

Entwurf eines transparenten Vakuumin- sulationspaneels für Gewächshäuser nach Vorbild fraktaler Wabenstruktu- ren von Diatomeen

Development of a transparent vacuum insulation panel for greenhouses inspired by fractal
honeycomb-structures of diatoms

Bachelor-Arbeit

Tim Dunker

Matrikel-Nummer: 304725

Abgabe: 24.12.2013

Gutachter:

Prof. Dr. Jörg Müssig

Dr. Christian Hamm

Betreuer:

Paul Bomke

Robert Naguschewski



Zusammenfassung

Die Beheizung macht 75 % des Energieverbrauchs in Gebäuden aus. Bei den hohen Energie-sparanforderungen der Europäischen Union müssen hocheffiziente Wärmeisolationen entwickelt werden. Mit Vakuumisulationspaneelen können die höchsten Wärmewiderstände realisiert werden. Allerdings sind sie durch ihren Aufbau nicht transparent und gegenüber Belastungen sehr empfindlich. Dabei ist Wärmedämmung auch für funktionale Häuser mit transparenten Fassaden interessant. Für ein transparentes Vakuumisulationspaneel für Gewächshäuser muss eine stützende Kernstruktur gefunden werden, mit der das Paneel den Schnee und Windlasten, aber auch dem durch das Vakuum verursachten atmosphärischen Druck standhalten kann. Kieselalgen haben durch die Evolution hochstabile Leichtbaustrukturen zum Schutz vor Fressfeinden entwickelt, die als Vorbild für eine geeignete Stützstruktur dienen können. Die Gattung *Isthmia* besitzt fraktale Wabenstrukturen, die abstrahiert in hexagonaler Form und mit einer fraktalen Ebene für das Isolationspaneel verwendet werden. Um die Leistungsfähigkeit der Struktur zu testen wird ein parametrisches Finite-Elemente-Modell erstellt, das mit einem Evolutions-Algorithmus, unter Berücksichtigung der anzunehmenden Lasten, optimiert wird. Das beste Design aus der Optimierung kann den angenommenen Lasten standhalten, hat aber verglichen mit einem klassischen Vakuumisulationspaneel eine 3,7-fach schlechtere Wärmedämmfähigkeit. Durch die fraktalen Waben ist das Isolationspaneel im Vergleich zu einer gleich bemessenen Struktur ohne fraktale Ebene zwar 14,6 % schwerer, hat dafür aber 52,2% weniger Verformung.

Schlüsselwörter:

Wärmedämmung, *Isthmia*, Finite-Elemente-Methode, Optimierung, Evolutions-Algorithmus

Abstract

The heating is responsible for 75 % of a buildings energy use. Because of the high energy saving requirements of the European Union very efficient thermal insulations have to be developed. Highest thermal resistances can be achieved with the use of vacuum insulation panels. Because of their architecture they are not transparent and very sensitive to stress. But thermal insulation is also interesting for functional buildings with transparent facades. For a transparent vacuum insulation panel for greenhouses a supporting core structure has to be found to reinforce it against snow and wind loads as well as the vacuum induced atmospheric pressure. Evolution forced diatoms to develop very robust lightweight structures which protect them against predators. These efficient structures can be used as model for a suitable supporting core structure. The genus *Isthmia* has fractal honey comb structures which can be abstracted into a hexagonal shape with one fractal level. This abstracted pattern can be used for the insulation panel. To test the performance of the structure a parametric finite element model is created and optimized for the assumed loads using an evolutionary algorithm. The best design of the optimization can bear the assumed loads but has 3.7-times weaker thermal insulation properties than a classic vacuum insulation panel. A panel with fractal honey combs generates 14.6 % more mass compared to an equivalent design without fractal level but has 52.2 % less displacement.

Keywords:

Heat insulation, *Isthmia*, finite element method, optimization, evolutionary algorithm

Abkürzungsverzeichnis

ALHS	Advanced Latin Hypercube Sampling
AWI	Alfred-Wegener-Institut
DoE	Design of Experiments
EA	Evolutions-Algorithmus
EPS	Expandiertes Polystyrol
imare	Institut für marine Ressourcen GmbH
IR	Infrarotstrahlung
MOP	Metamodel of Optimal Prognosis
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PS	Polystyrol
PVC-U	Hartes Polyvinylchlorid
UV	Ultraviolettstrahlung
VIP	Vakuumisolationspaneel
WDVS	klassische Wärmedämm-Verbundsysteme

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Energiewende und Wärmedämmung.....	1
1.2	Physikalische Grundlagen für die Wärmedämmung	2
1.2.1	Wärmeleitung	2
1.2.2	Konvektion	4
1.2.3	Wärmestrahlung	4
1.3	Konventionelle Dämmverfahren	5
1.4	Vakuumisolationspaneele	6
1.5	Transparente Vakuumisolationspaneele für den Einsatz im Gewächshaus.....	8
1.6	Biologisches Vorbild	9
1.7	Umsetzung des biologischen Prinzips	10
1.8	Patente.....	12
1.9	Arbeitshypothese	14
2	Material und Methode	14
2.1	Geometrie und Konstruktion	14
2.2	Konstruktionswerkstoff	16
2.2.1	PMMA: Plexiglas® XT.....	18
2.3	Finite Elemente Analyse.....	19
2.3.1	Physikalisches Modell	19
2.3.2	Lastfälle und Lagerung.....	20
2.3.3	Lösungsansatz	22
2.3.4	Gitterstudie	22
2.3.5	Validierung.....	23
2.4	Optimierung	24
2.4.1	Eingabe- und Ausgabeparameter.....	24
2.4.2	Sensitivitätsanalyse mit DoE und MOP	25
2.4.3	Evolutions-Algorithmus	25

2.5	Vergleichsrechnung ohne fraktale Waben.....	26
2.6	Berechnung der Wärmedämmfähigkeit.....	26
3	Ergebnisse	27
3.1	Verlauf der Optimierung.....	27
3.2	Parameteranalyse	30
3.3	Mechanische Eigenschaften im Vergleich.....	30
3.3.1	Von-Mises-Vergleichsspannung mit fraktalen Waben	31
3.3.2	Von-Mises-Vergleichsspannung ohne fraktale Waben	33
3.3.3	Verformung mit fraktalen Waben	35
3.3.4	Verformung ohne fraktale Waben	37
3.4	Thermische Eigenschaften.....	38
4	Diskussion	39
4.1	Optimierung	39
4.1.1	Einfluss der Eingabeparameter.....	39
4.1.2	Ergebnis der Optimierung	39
4.2	Mechanische Eigenschaften.....	40
4.2.1	Vorteile durch fraktale Waben	40
4.2.2	Das Problem der Kerbspannungen	40
4.3	Wärmedämmfähigkeit	41
4.4	Fazit	42
4.5	Ausblick.....	42
5	Literatur	44
5.1	Primärliteratur.....	44
5.2	Sekundärliteratur.....	45
5.3	Patente.....	46
5.4	Abbildungen	46

1 Einleitung

1.1 Energiewende und Wärmedämmung

Die Europäische Union fordert bis zum Jahr 2020 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 20 % verglichen mit dem Wert von 1990 (Abbildung 1.1). Langfristig ist bis 2050 eine Reduktion von 50 % des Wertes geplant. Vor allem durch Energiegewinnung mittels fossiler Brennstoffe als primärer Energiequelle entstehen große Mengen an Treibhausgas (European Commission, 2008). In Deutschland beträgt der Anteil des gesamten Energieverbrauchs in Gebäuden 30 % und allein die Beheizung macht dabei 75 % davon aus (Erbenich und Klein, 2003). Neubauten erfüllen die dämmtechnischen Standards. Der Großteil des Gebäudebestandes sind allerdings ältere Gebäude, deren Wärmedämmung unzureichend ist. Diese Bauten können diesbezüglich saniert werden, um mit relativ geringem Aufwand hohe energetische Einsparungen zu erreichen (Böhmer *et al.*, 2010). Die adäquate Wärmedämmung von Gebäuden besitzt folglich großes Potential für Energieeinsparung. Dabei sollte der Fokus nicht nur auf Wohngebäuden liegen, da auch Gebäude mit anderen Funktionen wie z.B. Gewächshäuser von verbesserter Wärmedämmung profitieren.

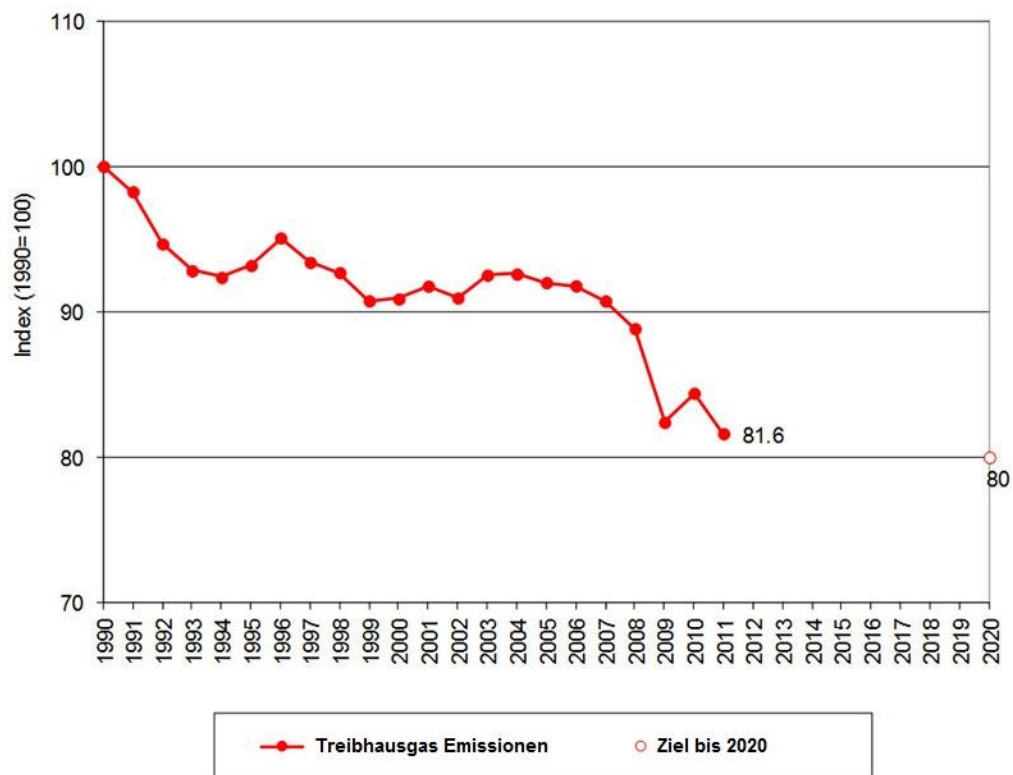


Abbildung 1.1: Verlauf der Treibhausgasemissionen seit 1990 bis 2011.

Einleitung

In großflächigen Produktionsgewächshäusern müssen Pflanzen auch bei kalten Außentemperaturen konstant temperiert sein. Dafür müssen in den Gewächshäusern Heizungen installiert werden, um dem Wärmeverlust entgegen zu wirken. Die Fassaden von Gewächshäusern sind auf Transparenz ausgelegt jedoch nicht auf Wärmedämmung. Mit transparenter Wärmedämmung in Gewächshausfassaden könnte Wärme besser im Gewächshaus gehalten, hoher Energieverbrauch vermieden und damit Heizkosten eingespart werden.

1.2 Physikalische Grundlagen für die Wärmedämmung

Für den Einstieg in die Wärmedämmung folgt ein kleiner Exkurs in die physikalischen Grundlagen der Thermodynamik.

Wärme Q ist die in Joule (J) angegebene Energie, die aufgrund einer Temperaturdifferenz von einem Körper auf einen anderen übergehen kann. Dies geschieht stets in Richtung des Temperaturgradienten vom wärmeren zum kälteren Körper. Wenn einem Körper durch Erwärmen Energie hinzugefügt wird, dann steigt generell seine Temperatur. Die Wärmemenge Q , die für die Temperaturdifferenz ΔT benötigt wird, ist proportional zu ΔT und zur Masse m des Körpers (Tipler und Mosca, 2009). Dieser Zusammenhang wird durch Gleichung 1.2.1 beschrieben:

$$Q = m c \Delta T . \quad (1.2.1)$$

Dabei ist c die spezifische Wärmekapazität, die angibt, welche Wärmemenge erforderlich ist, um einen Körper der Masse $m = 1 \text{ kg}$ um $\Delta T = 1 \text{ K}$ oder $1 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erwärmen. Die Wärmekapazität ist stoffspezifisch und hat die Einheit $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Tipler und Mosca, 2009).

Um Wärme dämmen zu können, muss zunächst verstanden werden, wie Wärme übertragen wird. Wärme kann auf drei Arten übertragen werden: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung

1.2.1 Wärmeleitung

Der Energietransport findet durch Wechselwirkung zwischen Atomen und Molekülen statt, welche dabei nicht selbst transportiert werden. Erwärmete Atome schwingen mit höherer Energie und stoßen benachbarte Atome mit niedrigerer Energie an, sodass die Wärme allmählich durch den festen Körper transportiert wird (Tipler und Mosca, 2009). Bei Gasen wird Wärmeleitung durch Stöße und die Brownsche Molekularbewegung verursacht.

Wenn sich die Temperatur über den Weg ändert, wird Wärme übertragen. Dieser Zusammenhang wird durch den Temperaturgradienten $\Delta T / \Delta x$ angegeben. Die Geschwindigkeit der

Einleitung

Wärmeübertragung wird in Watt (W) angegeben und heißt Wärmestrom I (Tipler und Mosca, 2009):

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} . \quad (1.2.2)$$

Dabei ist ΔQ die Änderung der Wärme und Δt die Änderung der Zeit. A ist die Querschnittsfläche des Körpers und k ist die stoffspezifische Wärmeleitfähigkeit (Tipler und Mosca, 2009). Sie gibt an, wie gut ein Körper Wärme übertragen kann und hat die Einheit $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$. Wenn Gleichung 1.2.2 nach der Temperaturdifferenz aufgelöst wird, gilt nach (Tipler und Mosca 2009):

$$|\Delta T| = I \frac{|\Delta x|}{k A} = I R . \quad (1.2.3)$$

ΔT ist die Temperaturabnahme in Richtung des Wärmestroms und R ist der Wärmewiderstand in K W^{-1} :

$$R = \frac{|\Delta x|}{k A} . \quad (1.2.4)$$

Für verschiedene Dämmschichten in einer Reihe ist im stationären Zustand der Wärmestrom I durch alle Schichten der gleiche:

$$I = \frac{\Delta T}{R} . \quad (1.2.5)$$

Dabei ist ΔT die Differenz der Temperatur vom Anfang der ersten Schicht und vom Ende der letzten Schicht. Die Wärmewiderstände der einzelnen Schichten in einer Reihe werden zu einem Gesamtwiderstand addiert:

$$R = R_1 + R_2 + \dots . \quad (1.2.6)$$

Für parallele Wärmewiderstände ist die Summe aller einzelnen Wärmeströme der gesamte Wärmestrom I :

$$I = I_1 + I_2 + \dots . \quad (1.2.7)$$

Auch für parallele Wärmewiderstände gilt dann Gleichung 1.2.5, nur wird der Wärmewiderstand R folglich berechnet:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots . \quad (1.2.8)$$

Einleitung

Im Bauwesen wird anstelle der Wärmeleitfähigkeit oft der Wärmewiderstandsfaktor r eines Werkstoffes angegeben. Er gibt den Wärmewiderstand eines Werkstoffes bei einer Fläche von 1 m^2 in Abhängigkeit der Schichtdicke an (Tipler und Mosca, 2009):

$$r = A R = \frac{|\Delta x|}{k}. \quad (1.2.9)$$

Je größer r ist, desto besser ist die Isolation. Die Einheit ist $\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$.

Der Kehrwert von r ist der sogenannte U-Wert U oder auch Wärmedurchgangskoeffizient (Böhmer *et al.*, 2010):

$$U = \frac{1}{r} = \frac{k}{|\Delta x|}. \quad (1.2.10)$$

Seine Einheit ist $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Je größer der U-Wert ist, desto schlechter ist die Isolation. U-Werte können für jede Schichtdicke eines Werkstoffes berechnet werden.

Der Wärmestrom I durch eine Dämmschicht lässt sich mit r oder dem U-Wert folgendermaßen berechnen (Tipler und Mosca, 2009):

$$I = \frac{k}{|\Delta x|} A \Delta T = \frac{A}{r} \Delta T = U A \Delta T. \quad (1.2.11)$$

1.2.2 Konvektion

Die Wärmeübertragung ist hier mit einem Stofftransport verknüpft. Beispielsweise steigt die erwärmte Luft über einer Heizung auf, weil ihre Dichte aufgrund der Ausdehnung abnimmt. Es kommt zum Wärmetransport durch den Ortswechsel der erwärmten Luftmoleküle. Bei natürlicher Konvektion kommt es also zu einer Strömung aufgrund von Dichteunterschieden in einem Fluid. Der Wärmestrom zwischen einem Fluid und einem Körper ist sehr komplex zu berechnen. Die von einem Körper durch Konvektion auf das umgebende Fluid übertragene Wärmemenge ist etwa proportional zu seiner Oberfläche und zu der Temperaturdifferenz (Tipler und Mosca, 2009).

1.2.3 Wärmestrahlung

Die Strahlung ist nicht stoffgebunden und funktioniert als einzige Wärmeübertragung auch im Vakuum. Durch elektromagnetische Wellen wird Energie mit Lichtgeschwindigkeit transportiert. Die Strahlungsarten unterscheiden sich durch Wellenlängenbereiche und die Frequenz, wobei kürzere Wellenlängen höhere Frequenzen bedeuten (Tipler und Mosca, 2009). Ultraviolettstrahlung (UV) hat Wellenlängen von 10 bis 400 nm, das für Menschen sichtbare Licht hat eine Wellenlänge von 400 bis 780 nm und Infrarotstrahlung (IR) liegt im Bereich von

Einleitung

780 nm bis 100 μm . Jeder Körper absorbiert und emittiert elektromagnetische Strahlung. Dabei ist IR für Wärmedämmung bedeutend, da die von Körpern bei Raumtemperatur abgegebene Wärmestrahlung im IR-Bereich liegt. Die abgestrahlte Leistung P_e mit der Einheit W wird durch das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz definiert (Tipler und Mosca, 2009):

$$P_e = e \sigma A T^4 . \quad (1.2.12)$$

Darin ist e der Emissionsgrad, der abhängig von der Materialbeschaffenheit ist. Er nimmt Werte von 0 bis 1 an, wobei 1 die vollständige Emission wie bei einem schwarzen Körper bedeutet. Ein schwarzer Körper absorbiert die gesamte aufgetroffene Strahlung und emittiert dadurch am meisten Wärmestrahlung. Der Faktor σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante mit dem Wert $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. A ist die Oberfläche des Körpers und T seine Temperatur. Gibt ein Körper mit höherer Leistung Wärmestrahlung ab, als er durch Absorption aufnimmt, dann kühlt er ab und die Umgebung wird erwärmt. Ist die Leistung geringer, nimmt der Körper Wärme auf und die Umgebung wird kälter. Die Nettostrahlungsleistung ΔP eines Körpers mit der Temperatur T in einer Umgebung der Temperatur T_0 ist (Tipler und Mosca, 2009):

$$\Delta P = e \sigma A (T^4 - T_0^4) . \quad (1.2.13)$$

Die Wellenlänge des Maximums λ_{max} der emittierten Strahlung eines schwarzen Körpers ist abhängig von seiner Temperatur T . Es gilt das Wien'sche Verschiebungsgesetz (Tipler und Mosca, 2009):

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} . \quad (1.2.14)$$

1.3 Konventionelle Dämmverfahren

Zur Wärmedämmung sollte die Wärmeübertragung durch die beschriebenen drei Arten so gut wie möglich unterbunden werden.

Weit verbreitet ist die Dämmung mit klassischen Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS). Diese werden auf Basis von expandiertem Polystyrol (EPS) oder Mineralfaserdämmstoffen hergestellt. Beide zusammen erreichen einen Marktanteil von über 90 %. Bei einer Dämmstoffstärke von 100 mm kann mit WDVS der U-Wert einer massiven Gebäudewand auf $0,25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ reduziert werden (Erbenich und Klein, 2003). Bei einer Stärke von 300 bis 400 mm sind die Anforderungen an ein Passivhaus mit U-Wert $< 0,15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ erfüllt (Erbenich und Klein, 2003).

1.4 Vakuumisolationspaneele

Weniger verbreitet als WDVS, aber dafür sehr effizient sind Vakuumisolationspaneele (VIP). Bei einer Dicke von 20 mm erreichen sie einen U-Wert von $0,2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (Fricke *et al.*, 2006). Abbildung 1.2 zeigt die Wärmeleitfähigkeit von konventioneller Dämmung im Vergleich mit evakuierter Dämmung.

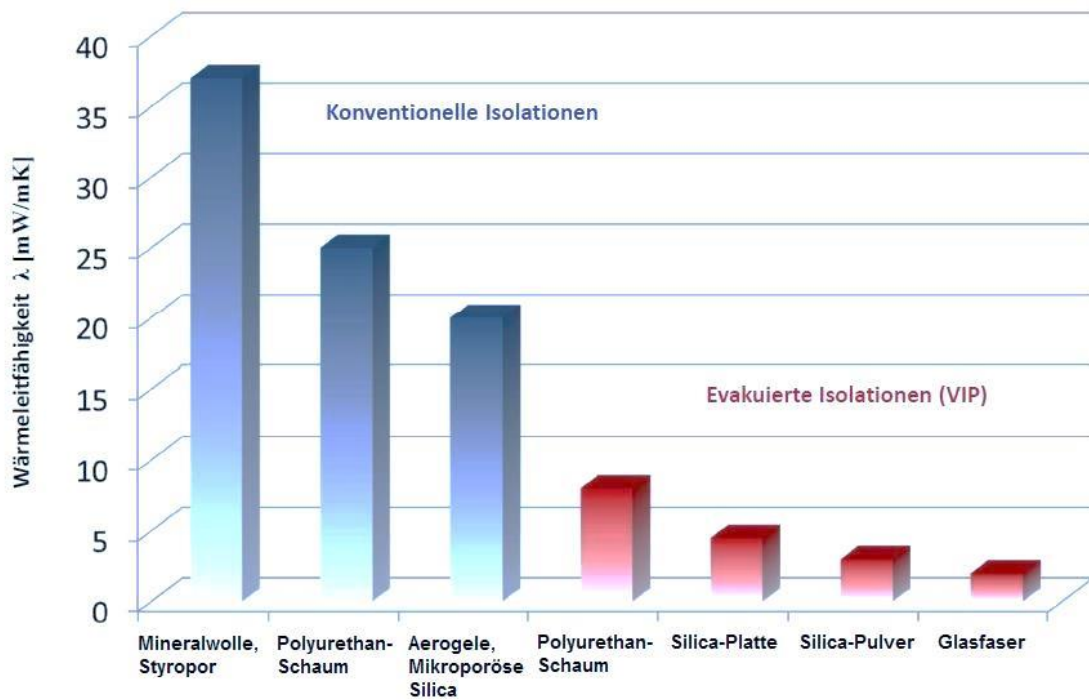


Abbildung 1.2: Evakuerte Isolationen haben deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten als konventionelle Isolationen.

Vakuumisolation ist schon seit 1890 bekannt als James Dewar das evakuierte Dewargefäß erfand. Später produzierte die deutsche Firma Thermos GmbH die noch heute bekannte Thermosflasche. Beide Systeme nutzen ein Hochvakuum (Druck $p < 10^{-4}$ mbar), um die gasbedingte Wärmeleitung zu unterbinden. Zudem werden hochverspiegelte Wände verwendet, um den Wärmetransport durch Wärmestrahlung zu reduzieren. Die Hüllen werden aus Glas oder Stahl hergestellt. Durch die zylindrische oder sphärische Form können die Wände dem atmosphärischen Druck von 1013,25 hPa standhalten (Fricke *et al.*, 2006).

Um das Dewar-Prinzip auf flache Paneele zu übertragen und das Kollabieren zu verhindern, muss lasttragendes Material zwischen die evakuierten Wände eingebaut werden.

Bei heutigen VIPs für den Gebäudebau werden vorwiegend poröse Kerne aus pyrogener Kieselsäure verwendet, die den atmosphärischen Druck flächig verteilt aufnehmen können. Je feinporiger die Kerne sind, desto geringer sind die Anforderungen an das Vakuum, um die

Einleitung

gasbedingte Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren (Abbildung 1.3). Bei 200 nm großen Poren wird nur ein Vakuum von 10 mbar benötigt, während bei 20 μm großen Poren schon ein Vakuum von 0,1 mbar benötigt wird, damit die Konvektion unterdrückt wird (Fricke *et al.*, 2006). Die mittlere freie Weglänge (Weg, den ein Teilchen zurücklegt, bevor es auf ein anderes trifft) von Luftmolekülen unter Normalbedingungen beträgt etwa 70 nm und die Porengröße von pyrogener Kieselsäure liegt zwischen 10 und 100 nm (Johannson, 2012). Wenn die Luft evakuiert wird, verlängert sich die mittlere freie Weglänge, da die Anzahl der Moleküle reduziert wird. Die Wärmeübertragung durch Stoßprozesse bei Gasmolekülen und durch Konvektion verringert sich (Johannson, 2012). Die Wärmeleitung über den Festkörper und die Wärmestrahlung sind konstant, solange die Temperatur und die Dichte des Werkstoffes unverändert bleiben (Johannson, 2012). Die Kerne werden mit einer Schutzschicht verkleidet, von Hochbarriere-Folie versiegelnd umschlossen (Abbildung 1.4) und anschließend evakuiert. Die Folie besteht aus mit Aluminium beschichtetem Polyethylen (PE) oder Polyethylenterephthalat (PET) (Fricke *et al.*, 2006).

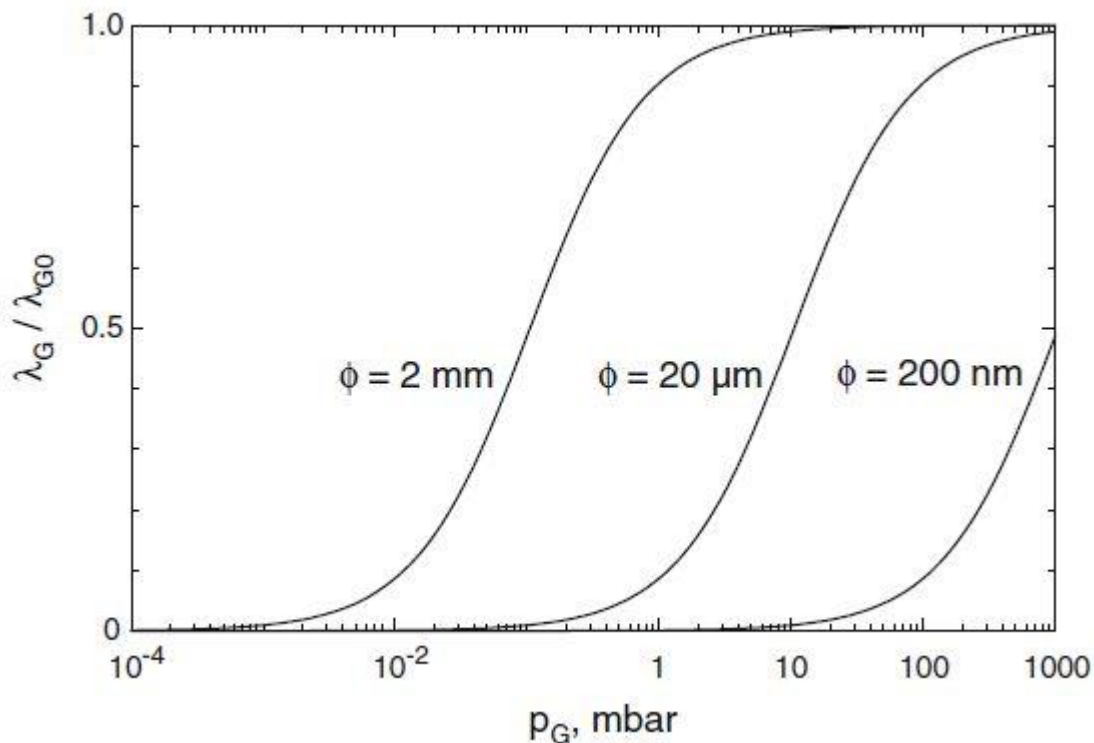


Abbildung 1.3: Dargestellt ist die relative, gasbedingte Wärmeleitfähigkeit λ_G / λ_{G0} über dem Gasdruck P_G bei 300 K Temperatur mit der Porengröße ϕ als Parameter. Kleinere Porengrößen verringern die Wärmeleitfähigkeit bereits bei kleiner Gasdruckabnahme, während bei großen Porengrößen für die gleiche Wärmeleitfähigkeit durch ein stärkeres Vakuum ein viel geringerer Gasdruck erzeugt werden muss.

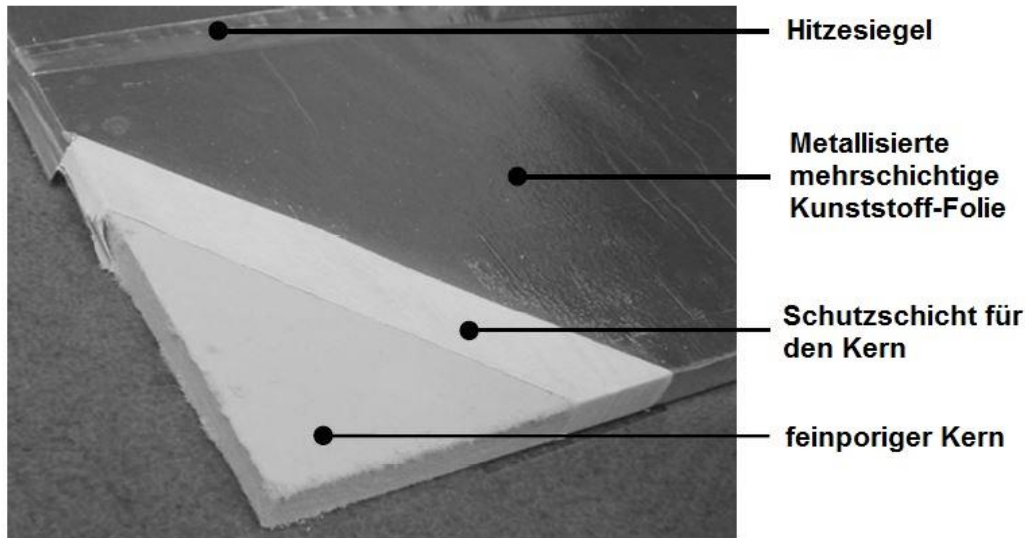


Abbildung 1.4: Die einzelnen Schichten eines Vakuumisulationspaneels.

Die Hochbarriere-Folien werden benötigt, um die Diffusion von O_2 , N_2 und H_2O in das Paneel zu verhindern, damit das Vakuum so lange wie möglich seine Güte behält (Fricke *et al.*, 2006), denn mit zunehmendem Gasdruck nimmt die Wärmeleitfähigkeit irreversibel zu (Johannson, 2012). Dementsprechend sind die VIPs fragil und müssen mit erhöhter Vorsicht verbaut werden, um Schäden an der Folie zu vermeiden. Die Folie ist durch die Aluminiumbeschichtung eine Wärmebrücke (Johannson, 2012).

Die Wärmeleitfähigkeit von neuen VIPs beträgt $4,5 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Innerhalb von 25 Jahren nimmt sie etwa auf $7,4 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ zu. Mineralwollen haben im Vergleich dazu eine Wärmeleitfähigkeit von etwa $40 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Johannson, 2012).

1.5 Transparente Vakuumisulationspaneele für den Einsatz im Gewächshaus

VIPs sind aufgrund ihres feinporigen Kerns und der metallisierten Hochbarriere-Folie nicht transparent. In dieser Arbeit soll ein transparentes Vakuumisulationspaneel entworfen werden, dass als Fassade von Kulturgewächshäusern verwendet werden kann. Neben dem atmosphärischen Druck müssen die Paneele auch der Witterung standhalten, sodass zusätzlich noch Wind- und Schneelasten berücksichtigt werden müssen.

Der stützende Kern kann bei dieser Art von Isolationspaneel keine Anwendung finden, weil er nicht lichtdurchlässig ist. Ohne den feinporigen Kern ist die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle weniger eingeschränkt und es muss ein starkes Vakuum vorherrschen. Zudem muss eine Struktur für das Paneel gefunden werden, die dem starken Druck standhalten kann. Mit dem Ansatz der Bionik soll eine geeignete Struktur gefunden werden.

1.6 Biologisches Vorbild

Die Disziplin Bionik befasst sich mit der technischen Umsetzung der Prinzipien der Natur. Dazu werden zunächst Struktur-Funktions-Beziehungen bei bestimmten Arten von Tieren und Pflanzen ermittelt. Daraus werden allgemeine Prinzipien abstrahiert. Es folgt eine adäquate, der Technik angemessene Umsetzung der allgemeinen Prinzipien bis zur Realisation durch den Ingenieur (Nachtigall, 2010).

Die natürliche Evolution hat eine Vielzahl von Strukturen hervorgebracht, die den Lebewesen das Überleben in ihrer Umgebung ermöglichen. Im Ozean und im Süßwasser haben die Kieselalgen (Diatomeen) durch die Koevolution mit ihren Fressfeinden, vor allem den Ruderfußkrebsen (Kopepoden), einzigartige Silikat-Schalen (Frusteln) entwickelt. Die zu dem Phytoplankton gehörenden Diatomeen müssen leicht genug sein, um in der Meeressäule nahe der Wasseroberfläche zu schweben, damit sie genügend Licht für die Photosynthese erhalten. Dabei hat Silikat eine höhere Dichte als Wasser. Gleichzeitig müssen die Frusteln den Angriffen der Kopepoden standhalten, die mit starken, ebenfalls teilweise aus Silikat bestehenden Mundwerkzeugen auf die Diatomeen einschlagen (Hamm, 2005). Die Frusteln haben also den Anspruch leicht und gleichzeitig stabil zu sein. Mit den stabileren Silikat-Schalen der Diatomeen mussten auch die Kopepoden bessere Mundwerkzeuge entwickeln, sodass es zur ständigen Verbesserung beider Strukturen kam (Hamm, 2005; Hamm *et al.*, 2003). Diatomeen können Drücken zwischen 1 und 7 N mm⁻² (100 bis 700 t m⁻²) standhalten (Hamm *et al.*, 2003). Entsprechend haben abstrahierte Formen hohes Potential dem atmosphärischen Druck von 1013,25 hPa (101.325 N mm⁻²) und zusätzlichen witterungsbedingten Lasten standzuhalten.

Das Potential der Flächenversteifungen der Diatomeen wird im *imare* in Bremerhaven bereits für innovativen Leichtbau genutzt. Mit dem Friedrich-Hustedt-Zentrum für Diatomeenforschung im AWI steht dem *imare* ein großes Archiv von Diatomeen zur Auswahl, die abstrahiert für die Optimierung von Strukturen und Bauteilen verwendet werden können. Mit dem ELiSE-Verfahren (Evolutionary Light Structure Engineering) kann im *imare* mit dem Einsatz von voroptimierten Diatomeen-Formen mit Optimierungsverfahren, wie der Evolutionsstrategie, bei geringerer Entwicklungsdauer ein höherer Optimierungsgrad einer Struktur erreicht werden als mit herkömmlichen Optimierungsverfahren (Hamm *et al.*, 2008).

Die Gattung *Isthmia* besitzt fraktale Waben zur zusätzlichen Flächenversteifung der Frustel (Abbildung 1.5). Strukturen mit fraktalen Ebenen können mit höherer Anzahl der Hierarchieebenen die relative Festigkeit unter Druck (bezogen auf die Festigkeit des Vollmaterials) erhöhen (Degischer und Lüftl, 2009).

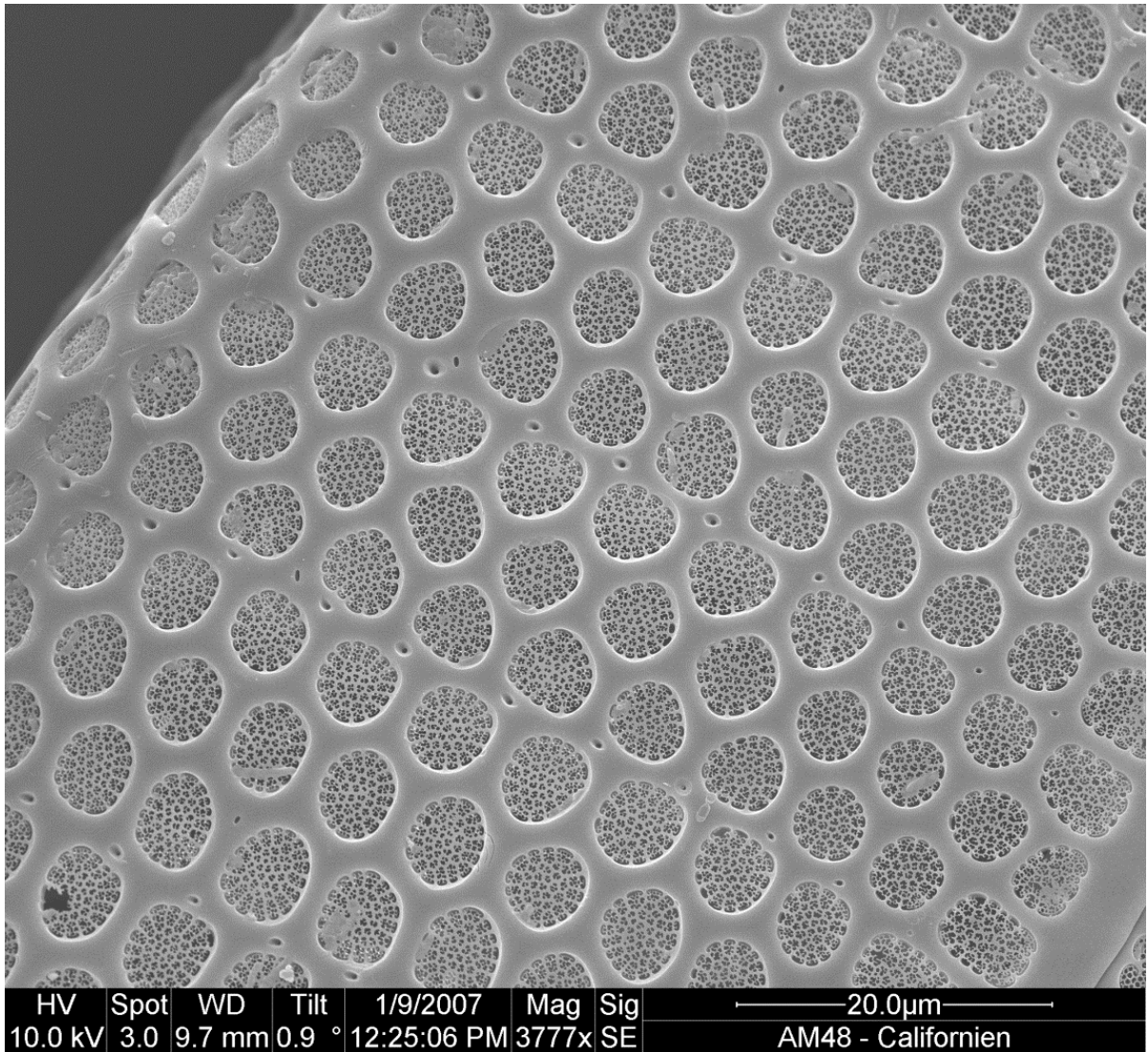


Abbildung 1.5: Ausschnitt aus der Frustel einer Diatomee der Gattung *Isthmia*. Zu sehen sind die fraktalen Waben innerhalb der größeren runden Wabenstruktur der Frustel.

1.7 Umsetzung des biologischen Prinzips

Runde Wabenformen sind als Sandwichkern für ein Vakuumisulationspaneel eher ungeeignet, da bei kreisrunden Formen zwischen den Schnittstellen vorhandenes Volumen durch dickere Wände oder Hohlräume verschwendet wird (Abbildung 1.6). Dies geht aus der dichtesten Kreisdeckung in der Ebene hervor (Meretz, 1963). Hexagonale Waben haben ein gutes Verhältnis von Wandstärke zu Volumen. Als Vorbild für die Stützstruktur des Vakuumisulationspaneels soll eine hexagonale Wabenstruktur mit den abstrahierten, fraktalen Waben der Gattung *Isthmia* kombiniert werden (Abbildung 1.7).

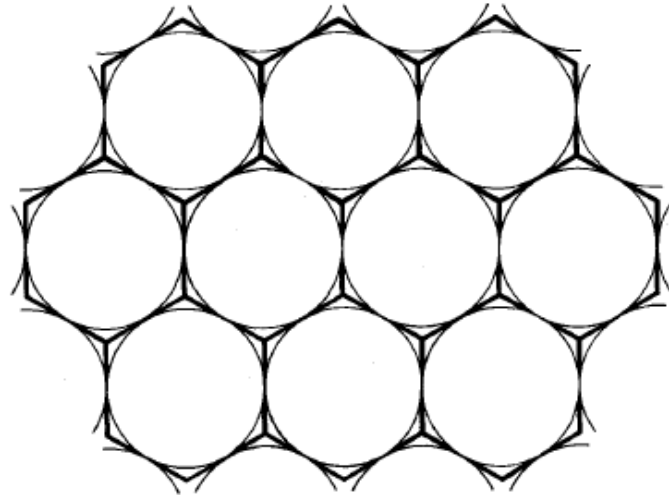


Abbildung 1.6: Für die dichteste Anordnung in der Ebene müssen die Kreise wabenförmig angeordnet werden. Die Tangentenabschnitte der Kreise ergeben das Wabenmuster, durch das kein Volumen verschwendet wird.

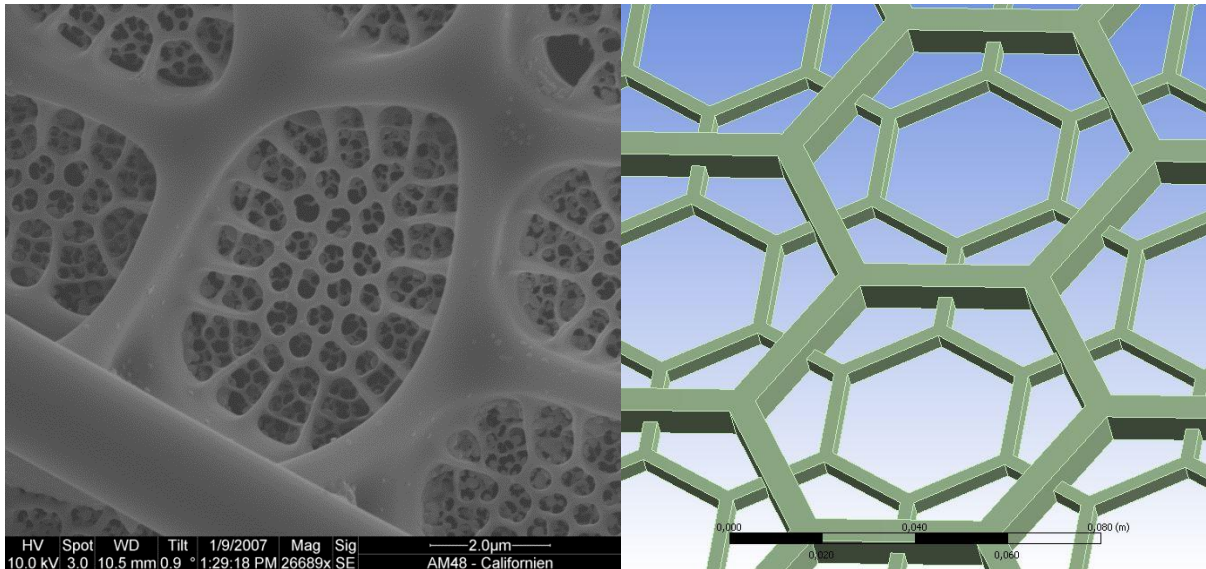


Abbildung 1.7: Links ist die Detailaufnahme der fraktalen Waben von *Isthmia* zu sehen (Maßstab = $2 \cdot 10^{-6}$ m). Rechts ist die abstrahierte hexagonale Wabenform mit fraktalen Waben gezeigt (Maßstab = 0,08 m).

Durch die fraktalen Waben, die als zusätzliche Flächenversteifung dienen, soll die Durchbiegung des VIP durch den Flächendruck des Vakuums verringert werden. Dabei soll innerhalb einer hexagonalen Wabenebene eine kleinere fraktale, hexagonale Wabenebene enthalten sein. Bei mehreren und kleineren fraktalen Waben würde es neben einer Zunahme der Masse auch zu mehr Hindernissen für das Sonnenlicht kommen, sodass die Pflanzen, bedingt durch die Absorption und Brechung des Lichts im Werkstoff, weniger Lichtausbeute bekommen und dadurch schlechtere Erträge bringen.

Der Kern des fraktalen Waben-VIP soll aus zwei gestapelten Wabenebenen, wie sie in der in der Abbildung 1.7 rechts gezeigt sind, bestehen. Dabei sollen die fraktalen Wabenebenen nach

Einleitung

außen zu je einer den Kern abdeckenden Grundplatte gerichtet sein (Abbildung 1.8), sodass sie mit dieser verbunden werden und eine Sandwichplatte entsteht. Die Kanten der Grundplatten werden durch Seitenwände verbunden, damit ein geschlossenes Paneel entsteht. Die Wabenwände der großen Wabenzellen sollen mit kleinen Löchern versehen werden, damit für die gesamte Evakuierung des Paneels nur eine Öffnung in einer Grundplatte notwendig ist.

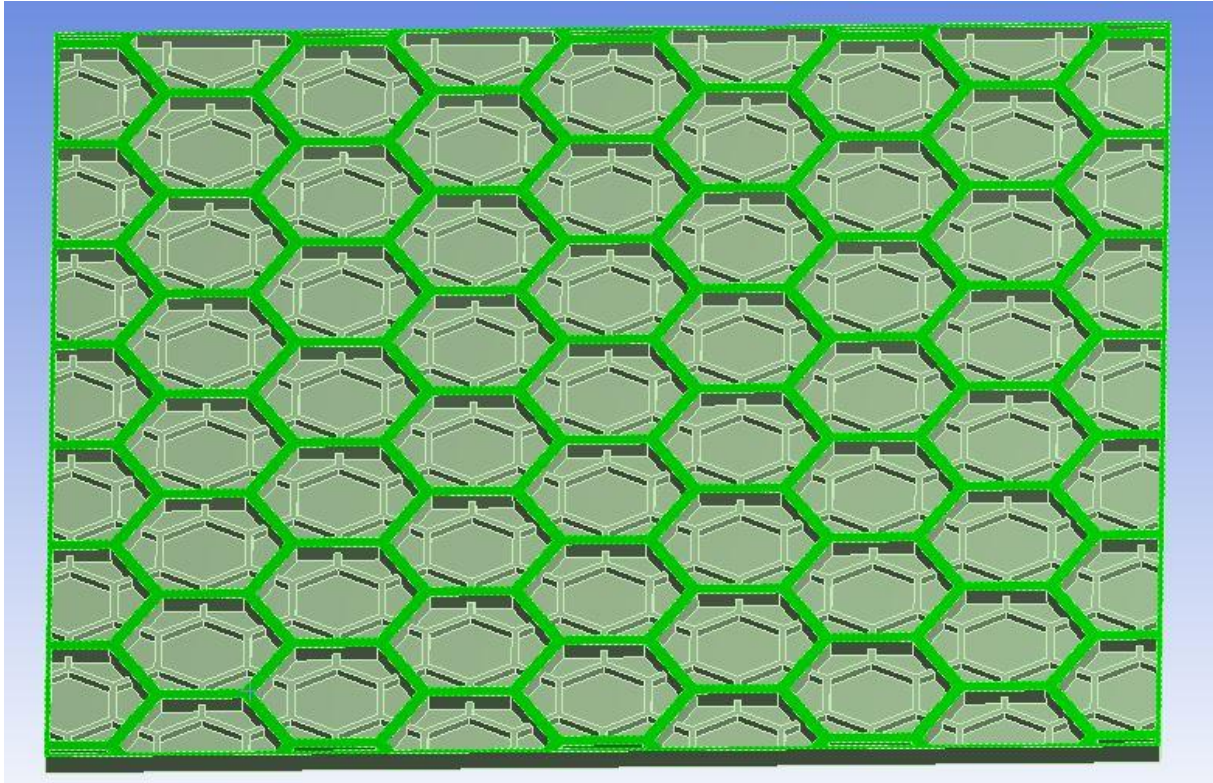


Abbildung 1.8: Zu sehen ist die untere Hälfte des Waben-VIP. Die fraktalen Waben sind mit der Grundplatte unten verbunden. Wenn die Hälfte an der grüne Flächen gespiegelt wird, entsteht durch die Außenwände ein geschlossenes Paneel.

1.8 Patente

Im Bereich der Wärmedämmung sind bereits VIP mit Wabenkernen vorhanden und mit Patenten geschützt. Um das fraktale Waben-VIP dieser Arbeit von bereits vorhandenen Waben-VIP abzugrenzen, werden im Folgenden zwei Patente beschrieben und mit dem fraktalen Waben-VIP verglichen.

Das Patent DE 102011050632 A1, offengelegt am 29.11.2012, beschreibt ein Wabenelement zur Dämmung, bei dem jede Wabe einzeln evakuiert ist. Dadurch soll beim Einbau das korrigierende Zuschneiden ermöglicht werden, ohne die komplette Dämmfähigkeit zu verlieren. Die Wabenstruktur soll sehr dünn, hochsteif und isolierend sein. Die Waben werden mit einem Material gefüllt, welches die nach Evakuierung verbliebenen einzelnen Luftmoleküle einschließt und damit deren Bewegungsfreiheit stark eingrenzt. Als Diffusionsbarriere wird

Einleitung

eine Hochsperrfolie in die Waben eingepresst und die komplette Wabenstruktur wird zusätzlich mit einer Hochsperroberfläche versehen. Die Wabenstege sollen aus Duroplast gefertigt werden, da sie dünn gefertigt werden können und dennoch hohe Traglast haben. Die Deckschichten werden diffusionsdicht verklebt.

Das transparente, evakuierte Waben-VIP in dieser Arbeit ähnelt dem im Patent beschriebenen Produkt in der hexagonalen Form der Waben, der Sandwichbauweise und in der Isolationsfunktion durch die Evakuierung des Wabeninnenraumes. Jedoch unterscheidet sich die Sandwichplatte durch die Transparenz, wobei auf eine Füllung der Waben mit hochporösen Materialien, die die mittlere Weglänge von Molekülen verkürzen, verzichtet wird. Dadurch kann zwar über vereinzelte, nicht evakuierte Gasmoleküle Wärmetransport (Konvektion und Stöße der Moleküle) stattfinden, aber es kommt nicht zur Wärmeleitung durch den Festkörper der Füllstruktur. Durch die fraktale Wabenstruktur unterscheidet sich die Sandwichplatte maßgeblich von der patentierten Struktur. Innerhalb einer Wabe befinden sich fraktale Waben, die jeweils die Hälfte der Steghöhe der nächstgrößeren Wabenebene haben. Die Durchmesser dieser fraktalen Waben sind so gewählt, dass sie bei Kontakt mit weiteren Hauptwaben, gleich große fraktale Waben durch die Schnittstellen erzeugen. Bei der patentierten Struktur wird jede Wabe einzeln evakuiert, während bei dem fraktalen Waben-VIP jedes Paneel einzeln evakuiert werden soll.

In dem Patent US 4358490 A, offengelegt am 9.11.1982, geht es um eine transparente Vakuumisierungsplatte. Es werden zwei oder mehr Gitterstrukturen (Abstandshalter) im evakuierten Raum zwischen zwei transparente Platten verbaut. Die Gitterstrukturen sind versetzt übereinander platziert, sodass sich die Kanten jeweils nur in einem Punkt schneiden. Dadurch wird der Weg für die Wärmeleitung durch den Festkörper schmaler und länger. Zudem wird beschrieben, dass durch einen geringeren Querschnitt der Abstandshalter die Wärmeleitung ebenfalls reduziert wird. Durch das Vakuum wird die Konvektion unterbunden, sodass nur die Wärmestrahlung ein Problem bleibt, welches mit einer semi-transparenten Folie gelöst wird. Diese Folie ist nur für sichtbares Licht durchlässig, für langwelligeres Infrarotlicht besteht keine Durchlässigkeit. Als empfohlene Werkstoffe werden Acrylkunststoffe, Quarz und Glas angegeben. Die Teile der Gitterstruktur werden so angeordnet, dass Quadrate entstehen oder es werden hexagonale Waben verwendet, in beiden Fällen werden die einzelnen Schichten versetzt aufeinander platziert.

Verglichen mit dem biologisch inspirierten Vakuumisierungspaneel findet sich vor allem Ähnlichkeit in der Transparenz der Systeme bei gleichzeitigem Ziel, die Wärmestrahlung auszuschalten. Wenn es durch einen geeigneten Werkstoff nicht gelingt die Infrarotstrahlung zu

blockieren, muss für das fraktale Waben-VIP ebenfalls eine semi-transparente Folie verwendet werden. Der Kern bzw. Abstandshalter ähnelt höchstens in der Form von hexagonalen Waben. Bei dem Patent werden dabei aber einzelne, gestapelte und versetzte Schichten von Waben verwendet, dadurch wird zwar der Wärmedurchgang erschwert, das aber auf Kosten der Tragfähigkeit. Der Kern des fraktalen Waben-VIP hat durchgängige Stege und weist eine kleinere fraktale Wabenebene innerhalb des Volumens der Initial-Wabe auf, wodurch das Tragen größerer Lasten möglich ist.

1.9 Arbeitshypothese

Die Hypothese, die in dieser Arbeit überprüft werden soll, ist folgende: Die fraktalen Waben ermöglichen es ein VIP zu erstellen, das auch ohne porösen Kern dem atmosphärischen Druck standhalten kann und bei Transparenz eine hohe Wärmeisolation bietet.

Zur Überprüfung der Hypothese wird folgende Methodik angewandt:

Das vorgestellte fraktale Waben-VIP soll für die Vakuumlaster und die witterungsbedingten Flächenlasten aus Schnee und Wind eines Kulturgewächshauses optimiert werden. Dafür soll die Wabengröße, die Wandstärke von beiden Wabenebenen und Höhe der fraktalen Wabenebene variiert werden. Die Außenwände und die Grundplatte geben mit einer konstanten Höhe und Wandstärke den Optimierungsraum vor. Für ein Finite-Elemente Modell wird nach einer Sensitivitätsanalyse ein Evolutionsalgorithmus gestartet, um die Masse bei geringer Verformung zu minimieren. Das optimierte Modell soll bezüglich der mechanischen Eigenschaften und der Wärmedämmfähigkeit ausgewertet werden.

2 Material und Methode

2.1 Geometrie und Konstruktion

Das fraktale Waben-VIP soll quadratisch sein, bei einer Kantenlänge von 50 cm und einer Höhe von 2 cm. Mit der FEM Software Ansys Workbench 14.5.7 (Ansys Inc., Canonsburg, USA) wird mit dem internen CAD-Modeler ein Volumenmodell konstruiert.

Dazu wird mit Schwerpunkt im Ursprung des Koordinatensystems zunächst eine hexagonale Wabe W_0 über den Durchmesser erzeugt, mit einer Wandstärke versehen und in die Höhe extrudiert. Innerhalb dieser Wabe wird nun die kleinere, fraktale Wabe W_1 erstellt. W_1 ist um 30° zu der umgebenden Wabe W_0 gedreht, sodass die Ecken orthogonal auf die Mitten der Kanten von W_0 zeigen (Abbildung 2.1). Der Durchmesser von W_1 (D_{W1}) ist abhängig vom Durchmesser von W_0 (D_{W0}) und kann durch Gleichung 2.1.1 beschrieben werden:

$$D_{w1} = \frac{0,25 \cdot D_{w0}}{\cos 30^\circ} = \frac{0,25 \cdot D_{w0}}{\sqrt{0,75}} \quad 2.1.1$$

Ausgehend von den Ecken von W_1 werden Stege zu den Mitten der Kanten von W_0 konstruiert, sodass diese orthogonal mit den Kanten von W_0 verbunden sind (Abbildung 2.1). Die Stege gehören zu W_1 , haben entsprechend die gleiche Wandstärke wie W_1 und werden in die gleiche Höhe extrudiert. Es wird ein flächiges Muster mit beiden Waben erzeugt, sodass alle W_0 mit den Außenseiten der Wände verbunden sind. Aufgrund der durch die Gleichung 2.1.1 definierten Wabendurchmesser von W_1 entsteht über den Kontakt von drei W_0 der Mittelpunkt einer weiteren W_1 , die über die orthogonalen Stege und die Wände der angrenzenden W_1 erzeugt wird (Abbildung 2.1).

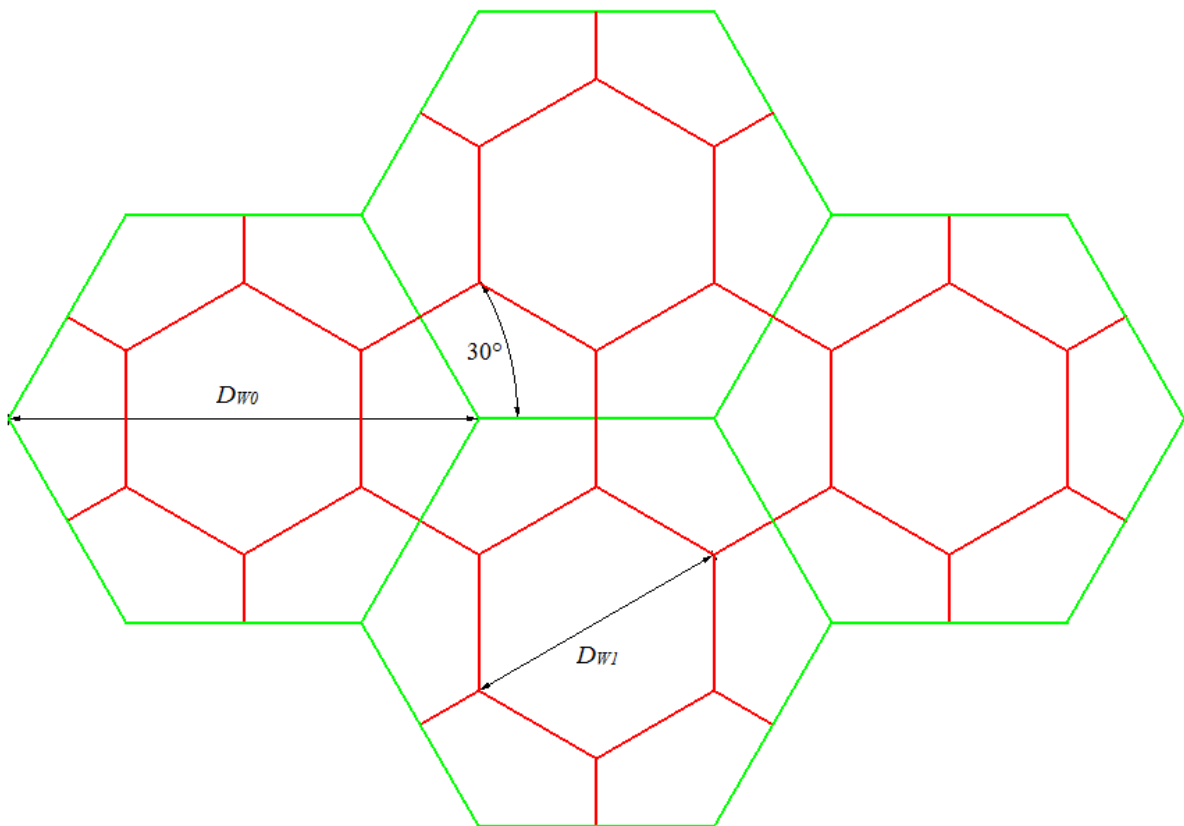


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Wabenmusters. Die großen Waben W_0 sind in grün und die 30° gedrehten fraktalen Waben W_1 in rot dargestellt. An den Schnittpunkten von drei großen Waben W_0 ist der Mittelpunkt einer weiteren fraktalen Wabe W_1 , die durch die Wände und Stege der W_1 der angrenzenden W_0 erzeugt wird.

Es wird unterhalb des Wabenmusters eine Grundplatte (mit Mittelpunkt im Ursprung) mit den Maßen 50 cm x 50 cm erzeugt. Diese wird 2 mm in die Tiefe extrudiert. Auf den Kanten der Grundplatte werden die Seitenwände mit einer Stärke von 2 mm erstellt. Die Seitenwände haben die gleiche Höhe wie die W_0 . Das Wabenmuster wird nun auf das Maß des oberen lin-

ken Viertels der Grundplatte zugeschnitten. Dies ist durch die Symmetrie der Platte, des Wabenmusters und die gleichverteilten Flächenlasten sinnvoll und vereinfacht die Vernetzung und Berechnungszeit bei gleichwertigen Ergebnissen. Auf Höhe der W_0 wird der erstellte Körper gespiegelt, sodass ein Viertel einer Waben-Sandwichplatte entsteht, mit durchgängigen W_0 , Seitenwänden und zwei Grundplatten.

2.2 Konstruktionswerkstoff

Die Wahl des Werkstoffs des Vakuum Isolationspaneels ist abhängig von den Anforderungen an das Produkt:

1. Das Produkt soll Wärme dämmen, der Werkstoff darf deswegen nur eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben. Eine hohe spezifische Wärmekapazität ist wünschenswert, da dann mehr Energie zum Erwärmen des Werkstoffs nötig ist, so also der Wärmedurchgang nochmals verlangsamt wird.
2. Die Grundplatten sollen sich trotz des hohen vakuumbedingten Drucks nicht stark verformen und nicht versagen. Der Werkstoff soll also hohe Spannungen bei wenig Verformung (Dehnung) aufnehmen können. Ein hohes E-Modul und außerdem eine hohe maximale Zugspannung (die Spannung beim Versagen) sind hier erforderlich.
3. Das Produkt soll transparent und beständig gegenüber UV-Licht sein. Der Werkstoff muss witterungsbeständig und gleichzeitig durchlässig für das sichtbare Licht sein.
4. Um dem ökonomischen Leichtbauaspekt gerecht zu werden, sollte der Werkstoff eine geringe Dichte besitzen. Dadurch lässt sich ein geringes Endgewicht des Produktes bewirken, wodurch Transport mit weniger Treibstoffverbrauch und eine geringere Last durch das Eigengewicht der VIPs auf dem tragenden Rahmen des Gewächshauses möglich wird.

Aufgrund der Anforderungen soll aus Metallen, Gläsern und Kunststoffen ein geeigneter Konstruktionswerkstoff gewählt werden.

Während Metalle generell hohe E-Module haben (Aluminium 71 GPa und Eisen 210 GPa), sind sie durch ihre Metallbindungen mit den freien Elektronen gute Wärmeleiter (Wärmeleitfähigkeit von Aluminium = $226 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und Eisen = $73,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Zudem sind Metalle nicht durchlässig für Licht (Hornbogen und Warlimont, 2006).

Glas ist bekanntermaßen meist transparent und somit lichtdurchlässig. Kalk-Natron-Glas hat eine Wärmeleitfähigkeit von $1,05 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (BauNetz Media GmbH, 2013) und ist damit ein deutlich schlechterer Wärmeleiter als Metall. Das E-Modul fällt mit 70 GPa recht hoch aus (ähnlich wie Aluminium), jedoch ist Glas mit einer Dichte von 2500 kg m^{-3} relativ schwer und für Leichtbau nicht zu empfehlen (BauNetz Media GmbH, 2013).

Es gibt eine Vielzahl von Kunststoffen mit unterschiedlichsten Eigenschaften. Für das Wa-
ben-VIP sollen zunächst transparente, also amorphe Kunststoffe verglichen werden. Polysty-
rol (PS), hartes Polyvinylchlorid (PVC-U) und Polymethylmethacrylat (PMMA) werden in
Tabelle 2.1 zum Vergleich gegenübergestellt.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von transparenten Kunststoffen (verändert nach Baur *et al.*, 2006).

	Dichte g cm^{-3}	Zug-E- Modul GPa	Zugfestigkeit N mm^{-2}	Wärmeleitfähigkeit $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
PS	1,05	3,2	45 – 65	0,18	1,3
PVC-U	1,38 - 1,55	1 – 3,5	50 – 75	0,14 – 0,17	0,85 – 0,9
PMMA	1,17 - 1,20	1,6 – 3,6	50 – 77	0,18	1,47

Positiv an den Kunststoffen ist zunächst die sehr geringe Dichte, die ein geringes Endgewicht des Produktes ermöglicht. Die Wärmeleitfähigkeit ist wünschenswert gering und nahe dem Bereich von Mineralwollen. PS kommt in expandierter Form in heutigen Wärmedämmschichten als Dämmstoff vor und hat bei einer geringen Dichte von $0,015 \text{ g cm}^{-3}$ eine Wärmeleitfähigkeit von $0,37 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Baur *et al.*, 2006). Leider sind expandierte PS, wie z.B. Polystyrol nicht transparent und haben eine sehr geringe Festigkeit. Die E-Module sind für alle drei Kunststoffe der Tabelle 2.1 im Bereich von 3 GPa und somit viel kleiner als die von Gläsern und Metallen. Hier muss über die Größe und Wandstärke der Waben die Verformung und Spannung auf den Grundplatten des VIP möglichst gleichmäßig verteilt werden. Die höchsten Zugfestigkeiten reichen von 65 N mm^{-2} bei PS bis zu 77 N mm^{-2} bei PMMA. PVC-U hat die geringste Wärmeleitfähigkeit, aber dafür auch die geringste Wärmekapazität, lässt sich also am schnellsten erwärmen. Zudem ist es mit Dichten ab $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ am schwersten. Zusätzlich ist Witterungsbeständigkeit von PVC-U nur durchschnittlich (Baur *et al.*, 2006), daher soll es nicht verwendet werden. PS hat eine geringere Dichte als PMMA, es fällt aber aus der Auswahl, denn ohne Zusatzstoffe wie Ruß ist es nicht UV-beständig. Wenn PS der Witterung ausgesetzt ist, verändern sich Farbe und mechanische Eigenschaften (Moeller, 2008).

PMMA setzt sich gegen die anderen Kunststoffe durch, da es hohe Festigkeit, Steifigkeit und gute Isolationsfähigkeit bei guter Witterungsbeständigkeit und relativ geringer Dichte aufweist (Moeller, 2008). Durch die hohe optische Transparenz und einen niedrigen Brechungsindex (bei 20 °C: PMMA = 1,49, Flintglas = 1,53 bis 1,59) ist es ein hervorragender Glaserersatz mit glasklarer Lichtdurchlässigkeit. Der dauerhafte Einsatztemperaturbereich reicht von minimal -40 °C bis zu maximal 65 - 90 °C und deckt damit die realistischen, mitteleuropäischen Temperaturschwankungen ab (Baur *et al.*, 2006). PMMA kann spritzgegossen oder extrudiert werden. Das Schweißen ist mit Warmgas, Hochfrequenz und Ultraschall möglich. Das Verkleben kann mit Epoxidharz-, Polyurethan- und Cyanacrylat-Klebstoffen realisiert werden (Moeller, 2008).

Im Folgenden wird eine PMMA Sorte ausgewählt und mit den für die Berechnungen wichtigen Kennwerten aufgeführt.

2.2.1 PMMA: Plexiglas® XT

Plexiglas® XT ist der Produktname für extrudiertes PMMA, das von der Evonik Industries AG vertrieben wird. Es wird u.a. genutzt, um Massivplatten mit 1,5 bis 25 mm Dicke oder Stegplatten zu erzeugen (Evonik Industries AG, 2013). Die für das Waben-VIP berücksichtigten Eigenschaften werden in Tabelle 2.2 bis Tabelle 2.4 aufgelistet:

Tabelle 2.2: Mechanische Eigenschaften von Plexiglas® XT (verändert nach Evonik Industries AG, 2013).

Mechanische Eigenschaften	
Rohdichte	1,19 g cm ⁻³
Zugfestigkeit (23 °C)	72 MPa
Elastizitätsmodul	3300 MPa
Poissonzahl	0,37

Tabelle 2.3: Thermische Eigenschaften von Plexiglas® XT (verändert nach Evonik Industries AG, 2013).

Thermische Eigenschaften	
Wärmeleitfähigkeit	0,19 W m ⁻¹ K ⁻¹
Spezifische Wärme	1,47 J g ⁻¹ K ⁻¹
Max. Dauergebrauchstemperatur	70 °C
Zündtemperatur	430 °C
Rauchgasmenge	sehr gering
Rauchgastoxizität	Keine

Tabelle 2.4: Optische Eigenschaften von Plexiglas® XT (verändert nach Evonik Industries AG, 2013).

Optische Eigenschaften	
UV-Durchlässigkeit	Ja
Absorption im sichtbaren Bereich	< 0,05 %
Brechzahl n	1,491

2.3 Finite Elemente Analyse

2.3.1 Physikalisches Modell

Die in 2.1 genannte Geometrie wurde mit Tetraeder-Elementen mit vier Eckknoten und sechs Kantenmittenknoten vernetzt (Abbildung 2.2). Mit diesen Elementen ist eine sichere, automatische Vernetzbarkeit der Geometrie möglich, was für die Optimierung essentiell ist. Durch die Mittenknoten ist eine quadratische Ansatzfunktion für die Knotenverschiebung innerhalb eines Elements gegeben (Klein, 2012), wodurch die Plattenbiegung auch mit einer einzigen Elementschicht dargestellt werden konnte. Für das Modell lagen statische Belastungen vor, sodass nur ein Zeitschritt berechnet werden musste. Zur Überprüfung des Modells wurde eine Validierung (siehe 2.3.5) durchgeführt.

Abhängig von den Eingabeparametern bestand das Netz aus 340.000 bis 460.000 Elementen. Die dünnsten Stellen der Geometrie (Grundplatte, Seitenwände und dünnste fraktale Waabenstege, je 2 mm) wurden mit nur einer Elementschicht aufgelöst (Abbildung 2.3).

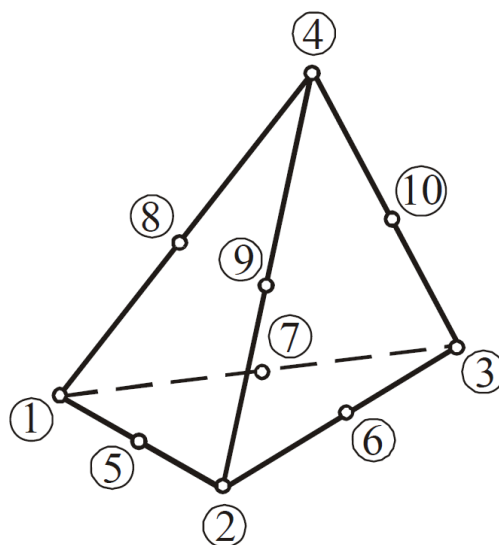


Abbildung 2.2: Tetraeder-Element mit 10 Knoten.

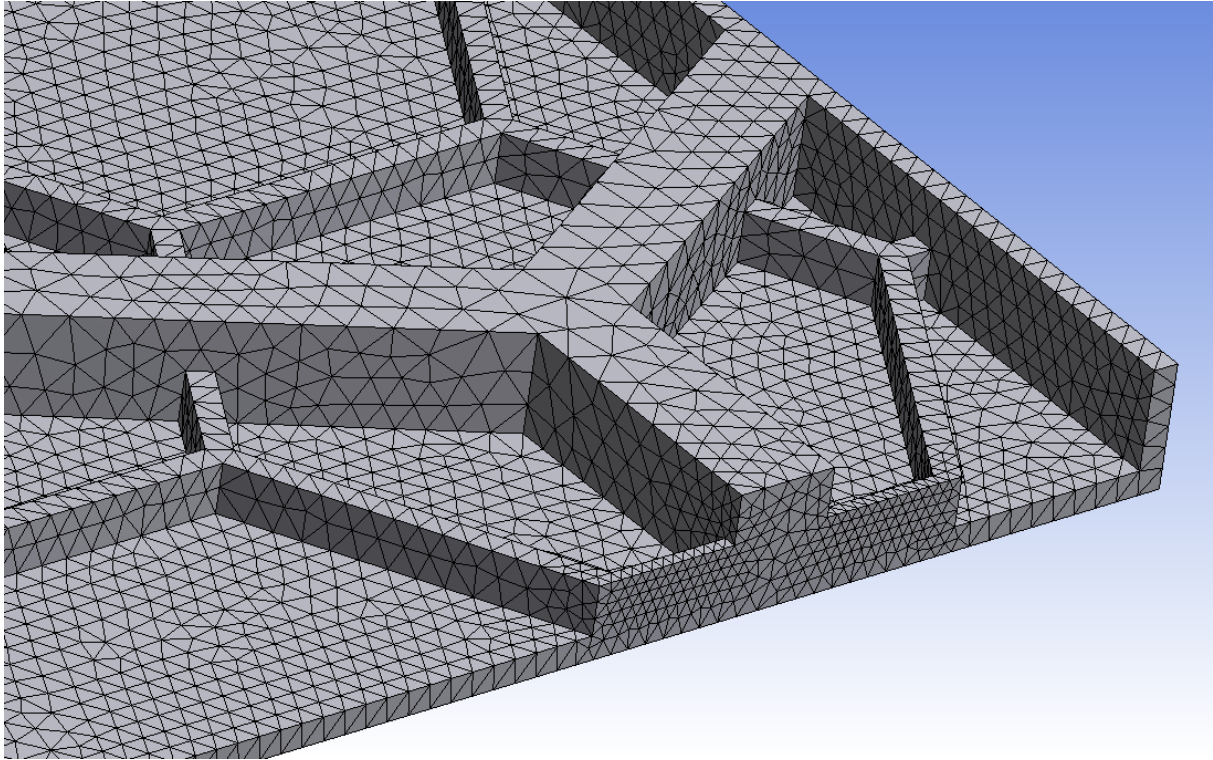


Abbildung 2.3: Ausschnitt der vernetzten Geometrie. Die fraktalen Wabenstege, die Grundplatte und die Seitenwände sind in der Dicke mit einer Elementschicht aufgelöst.

2.3.2 Lastfälle und Lagerung

Aus dem Anpassungsleitfaden für Einwirkungen auf Gewächshäuser von Puthli und Pertermann (2012) wurden die Schnee- und Windlasten entnommen (Tabelle 2.5), die Kulturgewächshäuser nach Norm tragen können müssen. Zusätzlich wird noch die Flächenlast des atmosphärischen Drucks durch das Vakuum angesetzt (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Lastfälle für das Modell

Lastfall	Belastung
Schnee	250 N m^{-2}
Wind	250 N m^{-2}
Atmosphärischer Druck (Vakuuminduziert)	101.325 N m^{-2}

Der Normaldruck beträgt auf Meereshöhe 101.325 Pa . Bei einem Hohlkörper, in dem ein ideales Vakuum (0 Pa) ohne Gasdruck durch Restmoleküle herrschen würde, wäre entsprechend auf jeder Körperfläche eine Flächenlast von $1.013,25 \text{ hPa}$ anzusetzen. Realistisch gesehen lässt sich kein perfektes Vakuum erzeugen, aber durch die konservative Annahme eines perfekten Vakuums im VIP wird der Sicherheitsfaktor des Panels erhöht. Das Vakuum muss durch die

ausbleibende feinporige Struktur und mittleren freien Weglängen im cm-Bereich ohnehin so stark wie möglich sein, um die Konvektion zu unterbinden (siehe 1.4 Vakuumisolationsspaneele Abbildung 1.3).

Wie bereits erwähnt greift die vakuuminduzierte Flächenlast auf jeder Fläche des Waben-VIP an. Die witterungsbedingten Flächenlasten von Schnee und Wind müssen nur in negativer z-Richtung orthogonal auf der Fläche der oberen Grundplatte angenommen werden. Bei der Platte lastet also auf den Seitenwänden und der inneren Grundplatte der atmosphärische Druck mit 101.325 N m^{-2} und auf der unteren Grundplatte der atmosphärische Druck zusätzlich zu Wind- und Schneelast (Abbildung 2.4).

Das VIP soll gelenkig gelagert an allen Kanten eingespannt werden. Dazu muss auf halber Höhe der Seitenwände eine fixierte Lagerung angenommen werden (Abbildung 2.4). Aufgrund der Geometrie der Platte und der gleichmäßigen Flächenlast wurde das Plattenmodell geviertelt (siehe 2.1). Dazu müssen orthogonal zu den Schnittflächen Symmetriebedingungen festgelegt werden. Ist z.B. die Symmetriebedingung in x-Richtung definiert, so ist die Translation in diese Richtung für die Volumenelemente unterbunden. Durch das Vierteln der Geometrie wird die Vernetzung und Berechnung des Modells vereinfacht.

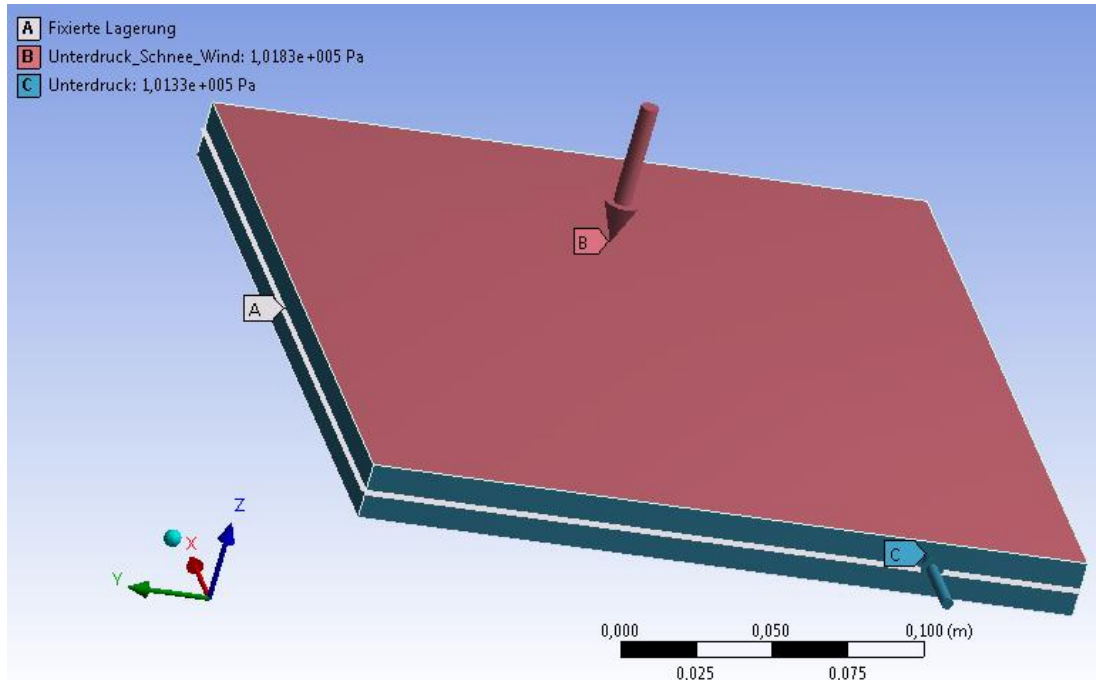


Abbildung 2.4: Zu sehen ist ein Viertel des Waben-VIP mit den Lasten und der Lagerung. Rot (B) ist die größte, nur auf einer Grundplatte wirkende Flächenlast bestehend aus Schnee-, Wind- und der atmosphärischen Last mit einer Summe von $1.018,25 \text{ hPa}$ (in der Abbildung gerundet). Blau (C) ist die Flächenlast durch atmosphärischen Druck mit $1.013,25 \text{ hPa}$ (in der Abbildung gerundet), die auf den Seitenwänden und der unteren Grundplatte (hier nicht sichtbar) wirkt. In grau (A) ist die fixierte Lagerung dargestellt, durch die eine gelenkige Lagerung des VIP ermöglicht wird. Gegenüberliegend zu den Seitenwänden befinden sich die Schnittflächen, die mit Symmetriebedingungen versehen wurden.

2.3.3 Lösungsansatz

Die Diskretisierung der Geometrie sowie die Lösung des Gleichungssystems mit dem Solver PCG erfolgten mit der Software Ansys Workbench 14.5.7 (Ansys Inc., Canonsburg, USA).

2.3.4 Gitterstudie

Zur Bestimmung der nötigen und auch erstellbaren Auflösung des Netzes für das Volumenmodell wurde eine Gitterstudie durchgeführt. Dafür wurde die Verformung für das Viertel des Waben-VIP mit steigender Elementanzahl mit den in Abbildung 2.4 gezeigten Lasten und Lagerungen berechnet. Bei Modellen mit weniger als 300.000 Elementen kam es zu verzerrten, fehlerhaften Elementen in den Übergängen zwischen fraktalen und normalen Waben, sodass diese Netzauflösung nicht verwendet werden konnte. Bei mehr als 1.000.000 Elementen wurde der sechs Gigabyte große Arbeitsspeicher des Computers derart überlastet, dass die Netzerstellung und besonders die Rechnung in keiner vertretbaren Zeit möglich waren. Deshalb wurden vier Modelle mit steigender Elementanzahl zwischen 300.000 und 800.000 getestet. Zur Auswertung wurde die relative Verformung bezogen auf die kleinste Gitterauflösung über die Elementanzahl aufgetragen (Abbildung 2.5). Da sich die Verformung bei größerer Elementanzahl verbunden mit deutlich längerer Vernetzungs- und Berechnungszeit nur marginal ($< 1\%$) verändert, soll mit einem Netz von 400.000 Elementen aufgelöst werden. Dadurch ist bei den Geometrieänderungen während der Optimierung, die eine etwas geringere Elementanzahl verursachen können, ein genügender Puffer zu der nicht funktionierenden Auflösung mit weniger als 300.000 Elementen gegeben.

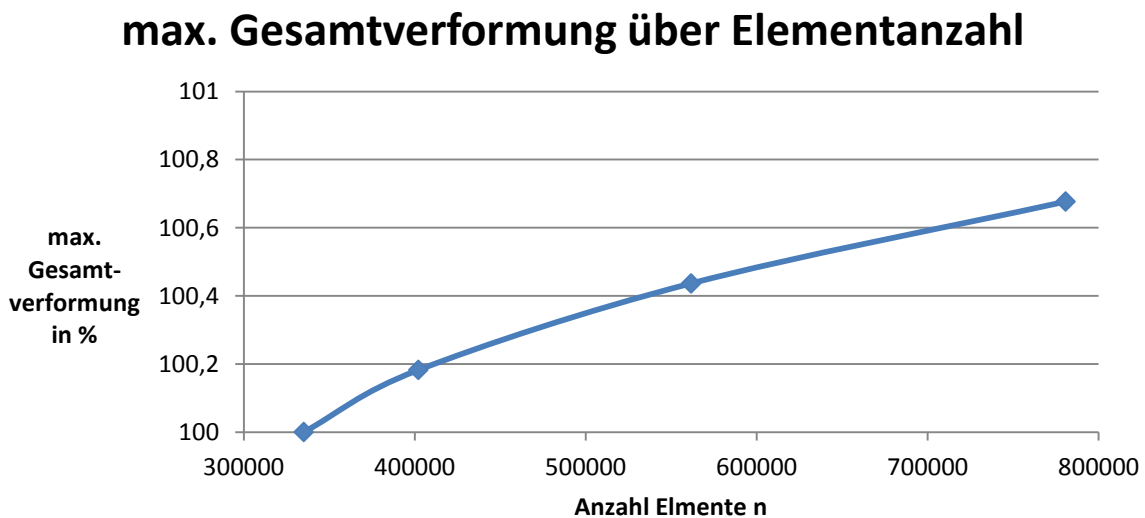


Abbildung 2.5: Gezeigt ist die relative maximale Gesamtverformung bezogen auf die kleinste Elementanzahl. Trotz Verdoppelung der Elemente bleibt die Verformungszunahme unter 1 %.

2.3.5 Validierung

Um sicherzustellen, dass das FE-Modell plausibel ist, wird über die maximale Verformung validiert. Dazu wird das für eine analytische Rechnung zu komplex aufgebaute Waben-VIP zu einer quadratischen Platte mit gleichbleibenden Bemaßungen vereinfacht. Die Platte ist an jeder Kante gelenkig gelagert eingespannt und flächig mit der Schnee- und Windlast auf einer Grundplatte belastet. Die Lasten durch den atmosphärischen Druck werden hier vernachlässigt, da sie normal auf jede Fläche wirken und zu keiner Durchbiegung der vereinfachten Platte führen. Für die Validierung werden vier Modelle berechnet:

1. Analytische Berechnung für die maximale Durchbiegung W_{\max} einer allseits gelenkig gelagerten Rechteckplatte unter Gleichlast mit Formeln der Kirchhoffschen Plattentheorie nach Mathiak (2008)
2. Numerische Berechnung der maximalen Gesamtverformung mit Schalenmodell einer allseits gelenkig gelagerten Platte unter Gleichlast
3. Numerische Berechnung der maximalen Gesamtverformung mit Tetraeder-Volumenmodell einer allseits gelenkig gelagerten Platte unter Gleichlast
4. Numerische Berechnung der maximalen Gesamtverformung mit Tetraeder-Volumenmodell eines Viertels einer allseits gelenkig gelagerten Platte unter Gleichlast

Für alle numerischen Modelle wird ein Netz mit einer Elementgröße von 0,005 m erzeugt. Für die Berechnungen werden folgende Bemaßungen, Belastung und Materialkennwerte angenommen:

Tabelle 2.6: Werte der Variablen für die analytische Berechnungen des Validierungsmodells

Variable	Symbol	Wert
Kantenlänge	a	0,5 m
Höhe	h	0,02 m
Druck	p_0	500 N m ⁻²
E-Modul	E	3,3·10 ⁹ N m ⁻²
Querkontraktionszahl	ν	0,3

Für die analytische Berechnung nach Mathiak (2008) muss zunächst die Plattensteifigkeit N mit Gleichung 2.3.1 bestimmt werden:

$$N = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}. \quad 2.3.1$$

Die Plattensteifigkeit kann anschließend in Gleichung 2.3.2 zur Berechnung der maximalen Durchbiegung W_{max} einer quadratischen allseits gelenkig gelagerten Rechteckplatte zur Lösung eingesetzt werden:

$$W_{max} = \frac{1}{246,16} \frac{p_0 a^4}{N}. \quad 2.3.2$$

Mit einer Plattensteifigkeit N von $2548,951454 \text{ N m}^{-1}$ ergibt sich für die maximale Durchbiegung W_{max} $4,98048 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

Die numerischen Berechnungen ergaben für das Schalenmodell eine maximale Verformung in Plattenmitte (Durchbiegung) von $5,17555 \cdot 10^{-5} \text{ m}$. Für das Volumenmodell wurden $5,17343 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ ermittelt und für das Viertel des Volumenmodells mit Symmetriebedingungen wurden $5,1772 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ errechnet.

Die Durchbiegung des geviertelten Volumenmodells hat nur 0,07 % Abweichung vom vollständigen Volumenmodell und kann daher für die Optimierung genutzt werden. Nach Mathiak (2008) gelten die Gleichungen der Plattentheorie für Platten, die ein dünnes ebenes Flächentragwerk sind. Dabei ist die Plattenhöhe h klein gegenüber der Kantenlänge a . Bei den gewählten Abmessungen des Modells ergibt sich ein Verhältnis von h zu a mit 1:25. Dabei ist für das numerische Modell eine Abweichung von 3,95 % zu verzeichnen, mit der das Modell eine gute Näherung an den analytischen Wert liefert.

Durch die Validierung ist bewiesen, dass das numerische Volumenmodell korrekt aufgebaut ist und das mit einem Viertel der Platte als Volumenkörper mit Symmetriebedingungen durch nur geringe Abweichungen ein realistisches Ergebnis erreicht wird.

2.4 Optimierung

Für das validierte Modell soll nun mit den in Tabelle 2.7 genannten Parametern mit einem Evolutions-Algorithmus mit der Software optiSLang 4.0.6 (Dynardo GmbH, Weimar, Deutschland), die eine Schnittstelle zur Ansys Workbench hat, eine Optimierung zu minimaler Masse erreicht werden.

2.4.1 Eingabe- und Ausgabeparameter

Zunächst müssen die Eingabeparameter, mit denen das Modell variiert werden soll, mit der jeweils oberen und unteren Grenze definiert werden. Für den Evolutions-Algorithmus werden zudem Startwerte benötigt (Tabelle 2.7). Die Ausgabeparameter sind die Masse in kg, die Gesamtverformung in m und die Von-Mises-Vergleichsspannung in Pa.

Tabelle 2.7: Eingabeparameter des Modells mit Startwerten so den oberen und unteren Grenzen

Eingabeparameter	Untere Grenze	Startwert	Obere Grenze
Durchmesser W_0 in m	0,05	0,08	0,11
Dicke W_0 in m	0,001	0,003	0,005
Dicke W_l in m	0,002	0,003	0,005
Höhe W_l in m	0,002	0,004	0,006

2.4.2 Sensitivitätsanalyse mit DoE und MOP

Vor dem Start der Optimierung soll zuerst mit einer statistischen Versuchsplanung (DoE: Design of Experiments) der Einfluss der Eingabeparameter auf die Ausgabeparameter ermittelt werden (Dynardo GmbH, 2013). Dazu wird das ALHS (Advanced Latin Hypercube Sampling) mit 100 Proben gewählt, in denen die Eingabeparameter innerhalb der in Tabelle 2.7 definierten Grenzen variiert werden. Für die 100 Proben wurden die Ausgabeparameter in der Ansys Workbench berechnet. Durch die berechneten Ergebnispunkte der Proben kann mit dem sogenannten Metamodel of Optimal Prognosis (MOP) eine interpolierte Optimierungsfläche (Metamodel) erzeugt werden (Dynardo GmbH, 2013). Hier werden für diskrete Eingabeparameter interpolierte Ausgabeparameter ermittelt.

Bei der Optimierung werden dann durch den Evolutions-Algorithmus Punkte auf dieser Fläche abgerufen. Durch die Interpolierung entsteht ein Fehler in den Ausgabewerten. Deshalb wurde nach der MOP-basierten Optimierung das beste Design mit den entsprechenden Eingabeparametern in Ansys berechnet, um die exakten Ausgabewerte zu erhalten.

2.4.3 Evolutions-Algorithmus

Der Evolutions-Algorithmus (EA) in optiSLang ist, wie der Name andeutet, eine von der natürlichen Evolution inspirierte, stochastische Optimierungsmethode mit Anpassung, Selektion und Variation. Der EA in optiSLang benutzt dabei Elemente aus der Evolutionsstrategie und genetischem Algorithmus (Dynardo GmbH, 2013). Ausgehend von einer Startpopulation werden von Eltern durch Rekombination ihrer Eigenschaften (Eingabeparameter) Kinder mit neuen Eingabeparametern erzeugt. Durch zufällige Mutation kommt es zu weiteren Variationen der Eigenschaften der Kinder. Die Kinder selbst werden in einer neuen Population wieder zu Eltern und erzeugen wiederum Kinder. Das Optimierungsziel wird dabei durch Zwangsbedingungen (Selektion) erreicht, indem nicht angepasste (die Zwangsbedingung nicht erfüllende) Individuen für die nachfolgende Generation keine Nachkommen erzeugen.

Als Ziel der Optimierung wurde die Minimierung der Masse definiert. Die dabei einzuhalten- de Zwangsbedingung ist die maximale Verformung. Es soll keine Verformung von mehr als 20 % der Grundplattendicke entstehen. Bei einer Dicke von 2 mm entspricht das einer Verformungsgrenze von 0,4 mm. Die Von-Mises-Vergleichsspannung kann nicht als Zwangsbe- dingung angenommen werden, da Vorversuche gezeigt haben, dass die höchsten Werte in den Kerben bei den Übergängen zwischen den fraktalen und den durchgängigen Waben entstehen und die Spannungen im restlichen Modell nicht berücksichtigt werden. Da bei MOP- Abweichungen vom errechneten Ergebnis auftreten, soll die Grenze bei 0,35 mm angesetzt werden, um zunächst sicherzustellen, dass die 0,4 mm nicht überschritten werden.

Es wurde von einer Startpopulation mit 10 Individuen ausgegangen. Der EA in optiSLang ist so ausgelegt, dass die Anzahl der Eltern der Anzahl der Kinder entspricht, sodass in jeder Folgegeneration jeweils 10 Individuen waren. Die Optimierung endete, wenn nach einem er- reichten Optimum innerhalb von 10 Generationen kein besseres Ergebnis ermittelt wurde oder insgesamt 40 Generationen erreicht wurden (Dynardo GmbH, 2013).

Am Ende wird das optimale Design der Optimierung in Ansys nachgerechnet, um die exak- ten, nicht interpolierten Ausgabewerte zu erhalten.

2.5 Vergleichsrechnung ohne fraktale Waben

Um die erreichte Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch die fraktalen Waben gegenüber der Massenzunahme beurteilen zu können, wurde für gleiche Lastfälle ein Waben- VIP-Modell ohne die fraktalen W_1 -Waben erstellt. Die Eingabeparameter für die W_0 -Waben des besten Designs aus der Optimierung wurden für dieses neue Modell übernommen.

2.6 Berechnung der Wärmedämmfähigkeit

Mit den Gleichungen 1.2.10 und 1.2.11 wurde die Wärmedämmfähigkeit des optimierten Wa- ben-VIP errechnet. Dafür wurde ein Temperaturgradient von 15 °C angenommen (Außen- temperatur 10 °C und Innentemperatur 25 °C). Die Fläche A , über die Wärme geleitet wird, besteht aus den Querschnitten der Seitenwände und den durchgängigen Waben W_0 . Die Schichtdicke Δx entspricht der Höhe des Waben-VIP. Die entsprechenden thermischen Eigen- schaften wurden aus Tabelle 2.3 entnommen. Es wird angenommen, dass keine Wärmestrahlung und Konvektion wirkt.

3 Ergebnisse

3.1 Verlauf der Optimierung

Das beste Design, bei dem bei minimaler Masse keine Zwangsbedingungen verletzt wurden, konnte im 237. Optimierungsschritt (Blauer Punkt in Abbildung 3.1 und 3.2) ermittelt werden. Die Optimierung wurde dann nach 330 Schritten beendet, da nach 10 weiteren Generationen mit 100 Individuen kein neues Optimum erreicht werden konnte. Der Optimierungsverlauf bezüglich der Masse ist in Abbildung 3.1 gezeigt. In Abbildung 3.2 ist der Verlauf der Verformung sichtbar.

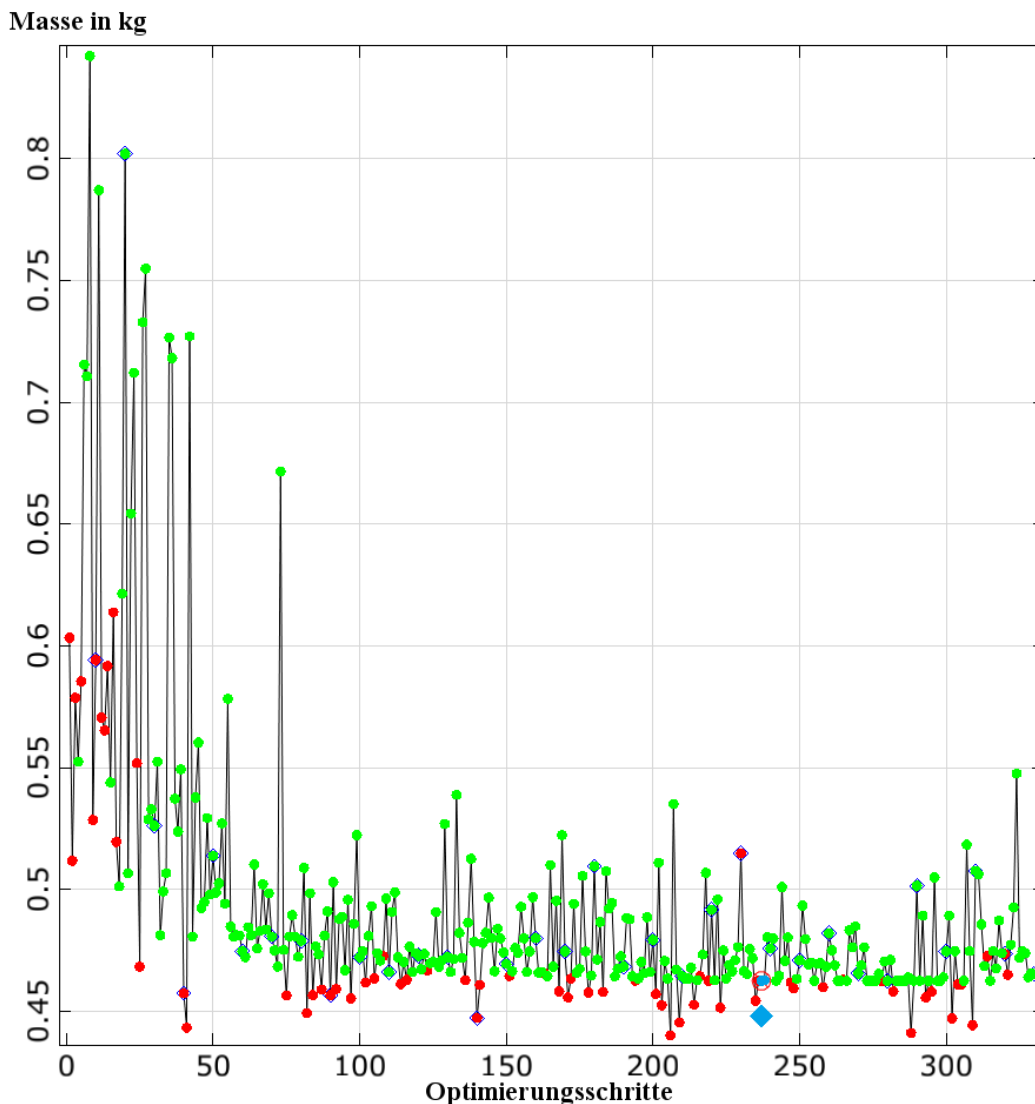


Abbildung 3.1: Gezeigt ist die Veränderung der Masse über den Optimierungsverlauf. Grüne Individuen erfüllen die Zwangsbedingung, während rote sie verletzen. Blaue Umrandungen stehen für eine neu gestartete Population. Das beste Design der Optimierung ist der blaue Punkt mit der roten Umrandung. Die blaue Raute gibt den nachträglich errechneten Wert des besten Designs an.

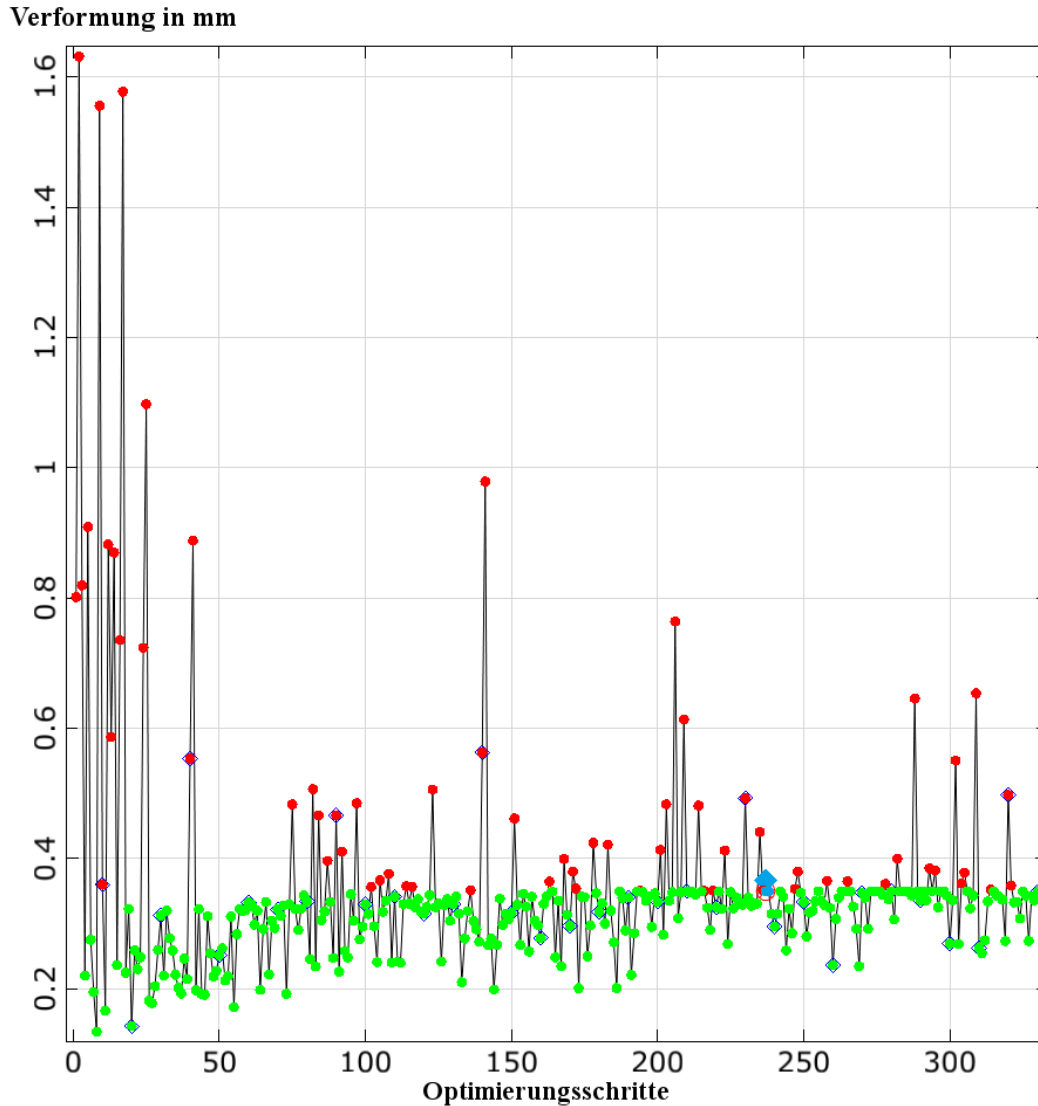


Abbildung 3.2: Gezeigt ist die Veränderung der Verformung über den Optimierungsverlauf. Die Bedeutung der Punktfarben ist identisch zu Abbildung 3.1 und dort beschrieben.

Sowohl der Massen- als auch der Verformungswert unterliegen am Anfang starken Schwankungen. Die Masse nähert sich ab der 100. Iteration einem Wert, der zwischen 0,46 und 0,47 kg liegt. Danach kommt es nur noch zu Abweichungen, die verglichen mit den Anfangsschwankungen klein sind. Nachdem das Optimum im 237. Schritt erreicht wurde, zeigen die folgenden Werte bis zur 300. Iteration eine starke Annäherung an den optimalen Wert. Danach kommt es wieder zu stärkerer Varianz der Masse. Individuen mit höherer Masse erfüllen oft die Zwangsbedingung, während sie bei kleineren Massen unterhalb des Optimums verletzt ist. Bei der Verformung, die als Zwangsbedingung funktioniert, nähern sich die grünen Werte nach der 50. Iteration schwankend der definierten Grenze bei 0,35 mm an. Individuen mit größerer Verformung erfüllen die Zwangsbedingung nicht. Der berechnete Wert des optimalen Designs ist für die Masse 3,2 % kleiner und für die Verformung 4,7 % größer (Abbildung 3.3). Tabelle 3.1 zeigt die Eingabeparameter für die beste Geometrie (Abbildung 3.4).

Ergebnisse

Tabelle 3.1: Eingabeparameter für das beste Design aus der Optimierung

	Durchmesser W_0	Dicke W_0	Dicke W_I	Höhe W_I
Obere Grenze	0,05 m	0,001 m	0,002 m	0,002 m
Ergebnis EA	0,072 m	0,001 m	0,002 m	0,0038 m
Untere Grenze	0,11 m	0,005 m	0,005 m	0,006 m

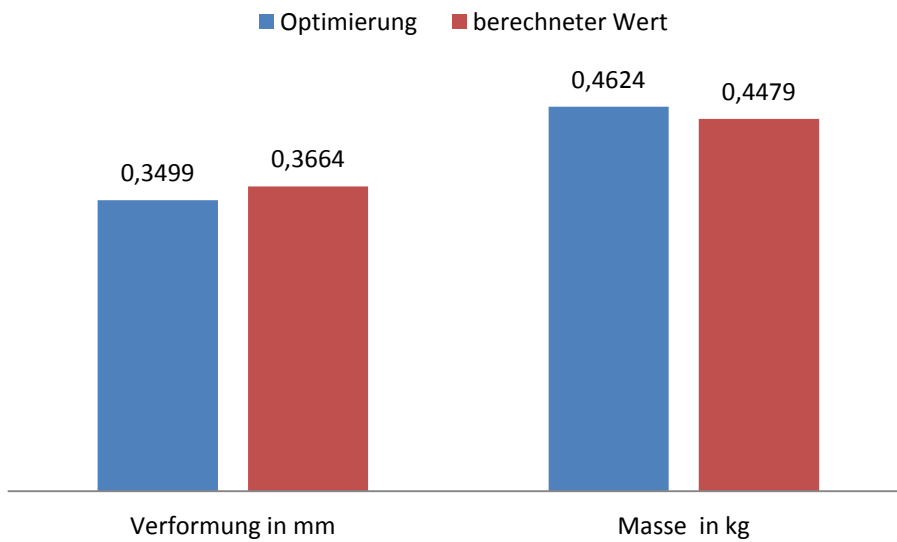


Abbildung 3.3: Die berechnete Verformung des besten Designs ist 4,7 % größer, während die berechnete Masse 3,2 % kleiner ist.

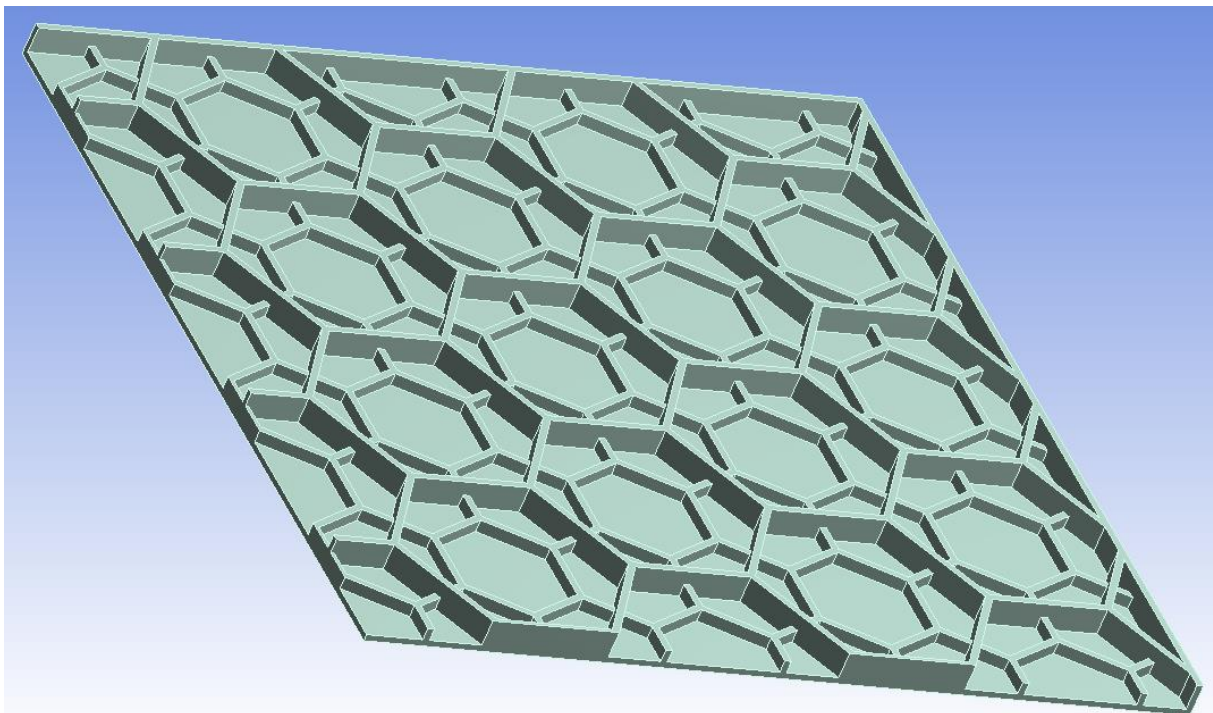


Abbildung 3.4: Zu sehen ist die durch den EA ermittelte optimale Wabenstruktur für das Waben-VIP.

3.2 Parameteranalyse

Durch die Sensitivitätsanalyse wurde der relative Einfluss der Eingabeparameter auf die Ausgabeparameter ermittelt (Abbildung 3.5).

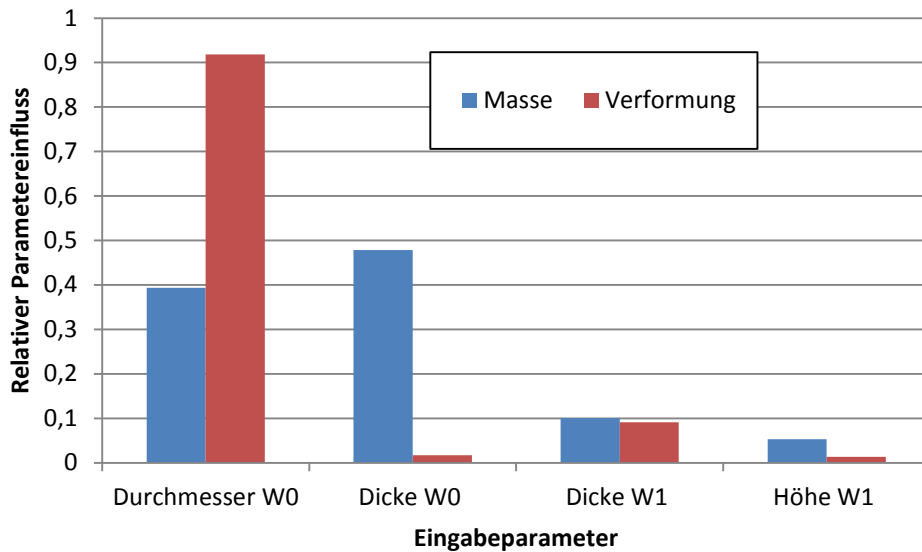


Abbildung 3.5: Relativer Einfluss der Eingabeparameter auf die Ausgabeparameter Masse und Verformung.

Der Durchmesser W_0 hat den größten Einfluss auf die Verformung und den zweitgrößten Einfluss auf die Masse. Die Dicke W_0 ist am bedeutendsten für die Masse, ist aber nicht wichtig für die Verformung. Die Dicke W_1 wirkt sich geringfügig auf die Masse und Verformung aus, während die Höhe W_1 nur einen kleinen Beitrag zur Masse leistet.

3.3 Mechanische Eigenschaften im Vergleich

Im folgenden Abschnitt werden die Von-Mises-Vergleichsspannungen und die Verformungen von dem optimalen fraktalen Wabendesign mit dem gleichen Design ohne fraktale Ebenen durch Stichproben verglichen. Die Modelle sind dabei als oberes linkes Viertel des VIP dargestellt. Es wird jeweils die äußere Grundplatte als Übersichtsabbildung und eine Detailansicht der inneren Wabenstruktur gezeigt. In den jeweiligen Abbildungen wirkt die höchste Flächenlast aus Schnee, Wind und atmosphärischem Druck auf die Grundplatte. Durch das Fehlen der fraktalen Ebene wiegt das nicht fraktale Design 0,391 kg und spart dadurch 0,057 kg (12,7 %) gegenüber dem Design aus der Optimierung.

3.3.1 Von-Mises-Vergleichsspannung mit fraktalen Waben

Die Spannungen auf der Grundplatte des fraktalen Waben-VIP sind gleichmäßig verteilt und liegen für die Stichproben im Bereich von 1,56 bis 8,24 MPa (Abbildung 3.6). Die Bereiche in denen höhere Spannungen auftreten, sind die nicht gestützten Mitten der Waben (7,86 MPa) und die Kontakte der fraktalen Wabenstege mit den durchgängigen Waben (8,24 MPa). Die geringsten Spannungen treten dort auf, wo drei Stege der durchgängigen Waben aufeinandertreffen (1,56 MPa).

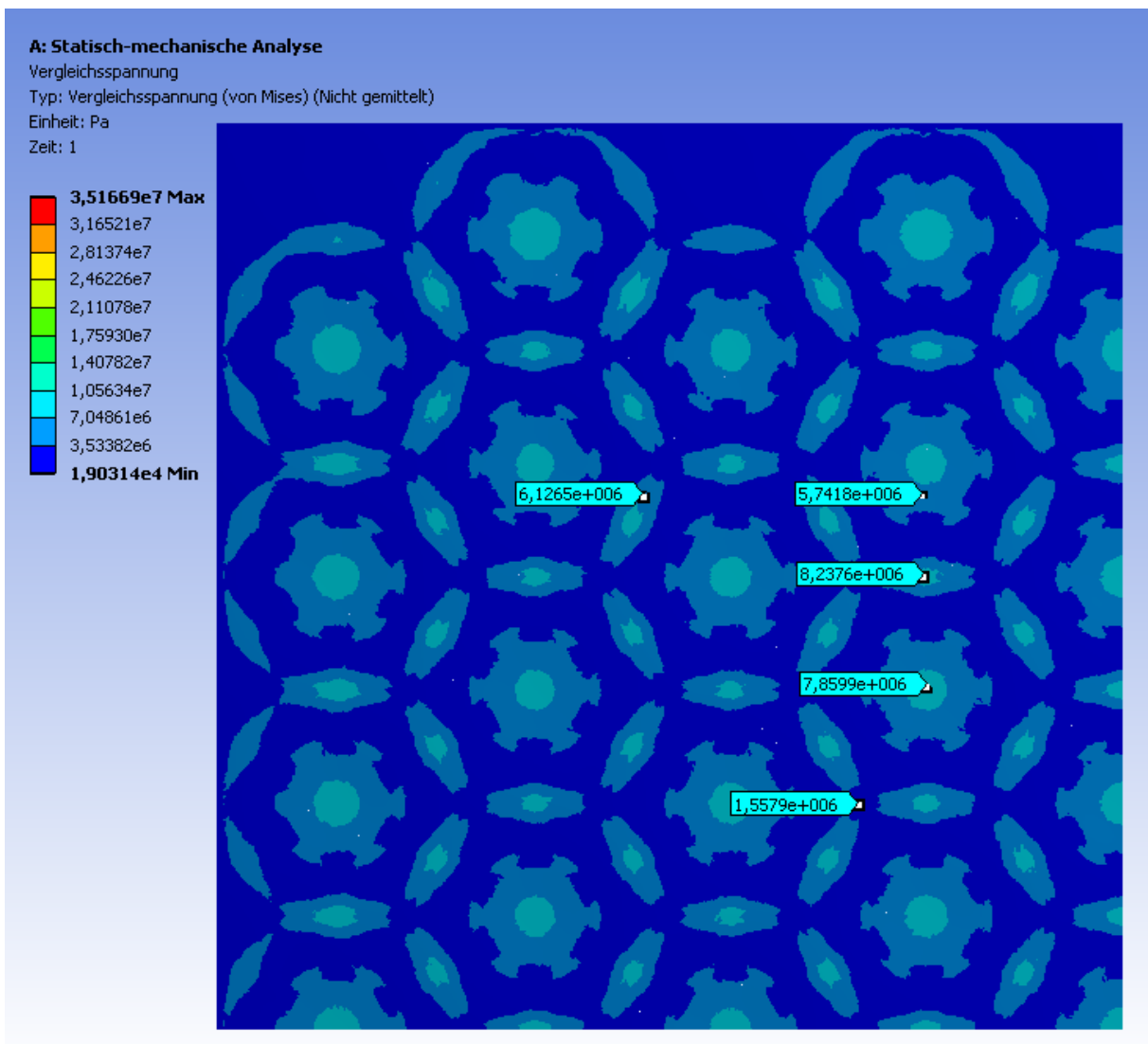


Abbildung 3.6: Die Spannungen auf der Grundplatte des fraktalen Waben-VIP sind gleichmäßig verteilt. Größte Werte sind in den Wabenmitten und den Übergängen von fraktalen zu durchgängigen Waben zu sehen.

Ergebnisse

Bei Betrachtung der Spannungen innerhalb der Wabenstruktur (Abbildung 3.7) ist zu erkennen, dass die Spannungsspitzen in den Kerben zwischen fraktalen Stegen und durchgängigen Waben liegen (21,19 und 21,95 MPa). Der Maximalwert mit 35,17 MPa ist in einer Kerbe der Schnittebene des Modells zu sehen. Die Spannungen innerhalb einer durchgehenden Wabe sind mit Werten bei 1,03 MPa am geringsten. Abgesehen von den Kerbspannungen sind die Spannungen auf den Stegen der fraktalen Waben (7,32 MPa) und in der Wabenmitte (6 MPa) am größten.

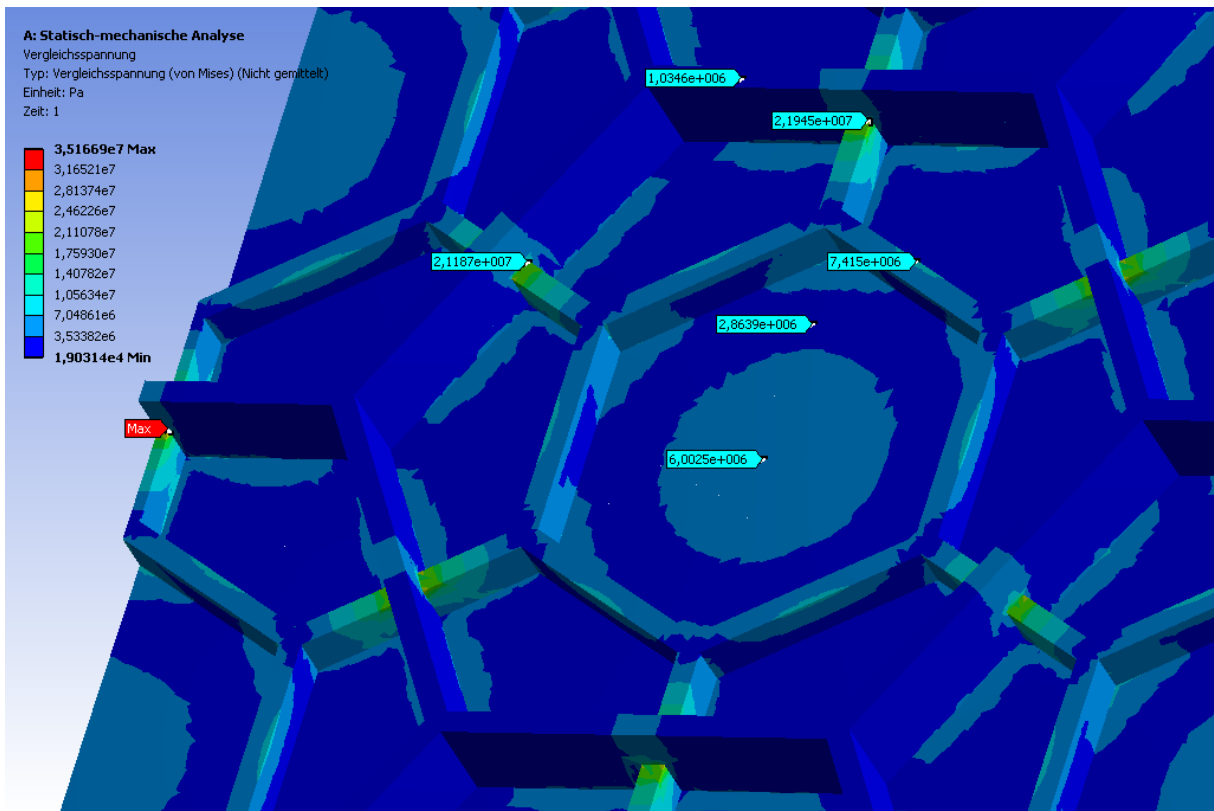


Abbildung 3.7: Detailaufnahme der Spannungen innerhalb der Wabenstruktur. Spannungsspitzen (grün und gelbe Bereiche) treten in den Kerben zwischen fraktalen Ebenen und durchgängigen Waben auf.

3.3.2 Von-Mises-Vergleichsspannung ohne fraktale Waben

Die Spannungen, die ohne fraktale Wabenebene entstehen, sind deutlich größer und liegen für die gewählten Stichproben in der Grundplatte zwischen 2,45 und 16,89 MPa (Abbildung 3.8). Dabei sind hohe Spannungen (13,56 MPa) in den Wabenmitten und die höchste Spannung (16,89 MPa) in den Übergängen zwischen Grundplatte zu Wabenstegen zu sehen. Die geringste Spannung liegt in den Schnittpunkten von drei Wabenwänden mit 2,45 MPa. Die höchste Spannung im gesamten Modell mit 36,71 MPa liegt in einer der Übergangskerben zwischen Wabensteg und Grundplatte. Da ein verzerrtes Element die hohe Spannung hervorruft wird sie nicht in der Abbildung gezeigt.

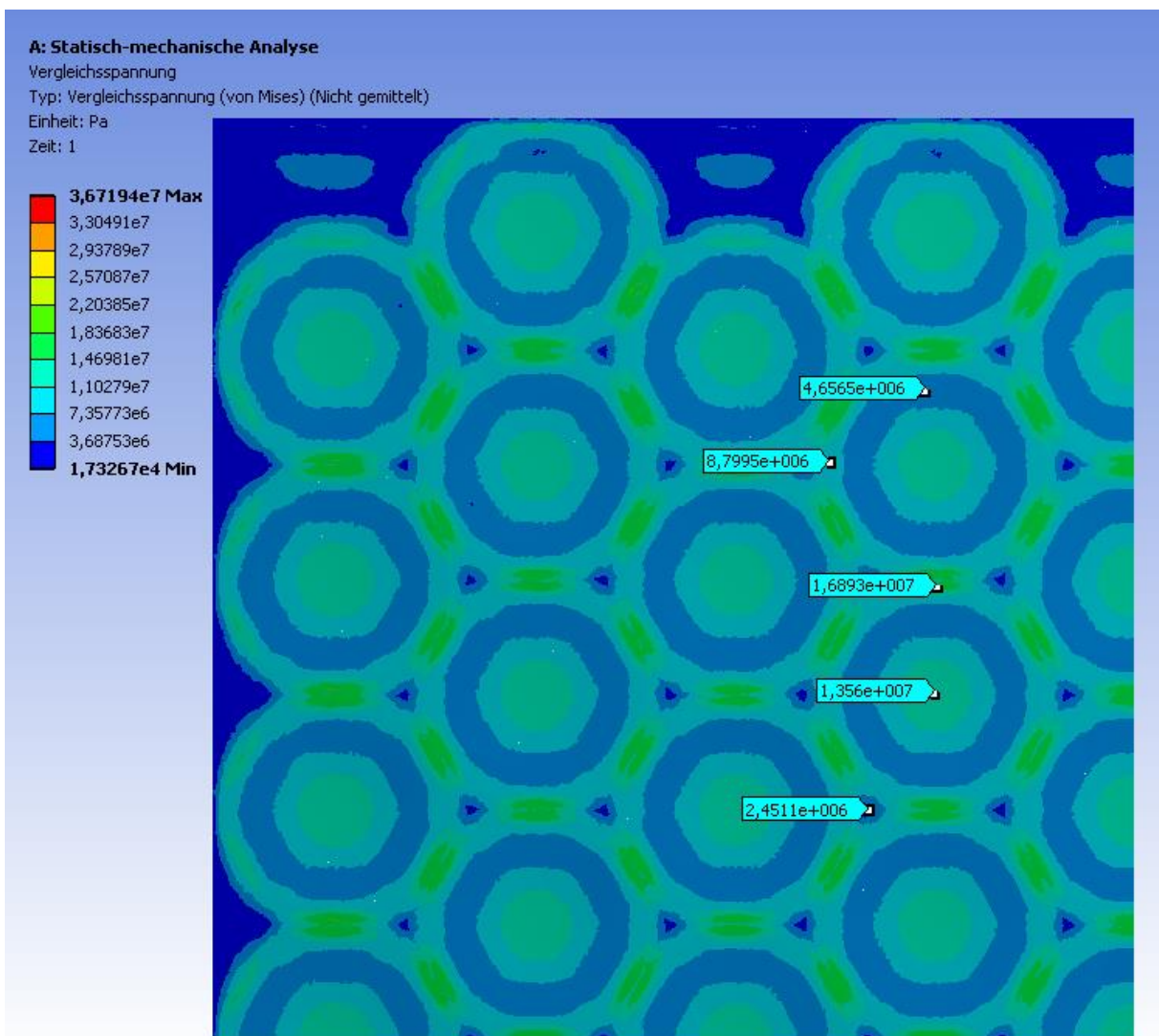


Abbildung 3.8: Übersicht der Spannungen in der Grundplatte bei dem Modell ohne fraktale Waben.

Ergebnisse

Auch für die Detailbetrachtung (Abbildung 3.9) der nicht fraktalen Wabenebene ist die höchste Spannung (18,18 MPa) großflächig an einer Kerbe zu finden, wo die Wabe auf die Grundplatte auftrifft. In der Wabenmitte liegt eine Spannung von 12,77 MPa vor. Vom Wabenmittelpunkt ausgehend verringert sich die Spannung in der Grundplatte bis sie kurz vor den Kerben wieder größer wird.

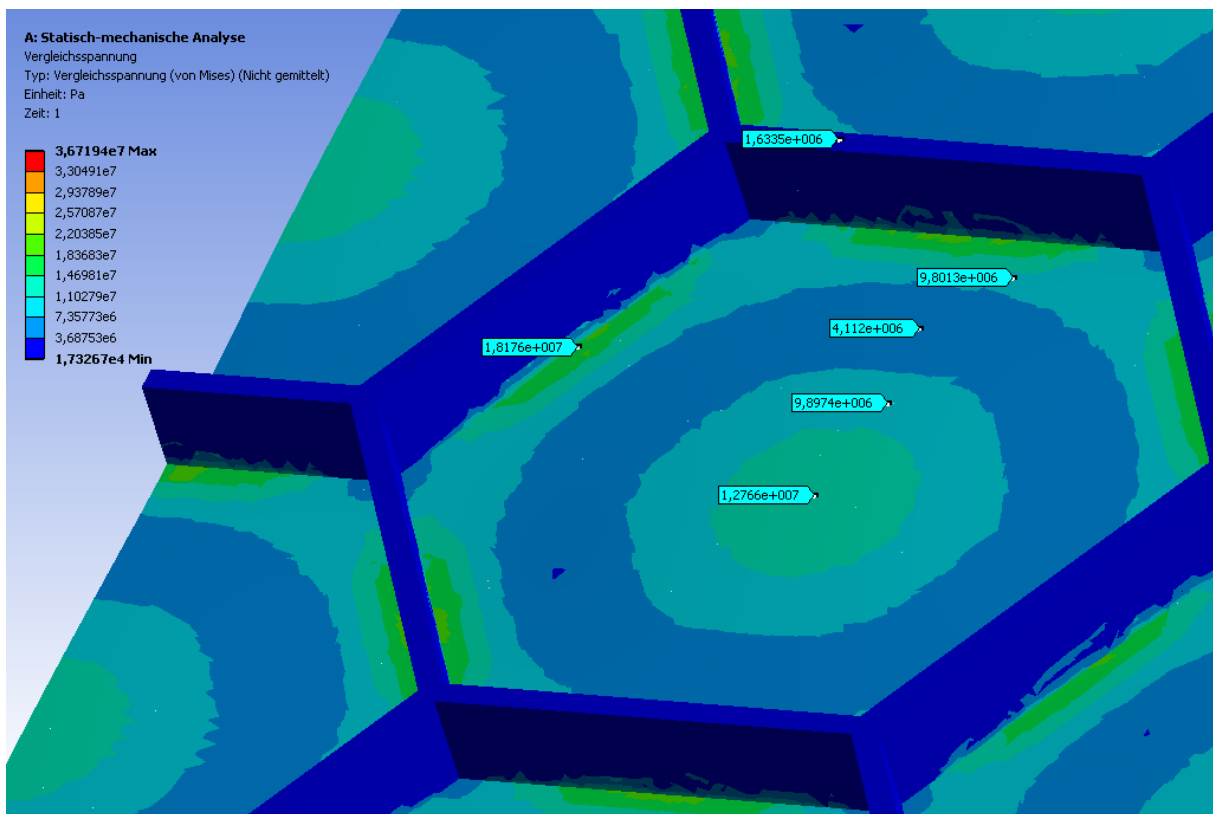


Abbildung 3.9: Detailansicht der Spannungen innerhalb der nicht fraktalen Wabenebene. Zu sehen sind großflächige hohe Spannungen in den Übergangsbereichen von Wabenwand zu Grundplatte.

3.3.3 Verformung mit fraktalen Waben

Die Verformung der Grundplatte ist in den Mitten der Waben am größten. In den Stichproben sieht man den Verlauf von der linken oberen Kante der Grundplatte bis unten rechts zur Grundplattenmitte. Dabei wurde die Verformung über den Wabenmitten und über den Wabensteigen stichprobenweise gemessen. Zunehmend zur Grundplattenmitte hin findet eine Steigerung der Verformung statt. Während die Wabenmitte nahe dem Rand 0,283 mm abgesenkt ist, kommt es bei der Wabenmitte nahe der Grundplattenmitte zu einer Absenkung von 0,356 mm. Die Wabenstege haben in Kantennähe eine Verformung von 0,012 mm, die bis zur Grundplattenmitte auf 0,106 mm ansteigt. Die maximale Verformung mit 0,366 mm ist in der Grundplattenmitte unten rechts zu finden (Abbildung 3.10).

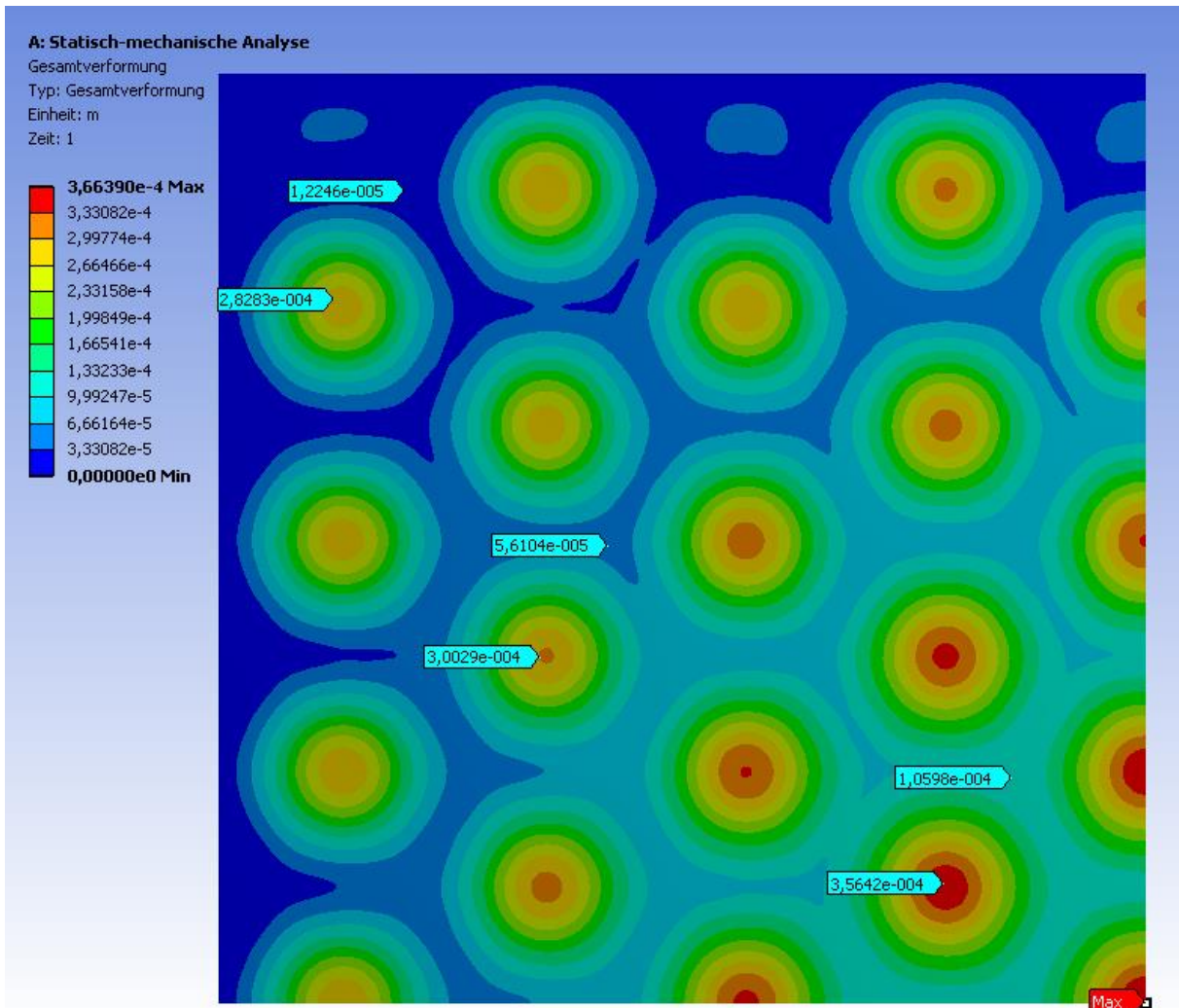


Abbildung 3.10: Übersicht der Verformungen in der Grundplatte bei fraktalen Waben. Die Verformungen nehmen zur Plattenmitte gerichtet zu.

Ergebnisse

In der Detailaufnahme des fraktalen Wabenmodells (Abbildung 3.11) sind die Verformungen zur besseren Sichtbarkeit um den Faktor 24 größer dargestellt. Durch die Ausbeulung in den Wabenmitten kommt es auch zu einer Verformung der fraktalen Stege. Die Verformung nimmt graduell von den Wabenmitten (0,357 mm) über die fraktalen Wabenstege (0,212 mm) zu den durchgängigen Waben (0,105 mm) ab.

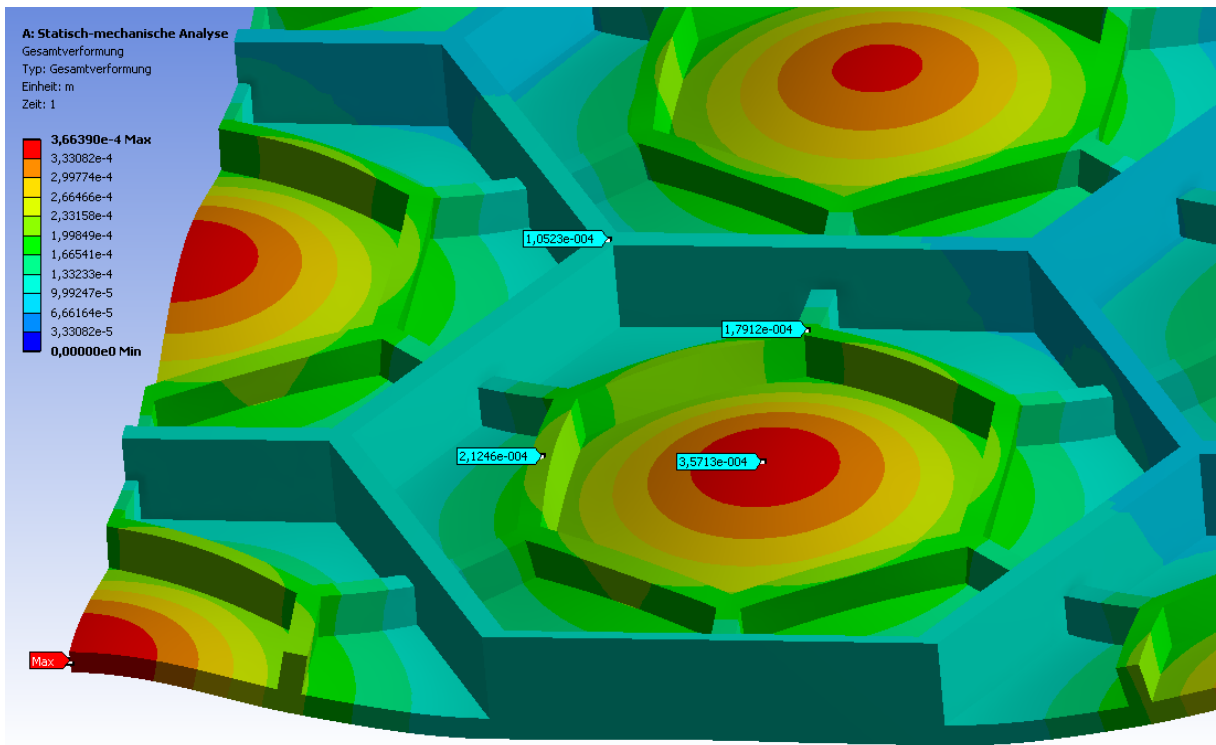


Abbildung 3.11: Detailaufnahme der 24-fach größer dargestellten Verformung in der Mitte des fraktalen Waben-VIP. Die Verformung der Grundplatte überträgt sich auf die fraktale Wabe.

3.3.4 Verformung ohne fraktale Waben

Für das Modell ohne fraktale Waben ist für die Verformung in den Wabenmitten kein deutlicher Gradient zur Grundplattenmitte zu erkennen. Die Auslenkung liegt für alle Wabenmitten im Bereich von 0,7 mm (Abbildung 3.12). Die Verformung der Grundplatte über den Wabenstegen ist hier nahezu identisch zu den Werten des Modells mit fraktalen Waben. Dabei ist an den Kanten ein Wert von 0,012 mm zu verzeichnen, der bis zur Grundplattenmitte auf 0,107 mm ansteigt. Die maximale Absenkung ist in der Grundplattenmitte zu finden und beträgt 0,767 mm.

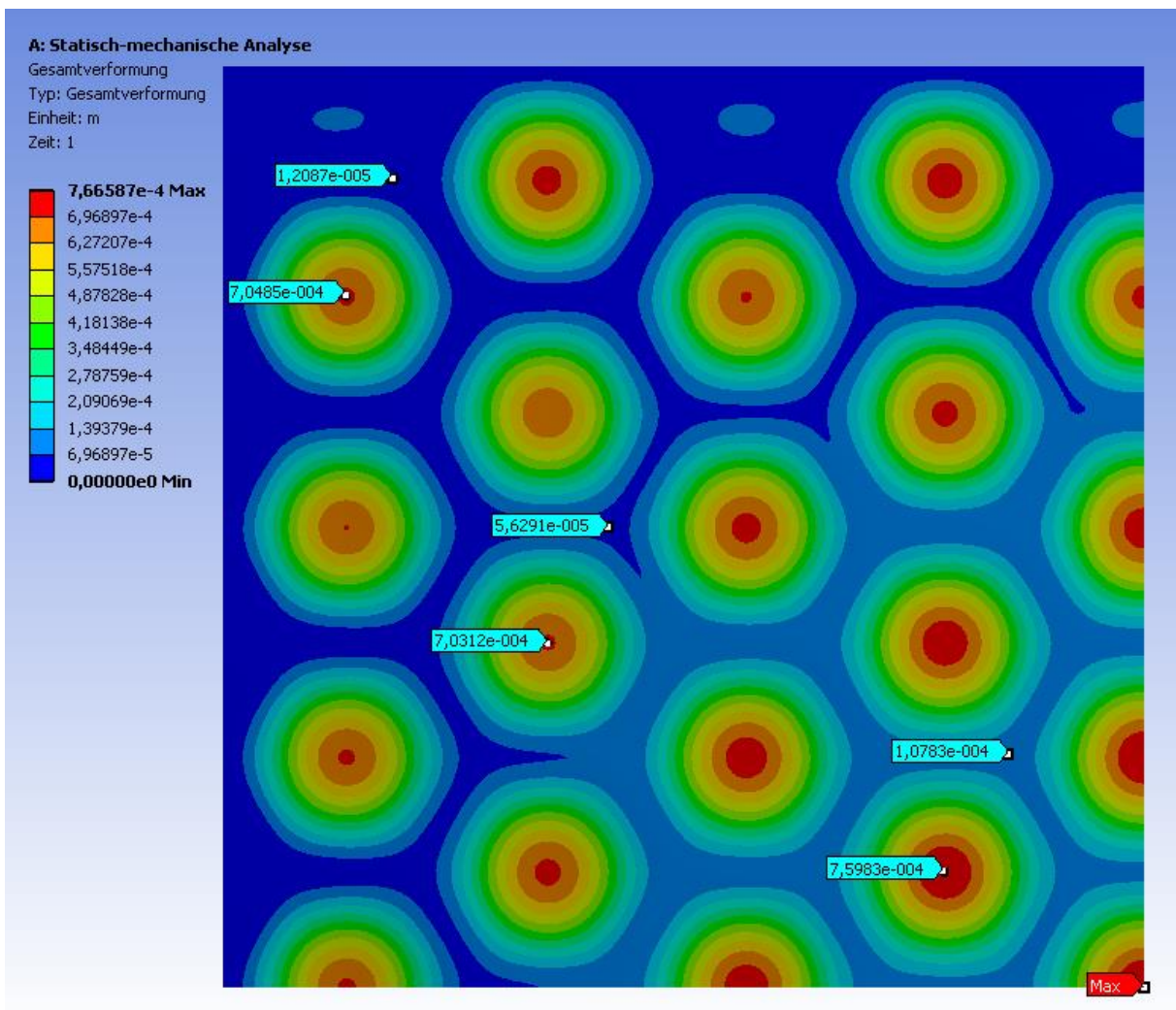


Abbildung 3.12: Übersicht der Verformungen in der Grundplatte ohne fraktale Waben. Die Verformungen in den Wabenmitten liegen überall im Bereich von 0,7 mm.

Ergebnisse

Die Detailansicht mit 24-facher Vergrößerung der Verformung des nicht fraktalen Wabenmodells zeigt eine große Absenkung der Deckplatte in der Wabenmitte mit 0,760 mm. Auf halber Strecke zur Wand beträgt die Verformung noch 0,457 mm. Während die Verformung der Grundplatte innerhalb der Waben damit etwa doppelt so groß ist wie bei dem fraktalen Modell, ist die Verformung der durchgängigen Wabenstege (0,109 mm) etwa identisch.

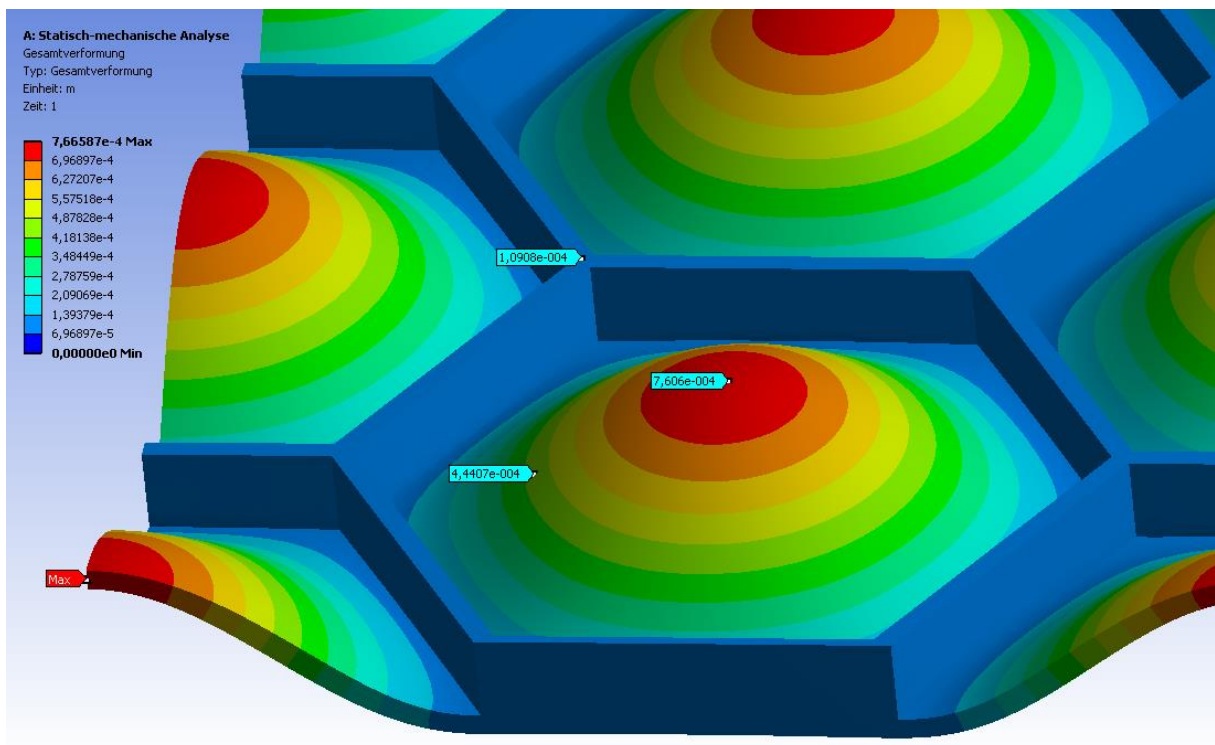


Abbildung 3.13: Detailansicht der nicht fraktalen Struktur mit 24-fach vergrößerter Verformung in der Wabenebene.

3.4 Thermische Eigenschaften

Für eine Schichtdicke von 0,02 m wurde für das Waben-VIP ein U-Wert von $9,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ errechnet. Mit einer Wärme übertragenden Fläche A von $0,0196 \text{ m}^2$ und einem Temperaturgradienten $\Delta T = 15 \text{ °C}$ ergibt sich daraus ein Wärmestrom I von 2,793 W durch das Paneel.

4 Diskussion

4.1 Optimierung

4.1.1 Einfluss der Eingabeparameter

Bei der Optimierung wurde dem Wabendurchmesser W_0 durch die Sensitivitätsanalyse die größte Bedeutung für die Verformung und auch ein erheblicher Einfluss auf die Masse zugesprochen. Dies erscheint sinnvoll, denn der Wabendurchmesser bestimmt gleich drei Eigenschaften des Modells: die Wabenanzahl, die Größe der W_0 -Waben und die Größe der W_1 -Waben.

Die W_0 -Waben sind in ihrer Höhe fixiert auf 0,008 m, haben aber dennoch den größten Einfluss auf die Masse durch die Dicke W_0 , die zwischen 0,001 und 0,005 m liegen kann. Dazu muss beachtet werden, dass die Stege der großen Waben immer aus zwei aneinander liegenden W_0 -Wabenstegen bestehen und somit die Dicke W_0 , da sie bei der Konstruktion zur Wabenmitte ausgetragen wird, zweifach in die Wabendicke des Modells einfließt. Die Auswirkung auf die Verformung fällt klein aus, denn sie hängt von der Anzahl der Waben ab, die wie erwähnt durch den Durchmesser W_0 definiert wird.

Die Dicke W_1 und die Höhe W_1 der fraktalen Waben haben kaum Einfluss auf die Masse. Einerseits ist die Abmessung der fraktalen Waben kleiner, wobei die Dicke nur einfach in das Modell einwirkt und andererseits ist die maximale Höhe mit einer oberen Grenze bei 0,006 m niedriger als bei den durchgängigen W_0 -Waben. Der Einfluss auf die Verformung ist für beide Werte gering, da auch hier die Abhängigkeit zum Wabendurchmesser W_0 besteht, der maßgeblich für die Verformung ist.

4.1.2 Ergebnis der Optimierung

Wie erwartet weichen die Ausgabewerte des EA von den Werten des errechneten Modells ab, sodass es sinnvoll war, die Zwangsbedingungsgrenze der zulässigen Verformung von 0,4 mm auf 0,35 mm herabzusetzen. Der errechnete Wert ist mit 0,3664 mm höher als die 0,35 mm Grenze, hat aber noch Annäherungspotential an die gewünschte 0,4 mm Verformung. Während die Verformung des berechneten Modells um 4,7 % gestiegen ist, konnte für die Masse eine Reduktion von 3,2 % berechnet werden.

Das beste Design hat die kleinstmöglichen Werte für die Dicke W_0 und die Dicke W_1 angenommen, dadurch konnte die Masse gering gehalten werden. Der Wabendurchmesser W_0 liegt mittig innerhalb des Grenzbereichs. Nach der Sensitivitätsanalyse ist der Wabendurchmesser das entscheidende Kriterium, um die Zwangsbedingung der höchstzulässigen Verformung

einzuhalten. Entsprechend muss der Wert hoch sein, während die Masse über die Dicken der Waben verkleinert wird. Entgegen der Prognose der Sensitivitätsanalyse hat die Wabenhöhe W_1 einen Wert von 0,0038 m der etwa in der Mitte des Grenzbereichs liegt. Durch die Höhe der fraktalen Waben wird die Grundplatte lokal verstärkt, sodass die Durchbiegung in den Wabenmitten reduziert wird.

4.2 Mechanische Eigenschaften

Sowohl das fraktale VIP als auch das nicht fraktale VIP hatten selbst in den Spannungsspitzen der Kerben (35,17 MPa) nie einen Wert, der an die maximale Zugspannung (72 MPa) von Plexiglas herankam. Die Hypothese, dass mit fraktalen Waben ein VIP erstellt werden kann, das dem atmosphärischen Druck und den Wind- sowie Schneelasten standhält, kann daher bestätigt werden.

4.2.1 Vorteile durch fraktale Waben

Die Stichproben der Von-Mises-Vergleichsspannung haben gezeigt, dass die fraktalen Ebenen zu einer gleichmäßigeren Spannungsverteilung auf der Grundplatte führen. Die gesamte Durchbiegung des VIP ist, wie durch die Stichproben auf der Grundplatte oberhalb der Wabenstege zu sehen ist, für die fraktale und nicht fraktale Version gleichwertig. Bei Betrachtung der lokalen Verformung in den Wabenmitten auf der Grundplatte können jedoch große Unterschiede erkannt werden. Es war zu erwarten, dass es ohne die fraktalen Wabenverstärkungen unter der Grundplatte zu größerer Verformung kommt. Das nicht fraktale Modell erfährt dabei eine maximale Verformung in Wabenmitte von 0,767 mm. Die Verformung der fraktalen Variante ist verglichen dazu mit 0,366 mm 52,2 % kleiner.

Außerdem zeigten die Absenkungen in Wabenmitte bei der fraktalen Variante einen steigenden Gradienten in Grundplattenmitte, während das nicht fraktale VIP für jede Wabenmitte auf dem Paneel Absenkungen um 0,7 mm aufwies. Durch die fraktalen Ebenen nimmt also die Durchbiegung in den Wabenebenen vergleichbar mit einer Platte unter Gleichlast zur Mitte hin zu, wodurch die äußeren Bereiche der Grundplatte innerhalb der Waben weniger belastet und verformt werden.

4.2.2 Das Problem der Kerbspannungen

Die größten Spannungen der Modelle wurden in den Kerben mit 90° Winkel ermittelt. Bei dem nicht fraktalen Modell sind dabei großflächigere Spannungen sichtbar, bedingt durch die längere Kerbe zwischen Grundplatte und durchgängiger Wabe. Für das fraktale Modell sind höhere Spannungsspitzen in den Kerben zwischen fraktaler und durchgängiger Wabenebene zu verzeichnen. Dies kann einerseits durch die kleine Geometrie des fraktalen Stegs erklärt

werden und andererseits durch eine zu geringe Elementauflösung. Abgesehen von einer höheren Elementanzahl im Bereich von Kerbspannungen hilft auch eine Verringerung des Kerbwinkels durch einen abgerundeten Übergang zwischen den Flächen, um die Kerbspannungen zu reduzieren (Klein, 2012).

Für in der Arbeit angewandte Optimierung sollte zunächst ein möglichst einfaches Modell gerechnet werden. Dadurch wurde auf die abgerundeten Übergänge (zum entschärfen der Kerbspannung) zwischen den Wabenstegen, die Löcher in den Wabenwänden zum gleichmäßigen Evakuieren des Panels (die auch eine Kerbwirkung hätten) und die verschließbare Öffnung zum Evakuieren durch eine Vakuumpumpe verzichtet.

Die maximale Spannung bei dem nicht fraktalen Modell ist in einer Kerbe durch ein verzerrtes Element verursacht worden. Eine feinere Vernetzung kann auch hier zu einer besseren Gitterqualität durch Elemente mit günstigeren Seitenverhältnissen führen und dadurch zu genaueren Berechnung der Spannungen führen. Für Rechnungen mit feineren Netzen war aber die Leistung des verwendeten Computers (Prozessor: Intel Xeon 3.00 GHz; Arbeitsspeicher: 6 GB RAM) nicht ausreichend, sodass bei ausgelastetem Arbeitsspeicher, die Daten auf die Festplatte ausgelagert werden mussten, wodurch es zu untragbaren Berechnungszeiten von über zehn Stunden und Programmabstürzen kam.

4.3 Wärmedämmfähigkeit

Die Wärmedämmfähigkeit wird durch die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes und die Schichtdicke bestimmt. Der durchlaufende Wärmestrom ist dann abhängig von der Fläche der wärmeleitenden Schicht. Obwohl Plexiglas schon eine verhältnismäßig geringe Wärmeleitfähigkeit von $0,19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ hat, kann es nicht mit den thermischen Eigenschaften von pyrogener Kieselsäure mit $0,004 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ mithalten (Fricke *et al.*, 2006). Für ein klassisches VIP mit einer Schichtdicke von $0,002 \text{ m}$ und einer Fläche von $0,25 \text{ m}^2$, also den gleichen Maßen wie das fraktale Waben-VIP, wäre bei einer Temperaturdifferenz von 15 °C ein Wärmestrom von $0,75 \text{ W}$ gegeben. Obwohl die wärmeleitende Querschnittsfläche durch die Wabenstruktur auf $0,0196 \text{ m}^2$ verringert werden konnte, ergibt sich bei gleicher Temperatur für das Waben-VIP ein 3,7-fach höherer Wärmestrom von $2,793 \text{ W}$.

Allgemein ohne Betrachtung eines spezifischen Temperaturunterschiedes kann der Wärmewiderstand für die jeweiligen VIPs mit den geometrischen Abmessungen angegeben werden. Der Wärmewiderstand gibt dabei an bei wie viel Kelvin Temperaturdifferenz ein Wärmestrom von einem Watt stattfindet. Das klassische VIP hat einen Wärmewiderstand von 20 K W^{-1} , während sich für das fraktale Waben-VIP $5,371 \text{ K W}^{-1}$ ergeben.

4.4 Fazit

Durch die von Diatomeen abstrahierte fraktale Wabenstruktur konnte ein VIP erstellt werden, dass dem atmosphärischen Druck und witterungsbedingten Schnee- und Windlasten eines Gewächshauses standhalten kann. Aufgrund der Zwangsbedingungseinstellung in der Optimierung ist allerdings noch Potential für die Masseneinsparung vorhanden, da mit höchsten Spannungen von 8,23 MPa in der Grundplatte noch ein großer Abstand zur maximalen Zugspannung (das Versagenskriterium) von Plexiglas mit 72 MPa besteht.

Da Plexiglas kein Hochleistungsdämmstoff ist, kann es im Bereich der Wärmedämmung nicht mit pyrogenen Kieselsäuren konkurrieren. Entsprechend ist der Wärmewiderstand eines fraktalen Waben-VIP 3,7-fach geringer, bietet dafür aber Transparenz und ist widerstandsfähig gegen äußere Einwirkungen. Klassische Vakuumisulationspaneele sind durch ihre notwendigen Schutzfolien hochempfindlich und werden nur unter schützenden Schichten in den Wänden oder Böden von Gebäuden verbaut.

4.5 Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführte Optimierung war der erste Schritt zum Erreichen eines optimalen fraktalen Waben-VIP. Mit einem leistungsfähigeren Computer könnte zunächst das Optimierungsmodell mit einer höheren Elementanzahl feiner aufgelöst werden, um die Gitterqualität zu verbessern und die Spannungskonzentration in den Kerbbereichen zu mindern. Zusätzlich kann in den Bereichen der Kerbwirkung durch einen runden Übergang die Kerbspannung verringert werden. Der abgerundete Übergang könnte durch einen Radius definiert werden, der über eine Gleichung an die Änderung des Wabendurchmessers und somit an die jeweilige Geometrie angepasst wird.

Mit mehr Rechenleistung ist dann auch eine Sensitivitätsanalyse mit mehr Proben bei der DoE möglich. Dies wäre sinnvoll, um den Fehler der MOP zu reduzieren und somit bei dem EA ein Optimum zu erreichen, das kaum Abweichungen zum nachträglich errechneten Wert hat.

Wenn die Spannungsspitzen in den Kerben durch das feinere Netz und Verrundungen so gemindert wurden, dass sie im realistischen Bereich sind, kann die Von-Mises-Vergleichsspannung als weitere Zwangsbedingung in die Optimierung einfließen. Je nach gewünschtem Sicherheitsfaktor würde dann ein entsprechend hoher Wert angenommen werden. Bei einer Versagensspannung von Plexiglas mit 72 MPa könnte mit einer Zwangsbedingung von 60 MPa ein Sicherheitsfaktor von 1,2 erzielt werden. Da bei dem besten Design der Optimierung dieser Arbeit noch viel Potential bezüglich der Massenreduktion vorhanden war, ist dann auch mit einer weiteren Verringerung des wärmeleitenden Querschnitts zu rechnen.

Diskussion

Dennoch ist es unwahrscheinlich, dass mit Plexiglas als alleinigen Werkstoff die Isolationsfähigkeit nur durch eine weitere Querschnittsverringeringung in den Bereich von klassischen VIP rückt. Interessant wäre die Betrachtung von einem Schichtaufbau des Panels mit mehreren Werkstoffen. So könnte ein Werkstoff mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit als zusätzliche Isolationsschicht in den Querschnitt des Panels eingebaut werden. Dabei müssten die durchgängigen Waben und die Seitenwände in einer gewissen Schichtdicke aus dem Isolator bestehen. Wenn der Isolationswerkstoff nicht transparent ist, dann kann er mit einer spiegelnden Folie überklebt werden, damit einfallendes Licht unter bestimmten Winkeln in das Gewächshaus reflektiert wird.

5 Literatur

5.1 Primärliteratur

Baur, E., Brinkmann, S., Osswald, T., A., Schmachtenberg, E. (2006): Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 30. Auflage, Hanser, München.

Böhmer, H., Fanslau-Görlitz, D. und Zedler, J. (Institut für Bauforschung e.V. Hannover) (2010): U-Werte alter Bauteile – Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmeschutztechnischer Berechnungen bei der Modernisierung. Fraunhofer IRB, Stuttgart.

Degischer, H. P. und Lüftl, S. (2009): Leichtbau: Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten. Wiley-VCH, Weinheim.

Fricke, J., Schwab, H., Heinemann, U. (2006): Vacuum Insulation Panels - Exciting Thermal Properties and Most Challenging Applications. International Journal of Thermophysics, Vol. 27, pp. 1123 - 1139.

Hamm, C. E. (2005): The Evolution of Advanced Mechanical Defenses and Potential Technological Applications of Diatom Shells. Journal of Nanosciences and Nanotechnology, Vol. 5, 108 – 119.

Hamm, C., Jansen, S. und Philipp, B. (2008): Bremerhavener Schule für Leichtbau: Verfahren Evolutionary Light Structure Engineering (ELiSE). Hannover Messe 2008, 21.-25.04.2008, Hannover.

Hamm, C. E., Merkel, R., Springer, O., Jurkojc, P., Maier C., Prectel, K. und Smetacek, V. (2003): Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection. Nature, Volume 421, Number 6925; 841 – 843.

Hornbogen, E. und Warlimont H. (2006): Metalle – Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen, 5. neu bearbeitete Auflage, Springer Berlin, Heidelberg.

Meretz, W. (1963): Die Wabenzelle der Honigbiene. Bulletin of Mathematical Biophysics, Volume 28, 95 – 110.

Moeller, E. (2008): Handbuch Konstruktionswerkstoffe – Auswahl, Eigenschaft, Anwendung. 1. Auflage, Hanser, München.

Nachtigall, W. (2010): Bionik als Wissenschaft: Erkennen – Abstrahieren - Umsetzen. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.

Tipler, P. A. und Mosca, G. (2009): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 6. Auflage, Spektrum Akademischer Verlage, Heidelberg.

5.2 Sekundärliteratur

BauNetz Media GmbH (2013): Mechanische und physikalische Eigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas und von Borosilikatglas nach EN 572-1 [64] und EN 1748-1 [61]. Verfügbar auf: <http://www.baunetzwissen.de/dl/134762/eigenschaften.pdf> (Zugriff: 08.12.2013).

Dynardo GmbH (2013): optiSLang Help.

Erbenich, G. und Klein, H. (2003): Vakuumpaneele im Baubereich „Quo vadis“ - Versuch einer Bestandsaufnahme anhand ausgesuchter Anwendungsbeispiele und Formulierung eines Maßnahmenkatalogs. VIP – Bau, 1. Fachtagung, Rostock-Warnemünde. Verfügbar auf: http://www.vip-bau.de/pdf/1_vip_bau/n_erbenich_klein.pdf (Zugriff: 16.11.2013).

European Commission (2008): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - 20 20 by 2020 - Europe's climate change opportunity. Verfügbar auf: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0030:FIN:en:PDF> (Zugriff: 15.11.2013).

Evonik Industries AG (2013): Technische Information PLEXIGLAS® - PLEXIGLAS® GS / XT. Verfügbar auf:

<http://www.plexiglas.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/PLEXIGLAS-Sheet/PLEXIGLAS/211-1-PLEXIGLAS-GS-XT-de.pdf> (Zugriff: 19.11.2013).

Johannson, P. (2012): Vacuum Insulation Panels in Buildings: Literature review. Report No 2012:1– Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, Gothenburg.

Verfügbar auf: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/155961.pdf> (Zugriff: 16.11.2013).

Klein, B. (2012): FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 9. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

Mathiak, F. (2008): Ebene Flächentragwerke II: Grundlagen der Plattentheorie. Vorlesungsskript an der Hochschule Neubrandenburg. Verfügbar auf: www.mechanik-info.de/dokumente/Skript_Plattentheorie.pdf (Zugriff: 19.11.2013).

Puthli, R. und Pertermann, I. (2012): Anpassungsleitfaden Einwirkungen auf Gewächshäuser 4. aktualisierte Auflage nach der geltenden DINV 11535-1: 1998-02 auf Basis von DIN EN 1990 und 1991 einschließlich nationaler Anhänge unter Berücksichtigung gewächshaus-typischer Besonderheiten nach Stand der Technik, Pfinztal. Verfügbar auf: <http://taspo.de/uploads/media/Anpassungsleitfaden-4.pdf> (Zugriff: 10.12.2013).

5.3 Patente

US 4358490 A: Transparent Vacuum Insulation (1982.11.09): Nagai, K..

DE 102011050632 A1: Wabenelement zur Dämmung (2012.11.29): Niemöller, G., Schindler, K. und Szymanski, M..

5.4 Abbildungen

Abbildung 1.1: http://ec.europa.eu/dgs/jrc/site_images/normal_18640.jpg (verändert) (Zugriff: 15.12.2013).

Abbildung 1.2:

http://www.wirtschaftsclub.org/tl_files/wirtschaftsclub/votraege_zentec_2012/2%20Caps%20ENTWURF%20Zentec%20April%202012.pdf (verändert) (15.12.2013).

Abbildung 1.3: Verändert nach: **Fricke, J., Schwab, H., Heinemann, U. (2006):** Vacuum Insulation Panels - Exciting Thermal Properties and Most Challenging Applications. International Journal of Thermophysics, Vol. 27, pp. 1123 - 1139.

Abbildung 1.4: Verändert nach: **Johannson, P. (2012):** Vacuum Insulation Panels in Buildings: Literature review. Report No 2012:1– Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, Gothenburg.

Abbildung 1.5: AWI.

Abbildung 1.6: Meretz, W. (1963): Die Wabenzelle der Honigbiene. Bulletin of Mathematical Biophysics, Volume 28, 95 – 110.

Abbildung 1.7: links: AWI.

Abbildung 2.1: Klein, B. (2012): FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 9. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Menschen bedanken, die mir geholfen haben diese Arbeit zu erstellen. Zunächst danke ich Paul Bomke und Robert Naguschewski für die Betreuung meiner Arbeit und die hilfreichen Denkanstöße. Bei Dr. Christian Hamm bedanke ich mich für die Vergabe des Themas und die Möglichkeit mit der Software des Instituts arbeiten zu können. Dann danke ich Prof. Dr. Jörg Müssig für die Hilfe bei der Wahl des Konstruktionswerkstoffs. Sebastian Möller gebührt mein Dank für die Ideen zur Gitterstudie. Ich danke Malte Wiedmann und Anna Maetze, mit denen ich während der Bearbeitungszeit das Büro teilte, für zahlreiche Tipps zur Arbeit und die Auflockerung der Stimmung durch kleine Kicker-Duelle. Insgesamt danke ich dem gesamten Team des imare, dass ich in einer lockeren Atmosphäre arbeiten konnte. Ich danke meinen Freunden für den Zuspruch und schließlich meinen Eltern, die mich während der Bearbeitung mit vollem Einsatz unterstützt haben.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe und alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, als solche gekennzeichnet sind. Die Arbeit hat in gleicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und ist auch noch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen hat.

Bremerhaven, 23.12.2013

Unterschrift: