	

## CAMPUS® Datasheet

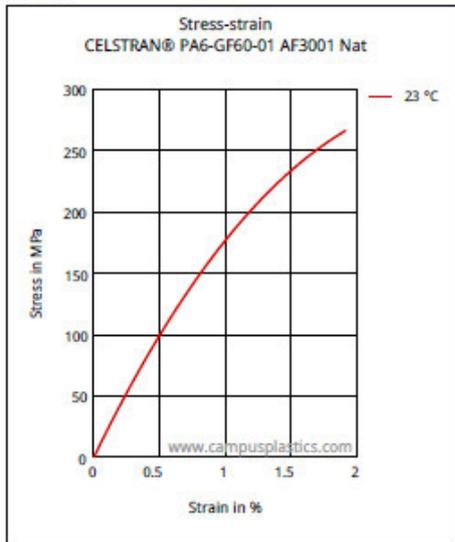
CELSTRAN® PA6-GF60-01 AF3001 Nat - PA6  
Celanese



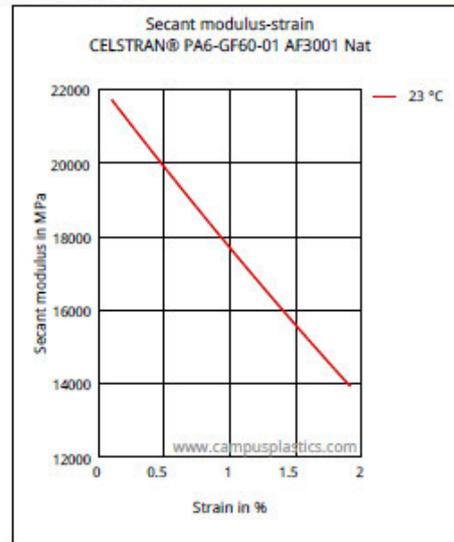
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus	20400	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	275	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	1.9	%	ISO 527-1/-2
Charpy notched impact strength, +23°C	54	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Temp. of deflection under load, 1.80 MPa	215	°C	ISO 75-1/-2
Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1690	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183

### Diagrams

#### Stress-strain



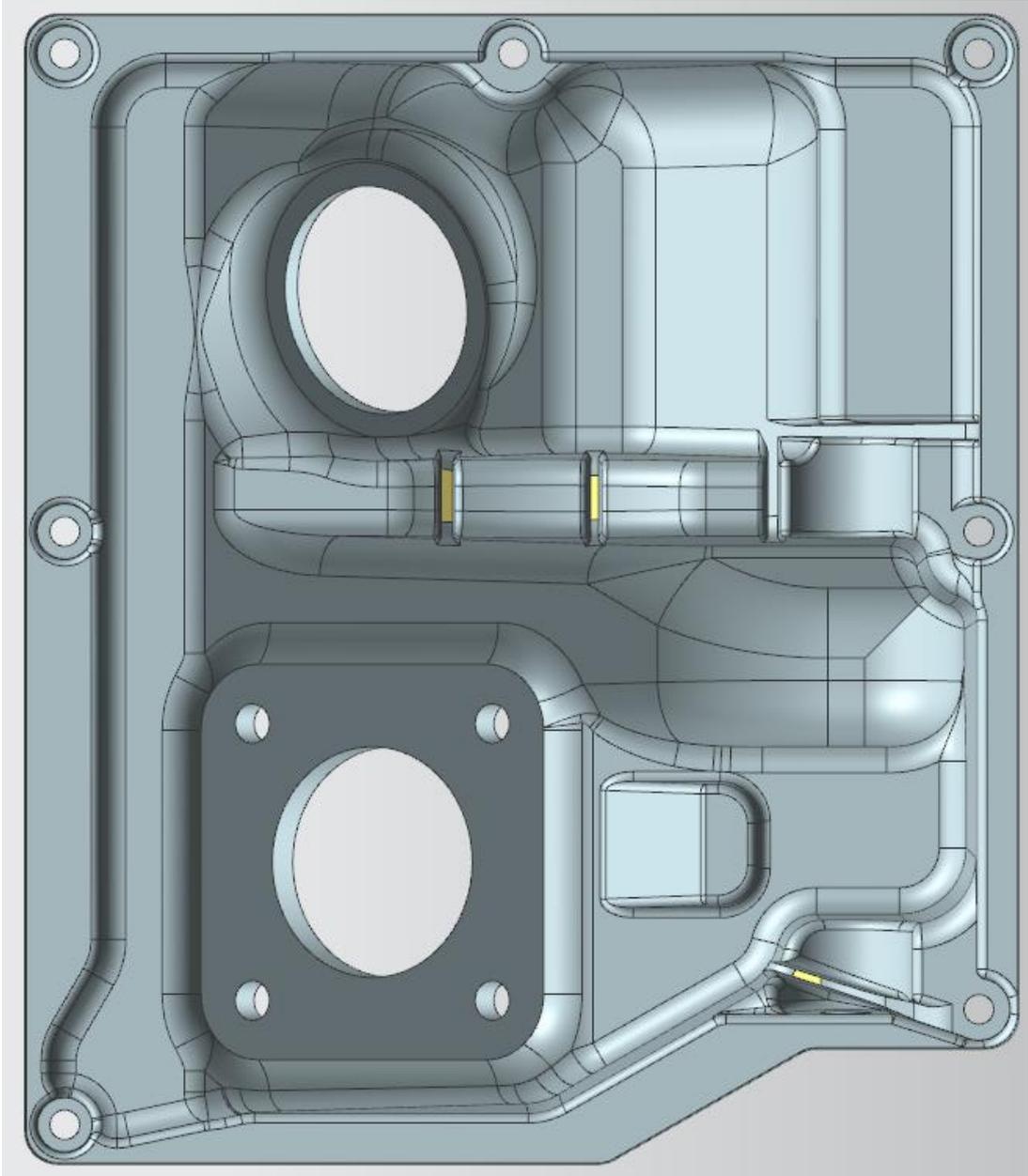
#### Secant modulus-strain



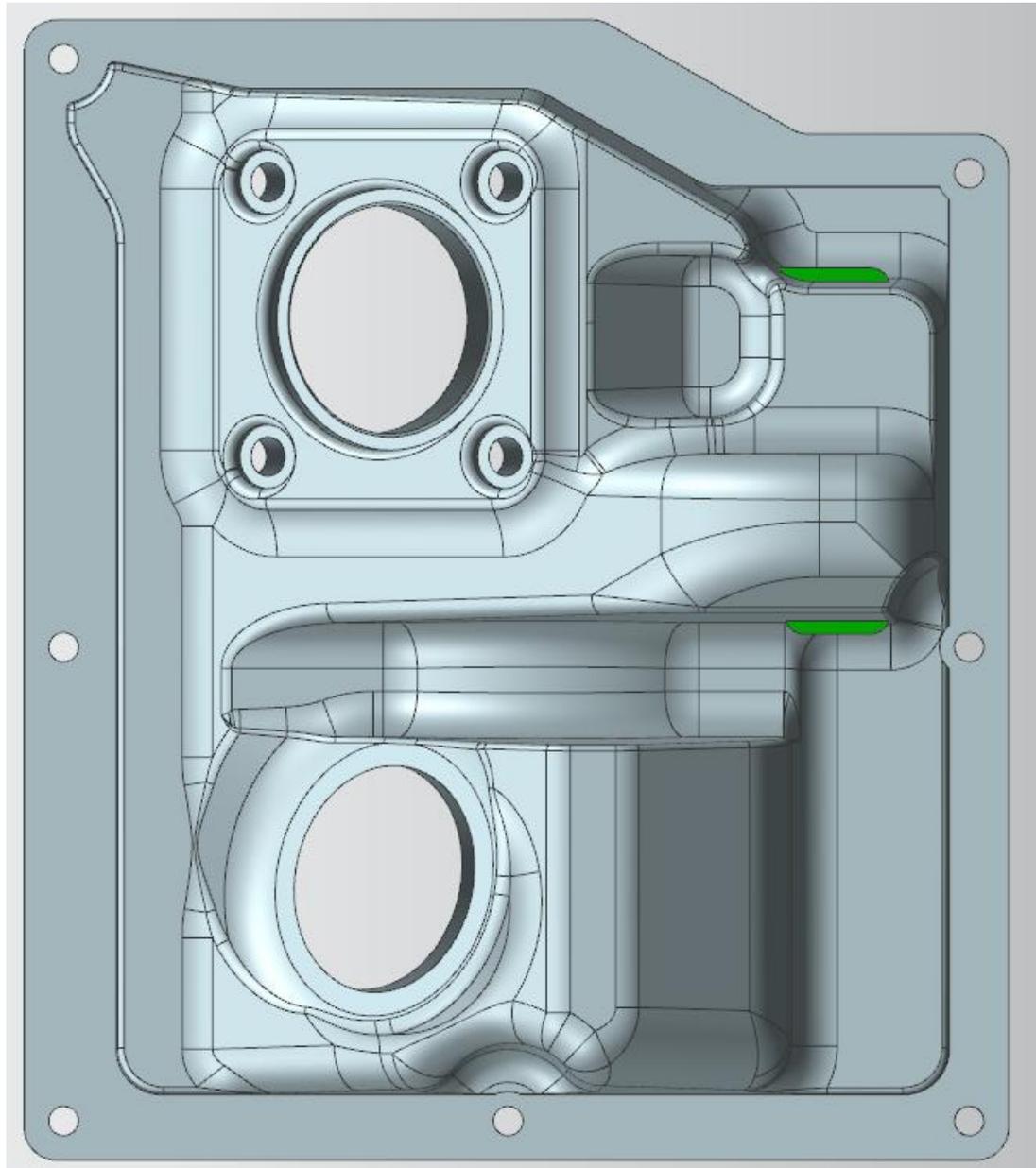
		<h1>RAFFMETAL</h1> <p>THE ALUMINIUM EVOLUTION</p>															
<b>Aluminiumlegierungen in Stranggussmasseln. Continuous casting aluminium alloys</b>																	
<b>Norm: UNI EN 1676 und 1706</b>																	
<b>Gruppe: Al Si 5 Cu</b>																	
<b>Bezeichnung: EN AB und AC 45500 - Al Si 7 Cu 0,5 Mg</b>																	
<b>Ersatz für:</b>																	
<b>CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG IN %</b>																	
LEGIERUNG		ELEMENTE											Einzelnereinreingungen	Globale Verunreinigungen			
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti					
EN AB 45500	min	6,5		0,2		0,25											
	max	7,5	0,25	0,7	0,15	0,45	-	-	0,07	-	-	0,20	0,03	0,10			
UNI-Bezeichnung fehlt	min																
	max																
<b>AN SEPARAT GEGOSSENEN PROBESTÜCKEN ERMITTELTE MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN</b>																	
Physikalischer Gießzustand	Symbol	R		S		A		HB									
		Einheitsbruchlast		Last an der Streckgrenze		Dehnung		Brinell-Härte									
		EN 1706	N/mm <sup>2</sup>	EN 1706	N/mm <sup>2</sup>	EN 1706	%	EN 1706	HBW								
IN SAND (roh)	T6	250		190		1		85									
IN KOKILLE (roh)	T6	320		240		4		100									
DRUCKGUSS (roh)																	
<b>PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN (Richtwerte aus der UNI EN Norm)</b>																	
SPEZIFISCHES GEWICHT	2,66 kg/dm <sup>3</sup>		WÄRMELEITFÄHIGKEIT bei 20°C		150 - 165 W/(m K)												
ERSTARRUNGS- UND SCHMELZBEREICH	550 °C		WÄRMEAUSSDEHNUNG von 20 bis 100°C		-												
	625 °C		WÄRMEAUSSDEHNUNG von 20 bis 200°C		22,0-10-6/°C												
SPEZ. WÄRMEKAPAZITÄT (bei 100°C)	0,92 J/gK		WÄRMEAUSSDEHNUNG von 20 bis 300°C		-												
LINEARES SCHWINDMASS IN SAND	1,1 - 1,2 %		MAXIMALE SCHMELZTEMPERATUR		780°C												
LINEARES SCHWINDM. IN KOKILLE	0,8 - 1,1 %		OPTIMALER GIESSBEREICH														
LINEARES SCHWINDM. IN DRUCKG.			* in Sand		680 - 750 °C												
ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT	16 - 22 MS/m		* in Kokille		681 - 750 °C												
ELASTIZITÄTSMODUL	7400 m/mm <sup>2</sup>		* Druckguss		-												
<b>TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN, QUALITATIVE ANGABEN</b>																	
WARMFESTIGKEIT	GUT		SCHWINDRISSBESTÄNDIGKEIT		GUT												
KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT ALLGEMEIN	GUT		DRUCKDICHTIGKEIT		GUT												
BEARBEITBARKEIT	GUT		SCHWEISSBARKEIT		GUT												
GIESSBARKEIT	GUT		MÖGLICHKEIT ZUM DEKORATIVEN ELOXIEREN		NICHT EMPF.												
POLIERBARKEIT	MITTEL		MÖGLICHKEIT ZUM PROTEKTIVEN ELOXIEREN		NICHT EMPF.												
<b>AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE PER LA QUALITÀ CERTIFICATO DA DNV</b> <b>= UNI EN ISO 9001:2008 =</b>		Raffmetal S.p.a. via malpaga, 82 25070 Casto (BS) Tel. 0365.890.100 Fax 0365.899.327 qualita@raffmetal.it vendite@raffmetal.it		<b>AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE AMBIENTALE CERTIFICATO DA DNV</b> <b>= UNI EN ISO 14001:2004 =</b>													

**Anhang B CAD-Ansichten****Anhang B1 Aluminium-Variante**

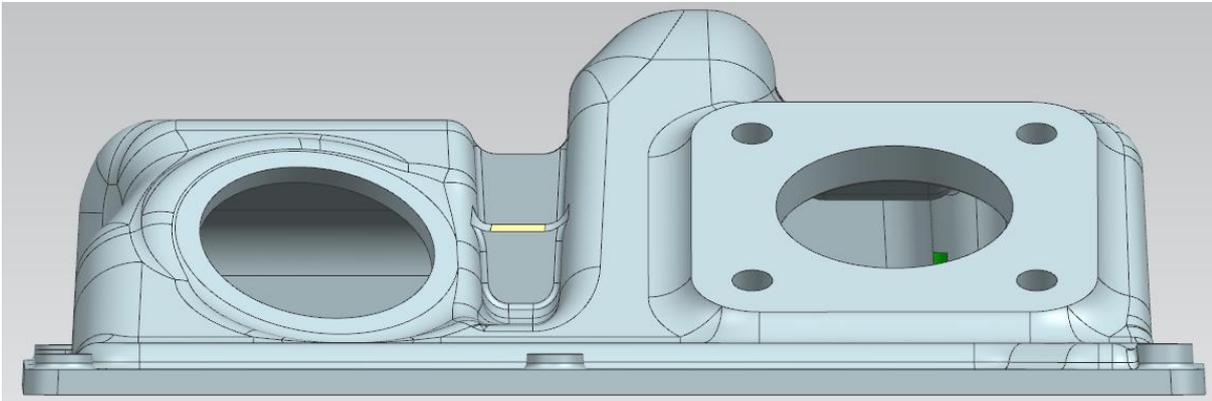
Drauf-Ansicht



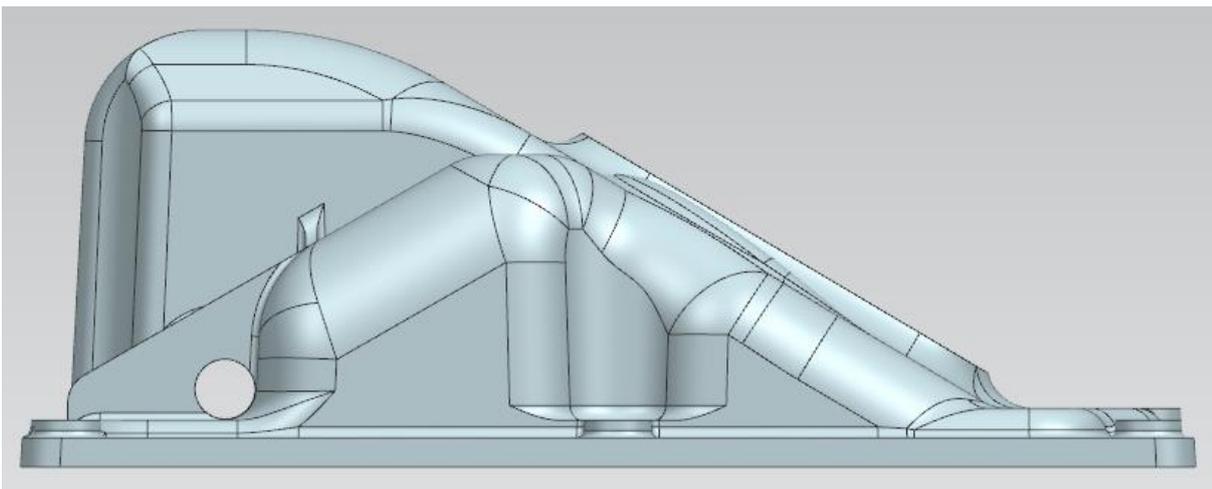
Unter-Ansicht



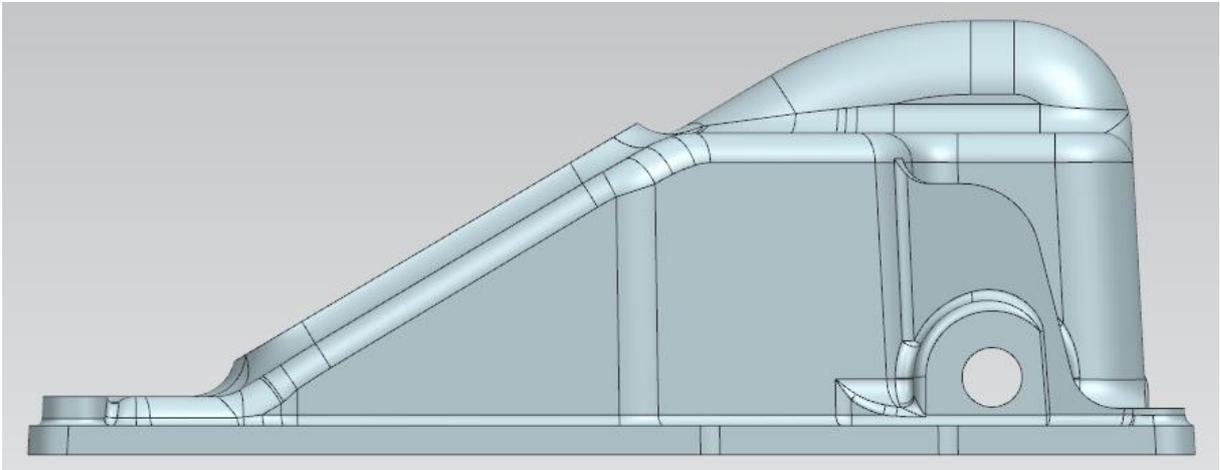
Vorder-Ansicht



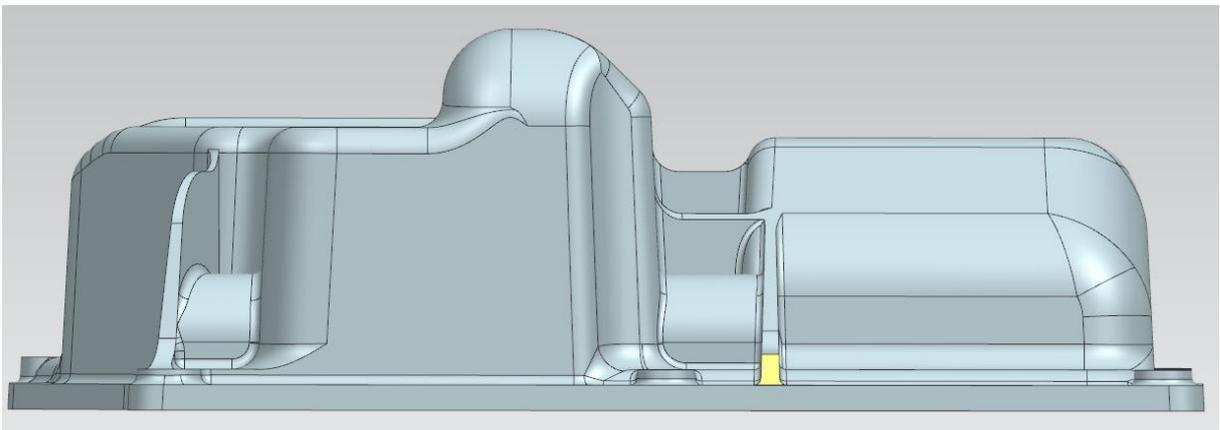
Seiten-Ansicht links



Seiten-Ansicht rechts

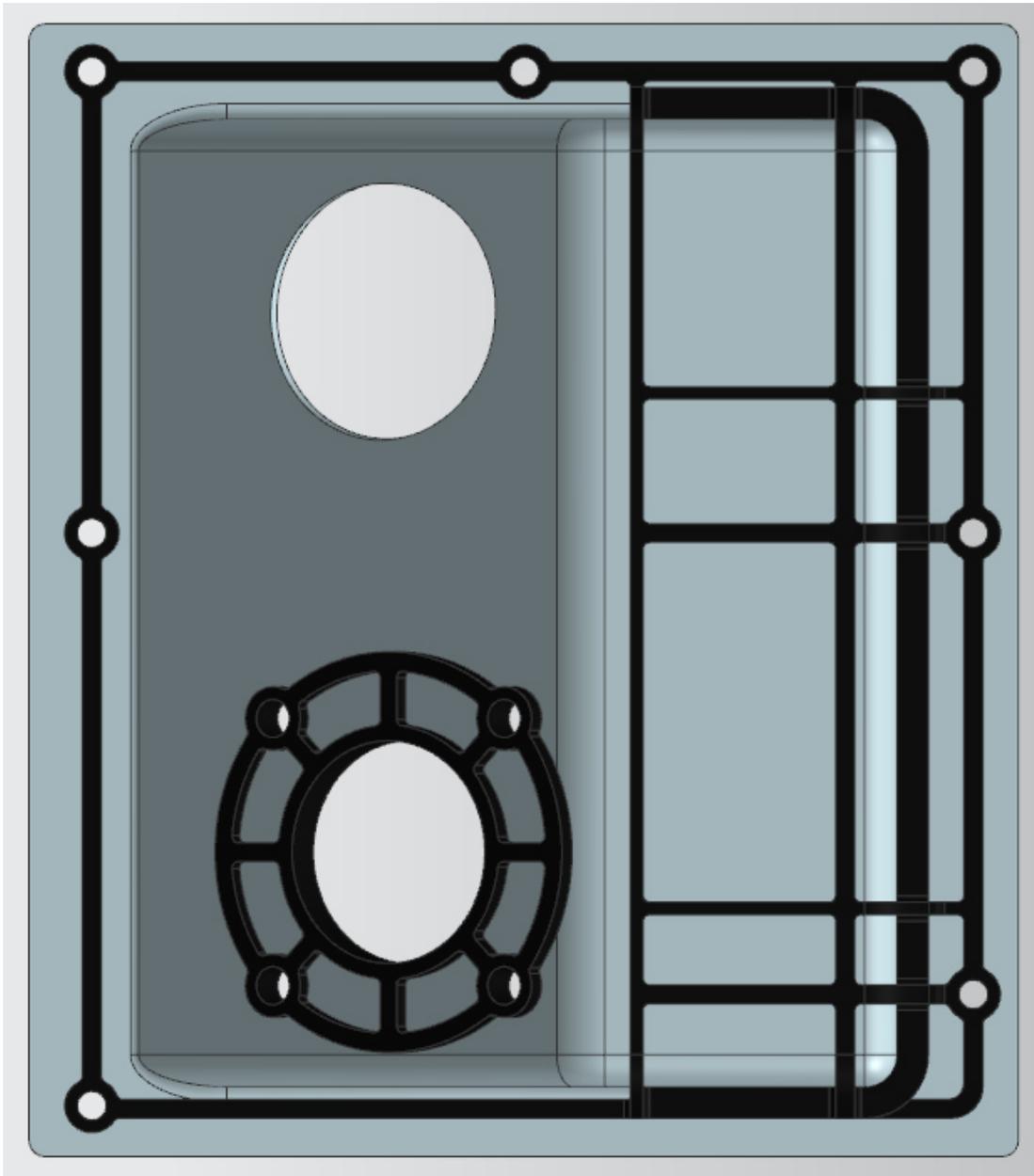


Rück-Ansicht

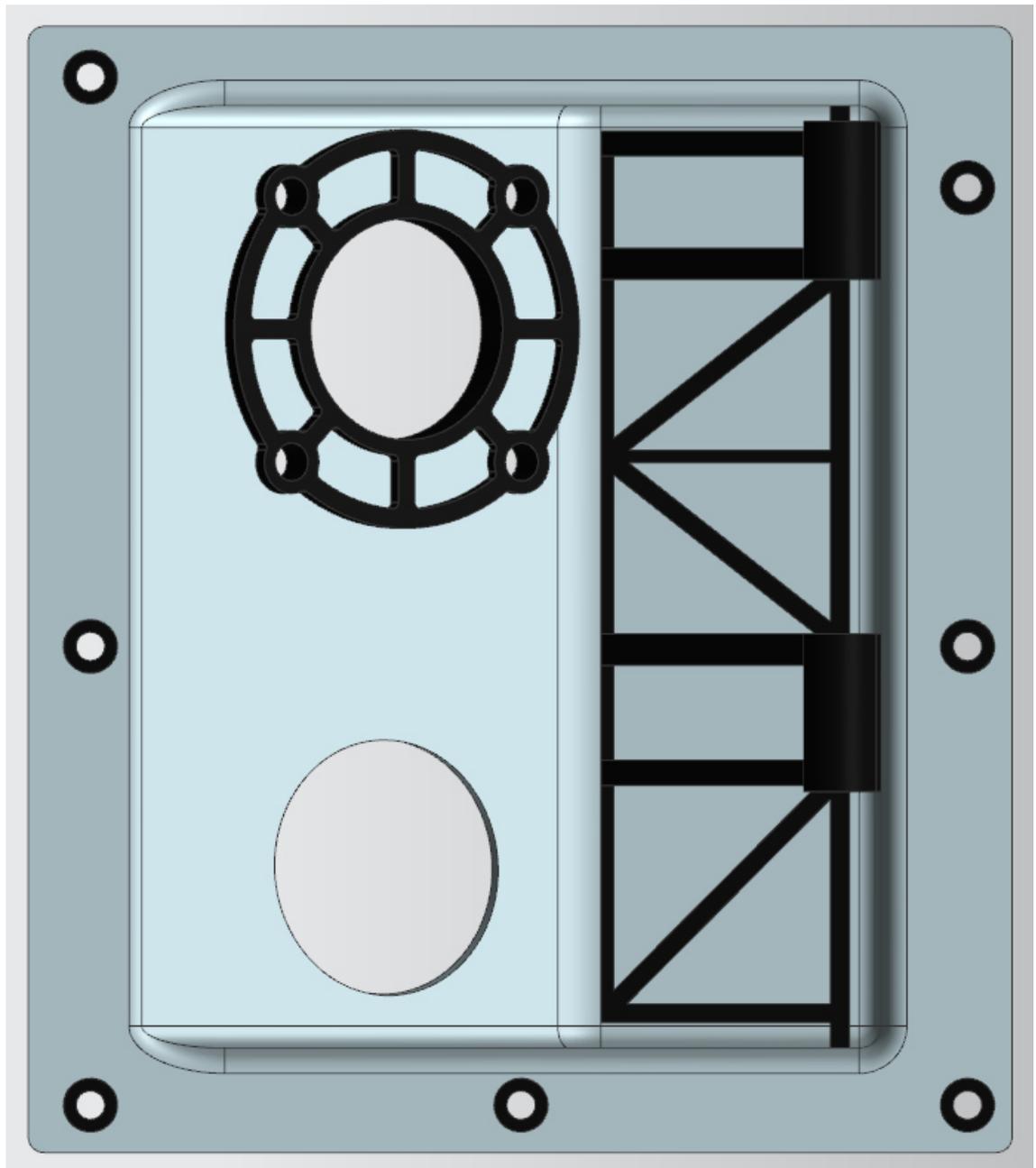


**Anhang B2 Hybrid-Variante**

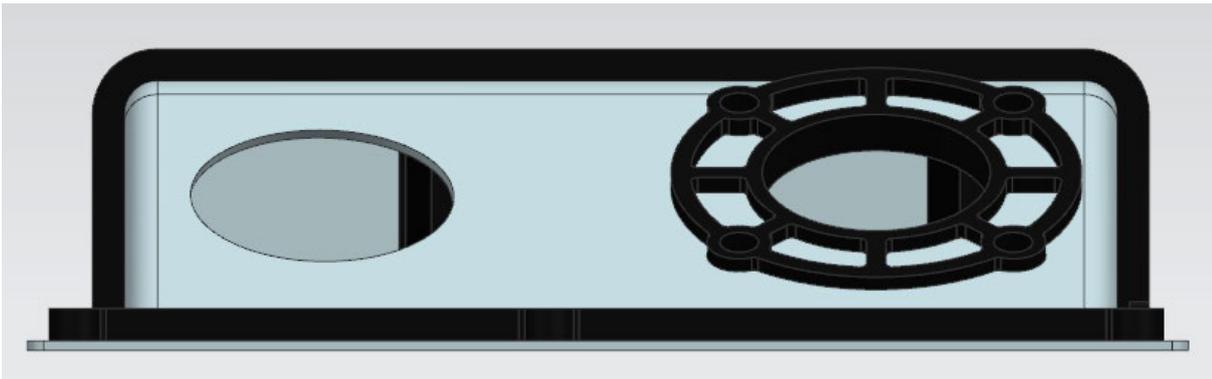
Drauf-Ansicht



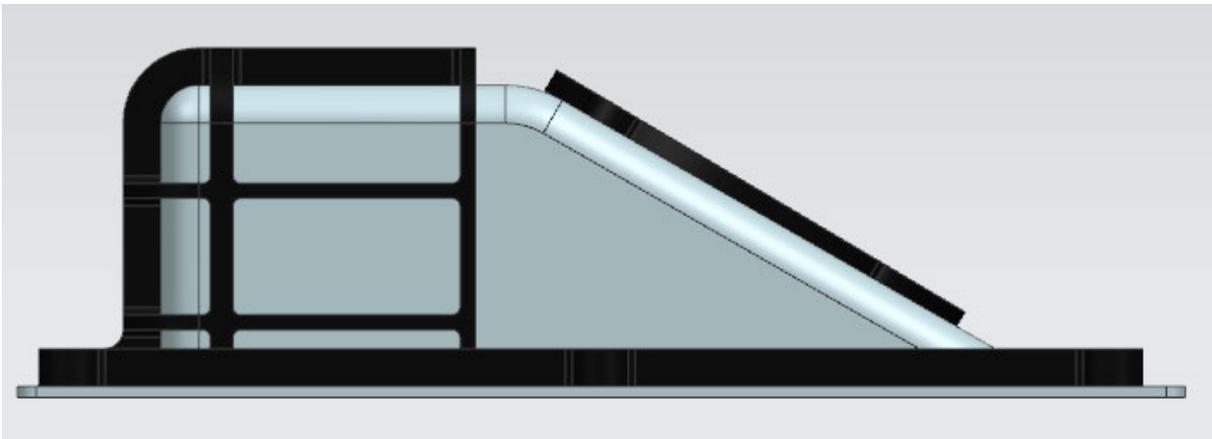
Unter-Ansicht



Vorder-Ansicht



Seiten-Ansicht



Rück-Ansicht





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Schulze

Vorname: Florian

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

Lineare Strukturberechnung zur Ermittlung des Leichtbaupotentials eines Multimaterial-Hybridbauteils

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

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

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

Hamburg

Ort

14.07.2021

Datum

  
Unterschrift im Original