



imare
Institut für Marine Ressourcen GmbH



**Westfälische
Hochschule**

Fachbereich Maschinenbau

B A C H E L O R A R B E I T

*Biologisch inspirierte Flächenversteifungen
nach dem Vorbild der Diatomeen*

Biomimetic surface stiffening features inspired by diatoms

von

Paul Juan Antonio Sommer aus Kiel

betreut von

- 1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer, Westfälische Hochschule*
- 2. Betreuer: Dr. rer. nat. Christian Hamm, imare GmbH*

Bremerhaven, im August 2014

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die mich nicht nur bei der Bachelorarbeit, sondern über die letzten drei Jahre unterstützt haben. Zunächst möchte ich der gesamten Arbeitsgruppe um Dr. Christian Hamm für die Unterstützung und für die Möglichkeit danken, dass ihr eure fachliche Kompetenz mit mir geteilt und mich in eurem wissenschaftlichen Kreis so herzlich aufgenommen habt! Insbesondere möchte ich meinem Betreuer Paul Bomke und den weiteren Projektmitgliedern Robert Naguschewski und David Seseke für die gemeinsame Zeit ganz herzlich danken. Für die zu Verfügung gestellten Ressourcen danke ich dem ELiSE-Team. Ich hoffe, eure Arbeit wird weiterhin so viele Früchte ernten und das eure Ziele in Erfüllungen gehen mögen. Ich würde mich sehr darüber freuen, zukünftig noch einmal mit euch zusammenarbeiten zu dürfen.

Seitens der Westfälischen Hochschule darf ich Prof. Alexander Sauer nicht nur für die Betreuung der Bachelorarbeit danken, sondern ebenso für viele spannende Leichtbaustunden, seien es die Vorlesungen oder Praktika, die in mir immer wieder die Leidenschaft und das Feuer für das Fach Leichtbau entfachten!

Des Weiteren möchte ich dem Cusanuswerk und der Bundesrepublik Deutschland für die Förderung meiner Studienzeit in dem Studiengang der Bionik danken. Ich freue mich auf die zukünftige Zusammenarbeit und viele weitere Diskussionen im Kreise der Stiftung!

Im Laufe der letzten Jahre habe ich viele neue Freunde gewonnen. Neben den Kommilitonen danke ich vor allem Esther: „Du hast das Einleben in Bocholt so viel leichter gemacht.“ Ebenfalls danke ich Mario für die vielen Erlebnisse und Gespräche.

Als letztes, aber nicht weniger würdig, möchte ich meiner Familie ungemein danken, wie es auch kam, auf eure Hilfe konnte ich immer zählen, ich danke euch so sehr!!!

Zusammenfassung

Die Versteifung von Flächen ist in der Entwicklung und Konstruktion eine vielfach zu bewältigende Herausforderung. Die Schalenstrukturen von Planktonorganismen, sogenannten Diatomeen, werden als Inspiration für neue Lösungen dieser Herausforderung untersucht. Der bionische Prozess resultiert in vier von Diatomeen abstrahierten Modellen. Diese Modelle werden auf ihre minimale Masse hin optimiert. Die maximale Verformung wird zudem als Randbedingung vorgegeben. Anhand eines evolutionären Algorithmus wird die Optimierung parametrisch durchgeführt. Des Weiteren wird jedes Modell unter vier Lastfällen optimiert: Torsion, Kreis-, Flächen- und Streckenlast.

Für die vier Modelle wird jeweils ein Referenzmodell entwickelt und auf identische Art und Weise optimiert. Die Arbeitshypothese beschreibt, dass das bionisch entwickelte Modell bei gleicher Steifigkeit leichter ist als das Referenzmodell. Lastfallspezifisch und modellabhängig kann in 11 von 16 Fällen die Arbeitshypothese bestätigt werden. Die entwickelten Modelle erfüllen verschiedene Anforderungen aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften, wodurch eine breite Variabilität für die Anwendung ermöglicht wird.

Schlagwörter: *Bionik, Flächenversteifung, Diatomeen, Leichtbau, Grasshopper, Parameteroptimierung, Evolutionsalgorithmus, Finite Element Methode*

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	ii
Zusammenfassung	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	3
2.1 Diatomeen und Leichtbau.....	3
2.2 Stand der Technik.....	6
2.3 Arbeitshypothese	10
3 Material und Methoden.....	11
3.1 Bionik	11
3.2 Rasterelektronenmikroskopie	12
3.3 Methodiken des Modellaufbaus	13
3.4 Software.....	14
3.5 Rahmenbedingungen für die Erstellung der Modelle.....	15
3.6 Lastfälle	16
3.7 Numerik.....	17
3.8 Plausibilitätsrechnung der FEM-Simulation	17
3.9 Parameteroptimierung	19
3.10 Kennwerte der Auswertung.....	21
4 Ergebnisse.....	23
4.1 Verifikation der FEM-Simulation	23
4.2 Flächenversteifungen bei Diatomeen	23
4.3 Modell 1 – Verknüpfte Rippe.....	25
4.4 Modell 2 – Versteifte Rippe	27
4.5 Modell 3 - Schalennachbildung.....	28
4.6 Modell 4 – Doppel-T-Wabe	30
4.7 Optimierungsergebnisse	33
5 Diskussion.....	42
5.1 Konstruktions- und FEM-Software	42
5.2 Plausibilitätsbetrachtung der FEM-Software	42
5.3 Modell 1 – Verknüpfte Rippe.....	43
5.4 Modell 2 – Versteifte Rippe	45
5.5 Modell 3 – Schalennachbildung	47
5.6 Modell 4 – Doppel-T-Wabe	48
5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	50
5.8 Ausblick.....	51
6 Fazit	52
Literaturverzeichnis.....	53
A Anhang.....	57
B Daten-CD.....	71

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
E-Modul	Elastizitätsmodul
ELiSE	Evolutionary Light Structure Engineering
FEM	Finite Elemente Methode
PKW	Personenkraftwagen
RBE	Rigid-Body-Element
REM	Rasterelektronenmikroskop
VB	Visual Basic

1 Einleitung

Die Erwärmung der Atmosphäre, das Steigen des Meeresspiegels, das Schmelzen von Gletschern und die Zunahme von extremen Wetterereignissen - dieses sind nur wenige Folgen des in erster Linie vom Menschen verursachten Klimawandels (Kahlenborn und Brünig, 2014). Die Bundesregierung Deutschland beschloss im Jahre 2007 daher ein umfassendes Klimaschutzprogramm (Bundesumweltministerium, 2007). Insbesondere die Verringerung von klimaschädlichen Treibhausgasemissionen wurde als entscheidendes Ziel festgelegt, diese sollen bis 2020 im Vergleich zu 1990 um mindestens 40 % gesenkt werden (Kahlenborn und Brünig, 2014).

Der Automobilbranche wird wie anderen auch ein explizites Klimaschutzziel zugeteilt. Ab 2021 dürfen im Schnitt pro Fahrzeug nur noch 95 Gramm CO₂ pro Kilometer ausgestoßen werden (Deffke, 2013). Der Anteil der Karosserie, also der strukturellen Bauteile, beträgt 42 % vom Gesamtgewicht eines typischen Personenkraftwagens (PKW) der Kompaktklasse. Die Masse eines PKWs wiederum verursacht 23 % des Gesamtverbrauchs (Täger und Plath, 2013). Durch gezielten Leichtbau und dementsprechend einen effizienteren Einsatz von Material wird folglich ein wichtiger Maßstab gesetzt, um die notwendigen Klimaziele zu erreichen. Ebenfalls von diesen Maßnahmen betroffen sind Industriesektoren wie der Schiffbau, der Schienenverkehr oder die Luftfahrt.

Eine bionische Vorgehensweise ist insbesondere durch eine begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen in der Natur und der damit einhergehenden effizienten Materialnutzung und Materialsynthese für den Leichtbau geeignet (Degischer und Lüftl, 2009, S. 1). Als Maßnahme der Erreichung dieser Ziele wird in der vorliegenden Arbeit das Leichtbaupotential von biologisch inspirierten flächenversteifenden Strukturen untersucht (s. Abb. 1.1). Zwei Aspekte sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung.

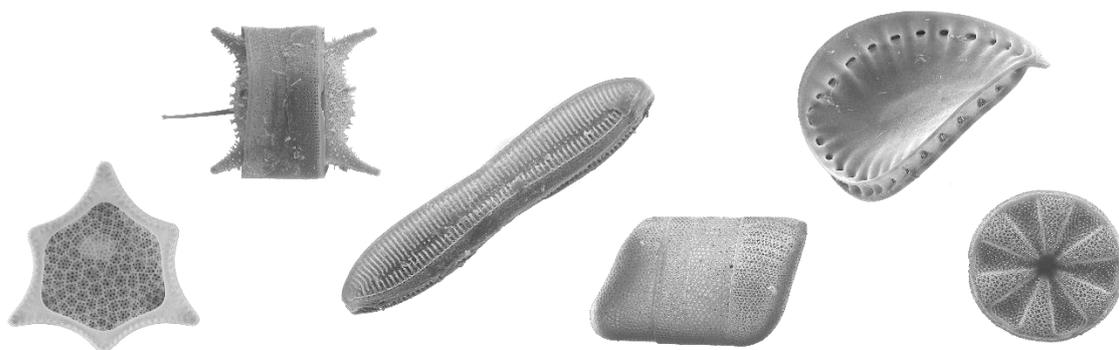


Abb. 1.1 Schalenstrukturen einiger Diatomeen. Sie dienen in der vorliegenden Arbeit als biologisches Vorbild. Ersichtlich wird insbesondere die große Formenvielfalt. Die Größe einer Diatomee liegt im Bereich von wenigen Mikrometern bis zu wenigen Millimetern. Für nähere Erläuterung s. Abschnitt 2.1.

Erstens, 2013 waren 64,9 % aller Stahlerzeugnisse in Deutschland Flachstähle (Sanders, 2014). Zu dieser Kategorie zählen z. B. Feinstbleche (z. B. für die Verpackungsindustrie), Feibleche (z. B. für die Fahrzeugindustrie) und Grobbleche (z. B. für den Hoch- und Schiffsbau) (Berns und Theisen, 2008, S. 134).

Zweitens, die eigentliche Problematik bei Flacherzeugnissen, also Produkten deren Dicke wesentlich kleiner ist als ihre Breite und Länge, ist ihre Instabilität. Dieser Instabilität wird durch konstruktive Maßnahmen entgegengewirkt. Flacherzeugnisse werden somit in den meisten Fällen umgeformt oder z.B. mit Rippen versteift, um letztlich ihren Beulwiderstand zu erhöhen oder ihre maximale Verformung zu minimieren. In dieser Arbeit werden vier bionische Konzepte, eine planare Fläche anhand struktureller Komponenten zu versteifen, näher untersucht.

2 Grundlagen

2.1 Diatomeen und Leichtbau

Diatomeen, auch bekannt unter dem Namen Kieselalgen, sind einzellige, Photosynthese betreibende Eukaryoten. Ihre evolutive Entwicklung begann vor nicht weniger als 238 Millionen Jahren (Bäuerlein, 2003), inzwischen kommen sie in allen Meeren und auch im Süßwasser in großer Zahl vor. Unter den Protisten zählen sie zu den Produktivsten und der dominierenden Gruppe, 25 % der globalen Primärproduktion werden Diatomeen angerechnet (Hamm, 2005a).

Für Diatomeen charakteristisch ist eine Schale (*Frustulum*) aus Siliziumdioxid, dem Anhydrid der Kieselsäure, die eine Zellwand darstellt (ebd.). Anzumerken ist, dass dieser Werkstoff eine deutlich größere Dichte als Wasser, also größer 1 g/cm^3 , besitzt (Hamm, 2005c). Dieser Werkstoff ist zusätzlich weitestgehend impermeabel für gelöste Nährstoffe, weshalb es zwingend notwendig ist, dass die Schale Poren (*Areolae*) aufweist. Eine weitere Besonderheit ist die Lichtdurchlässigkeit der Diatomeenschale (Bäuerlein, 2003).

Das *Frustulum* besteht immer aus zwei ineinandergesteckten Schalenhälften, ähnlich dem Aufbau einer Petrischale (s. Abb. 2.1). Diese beiden Schalenhälften sind über das Gürtelband miteinander verknüpft. Dieses ist als einziger Teil der Schale dazu befähigt zu wachsen. Folglich ist lediglich ein Wachstum in eine Raumrichtung möglich. Die Ober- und Unterseite der Schale bezeichnet man außerdem als *Valvae*.

Die Größenvariabilität der Diatomeen kann bis zu acht Größenordnungen betragen. So beläuft sich der Durchmesser von *Cyclotella nana* auf wenige Mikrometer und *Ethmodiscus rex* auf wenige Millimeter (Hamm, 2005c). Neben dieser Größenvielfalt ist die morphologische Formenvielfalt unter den bis zu 100.000 Arten beachtlich (Hamm, 2005a). Generell können Diatomeen in bilateral-symmetrisch langgestreckt (*Pennales*) und in radial-symmetrisch (*Centrales*) aufgeteilt werden (ebd.). Unter den pennaten Arten gibt es außerdem solche, die eine *Raphe* besitzen, einen längs verlaufenden Spalt, der eine geringfügige aktive Fortbewegung durch eine Sekretion und Zytoplasmatransport ermöglicht (Hamm und Smetacek, 2007).

Diatomeen benötigen zum Überleben Licht und dürfen folglich die lichtdurchflutete Wasserschicht, die sogenannte trophogene Zone, nicht verlassen. Des Weiteren besitzen sie im ökologischen Nahrungsnetz eine Vielzahl natürlicher Fressfeinde. Insbesondere

Ruderfußkrebse (*Copepoda*) und Krill (*Euphausiacea*) stellen mit ihren Fresswerkzeugen (Mandibeln und Kaumagen) für die Zelle eine essentielle Gefahr dar (Hamm et al., 2003).

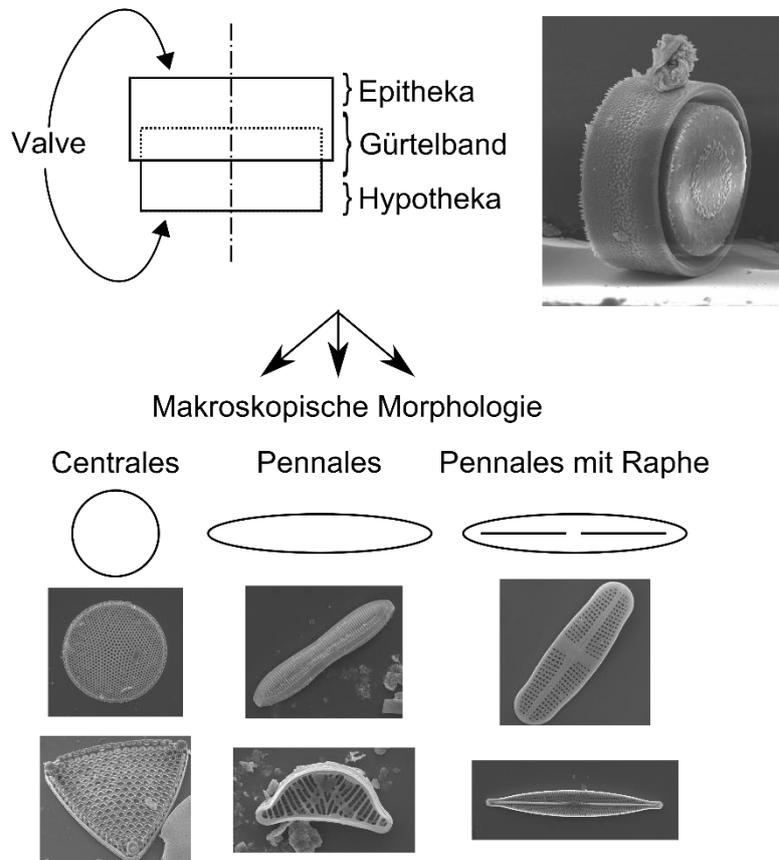


Abb. 2.1 Schematischer Aufbau der Diatomeen und morphologische Klassifizierung der Diatomeen, die Größe der abgebildeten Diatomeen REM-Aufnahmen beläuft sich auf ca. 5-20 μm .

Ein coevolutiver Prozess wird aufgrund dieser Räuber-Beute Beziehung vermutet (Hamm und Smetacek, 2007). Diese beiden letztgenannten Faktoren zeigen bereits das Leichtbaupotential auf: Um nicht zu tief abzusinken, dürfen Diatomeen nicht zu schwer werden, müssen aber gleichzeitig stabil genug sein, um Fressfeinden nicht zu leicht zum Opfer zu fallen. Nach der Definition des Leichtbaus entspricht dieses dem Gestalten von Bauteilen mit einer möglichst geringen Masse unter Beachtung der gesetzten Anforderungen (Degischer und Lüftl, 2009, S. 14). Diese Vermutung bestätigt Hamm et al. (2003) durch einen Crashtest. Hierfür wurden kraftsensitive Glass-Mikronadeln auf Diatomeen aufgebracht. Anhand von Kraft-Weg-Diagrammen kann ein Rückschluss auf die Bruchlast gezogen werden. Diese Kraft wird durch einen maximalen Wert von 730 μN bestätigt, was in etwa 800 Tonnen pro Quadratmeter, also z.B. einer Belastung eines Gullideckels von ungefähr 500 Mittelklassenwagen entspricht. Die Strukturen sind nicht nur deswegen für bionische Entwicklungen geeignet, sondern auch weil Flächendruck und Materialquerschnitt

nach Hamm (2005c) mit dem Quadrat des Längenmaßstabs hochskalierbar sind. Ebenfalls wird das Elastizitätsmodul (E-Modul) in dieser Untersuchung auf ca. 22 GPa, ähnlich wie massiver Knochen, bestimmt (Hamm et al., 2003). Die Spannungsverläufe in Diatomeenschalen zeigen in FEM-Analysen (Finite Element Methode) günstige Spannungsverläufe auf (Hamm, 2005a). Das Silikat hält zudem hohe Druck- und Zugspannung aus (ebd.). Nach Degischer und Lüftl (2009, S. 2) ist dieses einer Anpassung an hochkomplexe Strukturen zuzuschreiben, indem die Natur durch Selektion Einfluss auf die Struktur, deren Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften nimmt.

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Technische Beispiele

In der Technik werden bereits einige grundlegende Bauweisen/-prinzipien genutzt, die eine flächenversteifende Wirkung zu Folge haben (s. Abb. 2.2). So soll bei dünnwandigen Platten oder Schalenkonstruktion vor allem der Beulgefahr entgegengewirkt werden (Degischer und Lüftl, 2009, S. 16). Durch Austragung von Material aus der Ebene heraus z. B. durch Rippen oder Sicken wird ein möglichst großes Flächenträgheitsmoment erzeugt. Wiederum bieten Schalen bzw. Wölbungen eine natürliche Stützwirkung durch eine vorhandene Krümmung quer zur Druckrichtung (Klein, 2011, S. 70). Außerdem ist die Bördelung eine angewandte konstruktive Versteifung der Ränder, sie bewirkt unter Beachtung des Steghöhe/Dicke-Verhältnis eine Erhöhung des Beulwiderstandes (ebd., S. 256). Dieser Effekt ist bei einer Falzung der Ränder noch stärker. Wird eine Wand durch Einbringung von Löchern geschwächt, so kann durch ein Durchzug diese Instabilität wieder ausgeglichen werden.

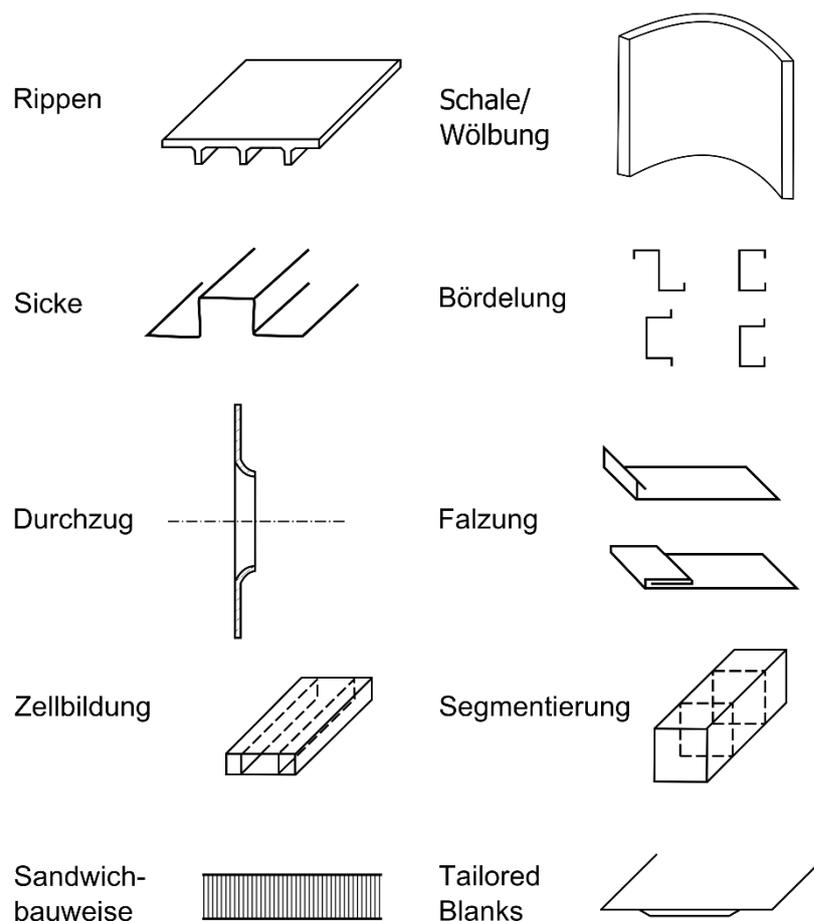


Abb. 2.2 Technische Beispiele mit flächenversteifender Wirkung (Geändert nach Klein, 2011, S. 69 f., 260 f., 270 ff., 462 ff.).

Außerdem kann die Torsionssteifigkeit in geschlossenen Profilen durch Zellbildung erhöht werden, durch eine Segmentierung andererseits die Biegesteifigkeit. Durch Sandwichbauweise werden ebenfalls Flächen versteift. So werden zwei dehnsteife Häute mit einem dazwischen liegenden schubweichen Kern miteinander verklebt (Klein, 2011, S. 193). Eine weitere bewährte Bauweise in der Automobilbranche ist das Verschweißen unterschiedlich dicker und qualitativer Bleche zu sogenannten Tailored Blanks (Klein, 2011, S. 292).

Für eine hierarchische Bauweise ist zudem folgendes anzumerken: Eine Platte kann mit einer hierarchischen Verstrebungsstruktur unter Biegebelastung oder mit einer hierarchischen Schalenkonstruktion unter Drucklast eine erhöhte Effizienz für eine größere Anzahl an Hierarchieebenen erreichen (Degischer und Lüftl, 2009, S. 10).

2.2.2 Bionische Beispiele

Strukturleichtbau wird bereits von einigen biologischen Vorbildern inspiriert (s. Abb. 2.3). Aus diesen Beispielen und technischen Umsetzungen wird ersichtlich, dass eine Arbeit über bionische Flächenversteifungen plausibel und zielführend ist. So zeigt der Meerestang *Durvillaea antarctica* eine Sandwichstruktur auf, ebenfalls sind die meisten Knochen wie auch die vom Menschen in Sandwichbauweise aufgebaut (Hill, 1999, S. 39). Der Knochen besitzt zusätzlich die Fähigkeit durch spezialisierte Zellen Material wieder abzubauen oder anzubauen und sich somit über die gesamte Lebenszeit adaptiv an Belastungen anzupassen. Die Riesenseerose ist eines der wenigen populären Bionik-Beispiele aus dem 19. Jahrhundert, ihre Rippen mit Querstreben auf der Blattunterseite stehen Pate für die Stützstruktur des Kristallpalastes in London.



Abb. 2.3 Bionisch angewandte Versteifungsprinzipien (Tributsch, 1980). Abstrahiert dargestellt sind die biologischen Vorbilder Meerestang, Vogelknochen und Riesenseerose und deren wesentliche Eigenschaften, die als Inspiration für technische Flächenversteifungen gelten.

Das Blatt der Fächerpalme bietet Wind, Regen oder Schneelasten eine große Wirkfläche. Jedoch wird durch eine eindimensionale Faltung die mechanische Stabilität des Blattes ausreichend erhöht (s. Abb. 2.4). Ein weiteres Beispiel, das Bambusrohr, zeigt eine

Verringerung der Knickgefahr durch eine Segmentierung des Rohres anhand von inneren Querwänden. Die Muschel wiederum greift auf die Wirkung von Wölbungen bzw. eines Wellprofils ihrer Schale zurück. All diese biologischen Strukturelemente sind wie in Abschnitt 2.2.1 ersichtlich angewandte technische Wirkprinzipien oder Bauweisen.

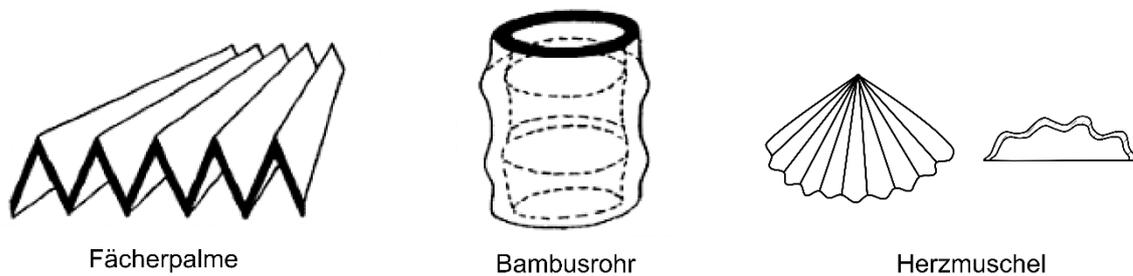


Abb. 2.4 Bionisch angewandte Versteifungsprinzipien (Tributsch, 1980). Abstrahiert dargestellt sind die biologischen Vorbilder Fächerpalme, Bambusrohr und Herzmuschel und deren wesentliche Eigenschaften, die als Inspiration für technische Flächenversteifungen gelten.

2.2.3 Das ELiSE-Verfahren

Evolutionary Light Structure Engineering, kurz ELiSE, ist eine Verfahrensweise zur Entwicklung bionischer Leichtbaustrukturen. Die Optimierung eines Bauteils hinsichtlich seines Leichtbaupotentials geschieht auf der Grundlage von Untersuchungen von Planktonorganismen. Insbesondere die Abteilung der Kieselalgen ist aufgrund ihrer Schale aus Siliziumdioxid und ihrer Formenvielfalt unter den bis zu 100.000 Arten als biologisches Vorbild prädestiniert (Maier et al., 2013).

Nach dem bauteilspezifischen Screening geeigneter biologische Vorbilder folgt deren Analyse unter mechanischen Aspekten mit dem Ziel, das dahinterstehende Prinzip zu identifizieren. Für eine effektive Suche wird auf die ELiSE-Datenbank zurückgegriffen, in ihr sind neben mikroskopischen Aufnahmen und Computer Aided Design-Datensätzen (CAD) auch parametrische Modelle hinterlegt (Maier et al., 2012). Die Recherche nach Diatomeen wird durch die Hustedt-Sammlung am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven mit über 6.500 Publikation und 110.000 Präparaten und Proben erweitert (Hinz, 2014).

Als nächster Schritt wird im ELiSE-Verfahren eine FEM-basierte Simulation abstrahierter Prinzipien durchgeführt. Durch eine anschließende Parameteroptimierung mit Evolutionsalgorithmen wird das Bauteil final ausgelegt. In Abschnitt 3.1 wird beispielhaft ein bionisches Projekt detailliert dargestellt.

Durch eine Ergänzung interdisziplinärer Forschung in den Bereichen Biomechanik, Werkstoffe und Evolution der Diatomeen wird das Verfahren in seiner Anwendbarkeit erweitert. Das ELiSE-Verfahren nutzt folglich durch Jahrmillionen evolutionärer

Entwicklung optimal ausgelegte biologische Strukturen für formoptimierte Leichtbau-Konstruktion. Anwendung findet das Verfahren bereits im Automobilbau, Luft- und Raumfahrt oder im Offshore-Bereich (s. Abb. 2.5).

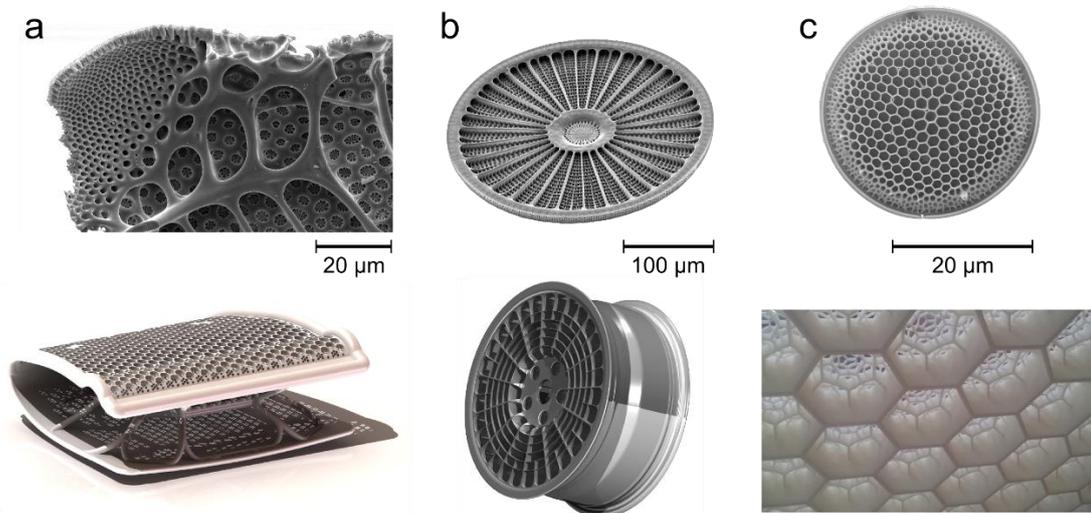


Abb. 2.5 Beispiele für nach dem ELiSE-Verfahren optimierte Strukturen. Die oberen Bilder stellen jeweils die Diatomee als biologisches Vorbild des entsprechenden Bauteils näher da. (a) Die Kopfstütze eines PKWs. (b) Eine Autofelge. (c) Versteifung nach dem Prinzip der fraktalen Waben (ELiSE, 2014).

2.2.4 Automatisierung und Standardisierung

Der Faktor Zeit hat in der Forschung und Entwicklung eine bedeutende finanzielle Rolle. Mit dem Vorhaben Entwicklungen bzw. Optimierungen zu automatisieren und zu standardisieren kann diesem entgegengewirkt werden. Das Projekt *ELiSE - Automatisierung und Standardisierung* bezweckt durch die Identifikation, Abstraktion und Untersuchung bionischer Konstruktionsprinzipien vom Vorbild Diatomeen eine Strukturdatenbank aufzubauen, mit welcher eine schnelle Optimierung von Bauteilstrukturen ermöglicht werden soll. Beispielhaft kann somit ein optimiertes und analysiertes Versteifungselement vielfach adaptiv angewendet werden, da es parametrisch aufgebaut ist (zum näheren Verständnis dieser Methodik s. Abschnitt 3.3). Eine ähnliche Vorgehensweise wird in Dimcic und Scheible (2009) beschrieben, in welcher ein Dach aus einer Vielzahl einzelner Dachelemente konstruiert wird. Nach dem Parameter größter Lichteinfall werden die Dachelemente in kurzer Entwicklungszeit zu individuellen Elementen optimiert.

Des Weiteren untersuchen Dimcic (2011) und Naguschewski (2012) in Ihren Abschlussarbeiten adaptiv an Lastfälle anpassende Gitterstrukturen. Beide greifen auf die Methodik Voronoi zurück (zum näheren Verständnis dieser Methodik s. Abschnitt 3.3). Ähnliches erforscht Reiß (2014) anhand der automatisierten und belastungsgerechten Auslegung von Waben an beliebige Freiformflächen.

2.3 Arbeitshypothese

Die vorliegende Bachelorarbeit wird zur Weiterentwicklung des ELiSE - Verfahrens in dem Projekt Automatisierung und Standardisierung von ELiSE angesiedelt. Grundlegendes Ziel ist es, Bauteile anhand eines Katalogs bionischer Leichtbauelemente automatisch zu optimieren. Als ein wichtiger Schritt zum Erfolg dieses Vorhabens dient diese vorliegende Erststudie. Sie legt die Identifizierung von flächenversteifenden Strukturen, deren Abstraktion und deren Analyse näher da. Es werden demnach vier bionische Modelle parametrisch aufgebaut und anhand eines evolutionären Algorithmus auf ihre minimale Masse hin parameteroptimiert.

Die Arbeitshypothese gestaltet sich wie folgt: Die vom Vorbild Diatomeen bionisch entwickelten und parametrisch optimierten flächenversteifenden Strukturen sind leichter bei gleicher Steifigkeit im Vergleich zu ihrem jeweiligen unter selbigen Gesichtspunkten optimierten Referenzmodell.

3 Material und Methoden

3.1 Bionik

Der Begriff Bionik setzt sich aus den Wörtern Biologie und Technik zusammen und beschreibt eine Kreativitätsmethode und Analogieforschung (Nachtigall, 1998). Anhand eines Beispiels wird im Folgenden der nach der Richtlinie VDI 6220 (2012) geregelte bionische Entwicklungsprozess dargelegt. Bionik vereint Forschungs- und Entwicklungsansätze, die auf eine technische Anwendung abzielen. Auf der Suche nach Lösungen für technische Problemstellungen werden Prinzipien der Natur herangezogen und auf technische Systeme übertragen (VDI 6220, 2012). Die Motivation hinter der Bionik liegt darin begründet, dass sich im Laufe der 3,8 Milliarden Jahre evolutiver Entwicklung optimierte biologische Strukturen herauskristallisiert haben (ebd.). Dieser Fakt und das bis zu 2,5 Millionen Arten beschrieben vorliegen, macht die Bionik zu einem Ideenpool und einer Inspirationsquelle für technische Problemlösungen (ebd.).

In der Bionik bezeichnet Bottom-Up einen Prozess bei dem Erkenntnisse aus der Biologie für die Entwicklung technischer Lösungen genutzt werden (ebd.). Top-Down hingegen beschreibt die Lösung einer bestimmten technischen Problemstellung anhand von Untersuchungen der Natur. Der Bottom-Up-Prozess wird in der vorliegenden Arbeit praktiziert, die einzelnen Phasen werden am Beispiel einer Leichtbaufelge nach dem Vorbild der Diatomee *Arachnoidiscus spec.* dargestellt (s. Abb. 3.1).

Der Start des Bottom-Up-Prozesses kann in der Auffindung eines technischen Problems oder in Ergebnissen aus der biologischen Grundlagenforschung liegen. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben eignen sich Diatomeen als Leichtbauvorbild. Anhand eines anschließenden Screenings in der Artenvielfalt der Diatomeen wird die Art *Arachnoidiscus spec.* aufgrund ihrer Struktur identifiziert. Aus einer ersten Abstraktion der Struktur kann das dahinterliegende Prinzip der Verknüpfung von radialen und konzentrischen Streben erkannt werden (Hamm, 2005b). Eine mögliche Anwendung bietet sich als Felge an, jedoch benötigt

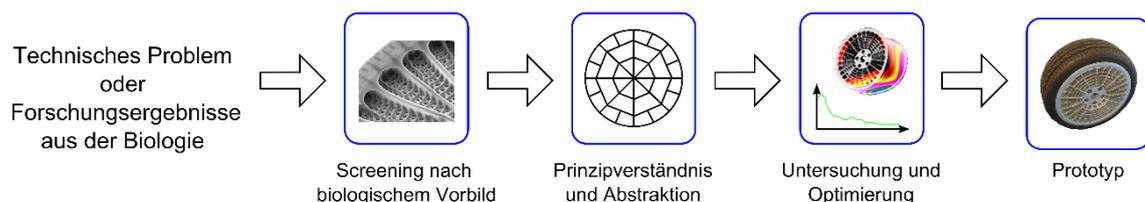


Abb. 3.1 Schematischer Ablauf einer bionischen Entwicklung am Beispiel einer Leichtbaufelge von links nach rechts (ELiSE, 2014).

die Auslegung der Struktur an die Anforderung einer Felge eine abschließende Untersuchung und Optimierung. Letztlich ist eine erste bionische Felge und ebenso innovative wie auch patentierte Lösung entwickelt. Anhand dieses Beispiels kann der in dieser Arbeit verwendete bionische Prozess nachvollzogen werden.

3.2 Rasterelektronenmikroskopie

Die in dieser vorliegenden Arbeit erhaltenen mikroskopischen Aufnahmen werden mit dem Rasterelektronenmikroskop Quanta 200 F von dem Hersteller Fei erstellt. Mit einer kleinsten Punktauflösung von circa $0,005\ \mu\text{m}$ (40 mal größer (Hornbogen und Warlimont, 2006, S. 192)) und einer bis zu 800 mal besseren Schärfentiefe in Relation zu einem Lichtmikroskop bietet diese Art Mikroskop eindeutige Vorteile für die Untersuchungen der dreidimensionalen Strukturen von Diatomeen (Macherauch und Zoch, 2011, S. 290).

Das Wirkprinzip ist wie folgt: Ein gebündelter Elektronenstrahl wird durch Ablenkspulen rasterförmig über die Probe gelenkt (Hornbogen und Warlimont, 2006, S. 192) (s. Abb. 3.2). Nicht leitende Proben müssen für eine optimale Bildqualität beschichtet werden, in diesem Fall mit Gold. Durch Wechselwirkung zwischen den Elektronen und der Probe entstehen Emissionen (z. B. Sekundärelektronen), deren Intensität detektiert und in ein Kontrastbild umgesetzt wird. Für die Erstellung der REM-Aufnahmen werden folgende Parametereinstellungen genutzt: Als Modus wird ein Hochvakuum mit einem Kammerdruck von $4,3\text{e}^{-5}\ \text{Pa}$ und einer Beschleunigungsspannung von $10,0\ \text{kV}$ verwendet. Weiterhin wird Stickstoff als Evakuierungsgas gewählt.

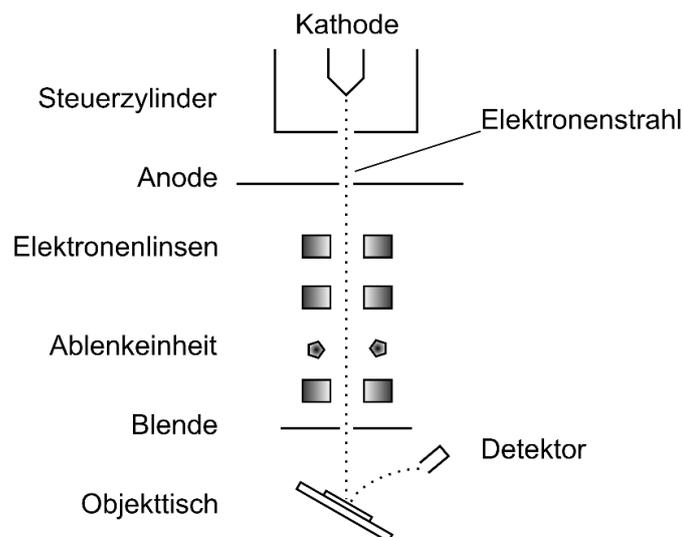


Abb. 3.2 Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops. Ausgehend von der Kathode werden Primärelektronen in Richtung Objektisch beschleunigt und gebündelt. Durch eine Ablenkeinheit wird die Richtung des Elektronenstrahls rasterförmig über die Probe auf dem Objektisch gelenkt. Die Wechselwirkung zwischen der Probe und den Elektronen erzeugt unter anderem Sekundärelektronen. Deren Intensität wird durch einen Detektor wahrgenommen und digital als Referenz für die Helligkeit des Bildpunktes genutzt.

3.3 Methodiken des Modellaufbaus

Die Konstruktion der nachfolgenden Modelle erfolgt durch Methodiken, welche eine effiziente Versteifung einer Fläche ermöglichen. Die eine Methode generiert eine Versteifung anhand eines Musters einzelner Versteifungselemente, die andere generiert ein flexibles Linienkonstrukt, welches letztlich extrudiert wird.

Für die Erstellung der Modelle zur Untersuchung einer flächenversteifenden Wirkung werden demnach zwei Methoden ausgewählt, die im Folgenden als Boxmorph und Voronoi bezeichnet werden. Beide Methoden erlauben hinsichtlich der Automatisierung und Standardisierung eine variable Anpassung von Konstruktionselementen an den jeweiligen Lastfall.

Boxmorph beschreibt die Transformation eines Quaders in einen anderen Quader in Referenz zu seinen acht Eckpunkten. Dieses grundlegende Prinzip funktioniert ebenfalls mit nicht-achteckigen Körpern oder mit zweidimensionalen Geometrien. In Abb. 3.3 ist beispielhaft die Prozedur zu erkennen. Zunächst wird ein Element, welches in diesem Fall der Versteifung dient, konstruiert. Daraufhin wird der kleinstmögliche Quader um dieses Element gelegt (Referenzbox). Gleichzeitig wird eine Oberfläche, die versteift werden soll, in gleichmäßige Quader aufgeteilt (Zielbox). Anhand der Eckpunkte der Referenzbox und Zielbox wird das Element angepasst transformiert. Folglich ergibt sich eine versteifte Oberfläche. Anzahl und Größe der Zielboxen können zudem beliebig verändert werden. Diese Prozedur ist durch die vielen Schnittstellen flexibel und Anpassungsfähig (für weitere Informationen s. Khabazi, 2010).

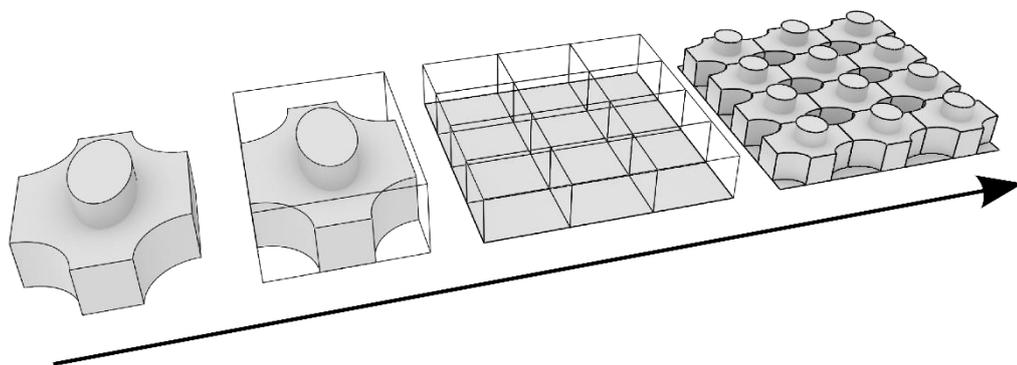


Abb. 3.3 Beispielhafte Prozedur der Methode Boxmorph von links nach rechts. Zunächst wird ein Versteifungselement konstruiert, um dieses wird im nächsten Schritt eine Referenzbox erzeugt. Auf einer Fläche werden darauf die Zielboxen generiert, in welche letztlich das Versteifungselement anhand der Referenzbox transformiert wird.

Die zweite Methode wird nach dem Mathematiker Georgy Voronoi als Voronoi-Diagramm oder Voronoi-Tessellation bezeichnet. Bei dieser Methodik wird eine Fläche durch eine mathematische Rechenvorschrift in mehrere Polygone (Teilflächen) zerlegt, diese Teilflächen beinhalten jeweils einen Generatorpunkt (Balzer und Deussen, 2005). Jede Teilfläche umfasst dabei alle Punkte, die näher zu seinem Generatorpunkt als zu allen anderen liegen (s. Abb. 3.4). Die Begrenzungslinien wiederum sind die Punkte, welche die gleiche Entfernung zu zwei oder mehreren Generatorpunkten haben. Die Anzahl der Generatorpunkte ist beliebig, der zerlegte Raum kann sowohl zwei- als auch mehrdimensional sein. Des Weiteren ist jeder Eckpunkt stets Mittelpunkt eines Kreises, der mindestens drei Generatorpunkte auf einem Kreis, aber keinen im Inneren des Kreises besitzt.

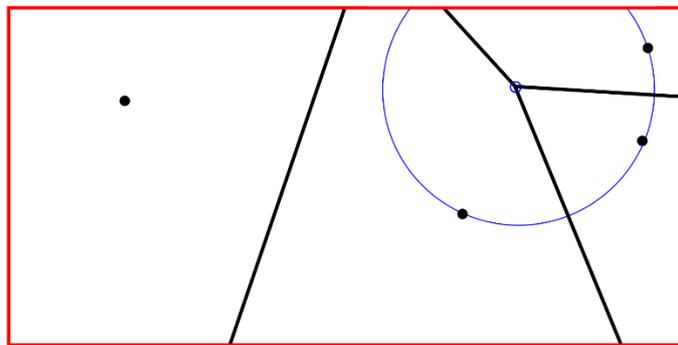


Abb. 3.4 Zufällig erstelltes Voronoi-Diagramm mit vier Generatorpunkten, dessen Fläche auf das rote Rechteck begrenzt wird. Der blaue Kreis illustriert beispielhaft eine der Vorschriften bei der Erstellung von Voronoi-Diagrammen.

3.4 Software

Für die parametrische Konstruktion wird eine Software gewählt, die vielfach von Architekten genutzt wird (Dimcic und Scheible, 2009). Sie ermöglicht nicht nur eine interaktive Formfindung über die Variation von Parameter, sondern bietet auch das Programmieren eigener Komponenten in den Sprachen C# oder Visual Basic (VB) an. Es handelt sich hierbei um das Plug-in *Grasshopper* (Version 0.9.0075) für die CAD-Software *Rhinoceros* (Version 5) von *McNeal*. *Rhinoceros* dient als Anzeigefenster, der über einzelne Komponenten aufgebauten Geometrien in *Grasshopper*. Jede Komponente gleicht in dem Prinzip einer Funktion. So müssen für ihre Variablen Input-Parameter vorgegeben werden, worauf die Komponente mit einem bzw. mehreren definierten Output(s) antwortet. Die verarbeiteten Daten können Punkte, Zahlen, Geometrien, Dateipfade oder ähnliches sein.

Beispielhaft ist in Abb. 3.5 der Aufbau einer Gitterstruktur über Grasshopper Komponenten abgebildet. Anhand der Regler kann die Gitterstruktur in Echtzeit verändert werden. Grasshopper stellt sich als generatives und algorithmisches Werkzeug dar, die Bedienung funktioniert intuitiv über die grafische Oberfläche. Geometrische Zwischenprodukte sind in Grasshopper stets nutzbar, folglich kann hinsichtlich der Programmierung geometrisch vorgegangen werden (Pohl et al., 2011).

Für die FEM wird auf die Grasshopper-Erweiterung *Karamba* (Version 1.0.5) zurückgegriffen. Sie ist vollständig in Grasshopper eingebunden und ermöglicht sowohl eine Analyse als auch eine Auswertung von Bauteil-Berechnungen.

Die parametrische Optimierung wird mit einer in Grasshopper zu Verfügung stehenden Komponente namens Galapagos und deren evolutionären Algorithmus durchgeführt.

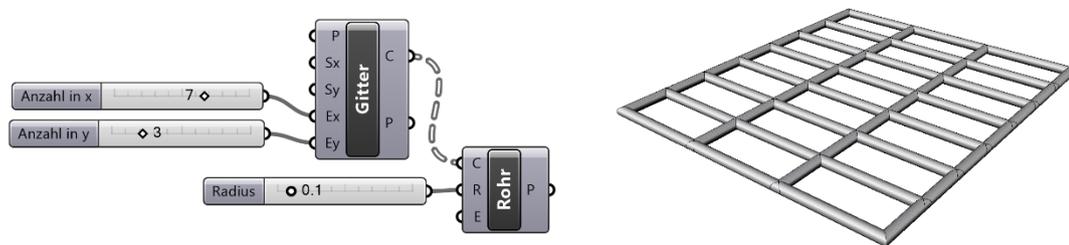


Abb. 3.5 Links: Grasshopper Ansicht. Zwei Regler steuern die Anzahl der Gitterfelder in die beiden Raumrichtungen, über einen weiteren Baustein wird aus der bisherigen Linienkonstruktion eine Rohrkonstruktion, deren Radius über einen weiteren Regler verändert werden kann. Rechts: Rhinoceros Ansicht der Rohrkonstruktion.

3.5 Rahmenbedingungen für die Erstellung der Modelle

Nach dem firmeninternen Benutzerhandbuch der ELiSE-Datenbank (Maier, 2010) werden der Vergleichbarkeit wegen einige Kriterien für die Modellierung vorgegeben. So besitzt die Fläche, welche versteift wird, einen Grundriss von 1×1 m und ist stets planar. Des Weiteren ist anzumerken, dass die nachfolgenden geometrischen Längenangaben dimensionslos sind, da sie im Verhältnis zum Grundriss der Fläche angegeben werden.

Als linear-elastisches Material mit der Streckgrenze als Versagenskriterium unter Zug- und Druckbelastung wird der Standardstahl S235 gewählt (Preisinger, 2013). Die Materialkennwerte gestalten sich nach DIN EN 10025 zu:

- Elastizitätsmodul 21.000 kN/cm^2
- Streckgrenze $23,5 \text{ kN/cm}^2$
- Schubmodul 8.076 kN/cm^2
- Spezifisches Gewicht $78,5 \text{ kN/m}^3$
- Thermischen Längenausdehnungskoeffizient $0,00001 \text{ 1/K}$

3.6 Lastfälle

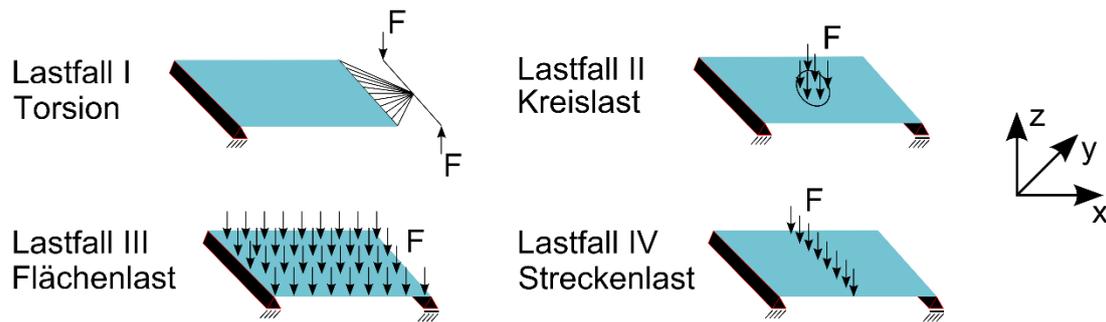


Abb. 3.6 Die vier untersuchten Lastfälle schematisch dargestellt. Die Summe der Kräfte je Lastfall entspricht F bzw. im Lastfall I $2F$. Links ist stets das Festlager und bis auf bei Lastfall I ist rechts das Loslager.

Die nachfolgenden Modelle werden jeweils auf vier Lastfälle hin untersucht (s. Abb. 3.6). So werden für die Vergleichbarkeit zwei vorgegebene Lastfälle, die Strecken- und Flächenlast, aus dem Benutzerhandbuch für die ELiSE-Datenbank verwendet (Maier, 2010). Des Weiteren werden die Modelle unter Torsion und statt unter einer Punktlast unter einer kreisförmigen Flächenlast analysiert. Letzteres dient der Vermeidung erhöhter und sehr lokaler Spannungen bzw. Verformungen.

Im Folgenden wird zwischen der Platte und deren Versteifung unterschieden. Die Platte umfasst die planare Fläche, die Versteifung wiederum all das Material, welches nicht zur Platte zählt und der Versteifung dient.

Die Lagerung ist stets nur an der Platte und nicht an der Versteifung angebracht. Im Lastfall I, der Torsion, ist die gesamte Kante der Lagerung in allen sechs Freiheitsgraden fest eingespannt. Gegenüberliegend wird über eine Rigid-Body-Element-Spinne (RBE) und eine RBE-Drehstange die Torsion über zwei gleichgroße Punktlasten initiiert (Hebelarm der Drehstange = $0,5$ und $F = 1000$ N). Es ergibt sich ein Drehmoment von 1000 Nm. Es wird darauf hingewiesen, dass sich bei dem nachfolgend vorgestellten Modell 4 und dem dazugehörigen Referenzmodell für Lastfall I sich die Lagerung auf die obere und untere Kante und die Krafteinleitung auf die gesamte gegenüberliegende Seite bezieht.

Für die weiteren Lastfälle ist eine Fest-Los-Lagerung vorgesehen. Das Festlager ist in der Mitte der Kante in einem Knoten translatorisch in die drei Raumrichtungen fest gelagert. Die restlichen Punkte der Kante sind in x - und z -Richtung fest eingespannt. Die Loslagerung ist lediglich in z -Richtung fest. Diese Art der Lagerung lässt Querkontraktion zu und verringert folglich den Einfluss der Lagerung auf die Spannungswerte vollkommen (Romberg und Hinrichs, 2011, S. 33). Für die Kräfte ergibt sich je Lastfall in Summe stets 1000 N. Bei Lastfall II wird die Last auf alle Knoten, die sich auf und in dem Kreis im Mittelpunkt der

Platte mit dem Radius 0,2 befinden, aufgebracht. Lastfall III beschreibt eine Flächenlast auf alle Knoten der Platte und Lastfall IV bildet eine Streckenlast in der Mitte zwischen den Lagern ab. Anhand dieser vier Lastfälle unterschiedlicher Krafteinleitungsarten soll eine vielseitige Bewertung der in dieser Arbeit entwickelten Modelle ermöglicht werden.

3.7 Numerik

Die FEM-Berechnungen werden mit der „Analyze“-Komponente von Karamba bewerkstelligt. Sie beschränkt sich auf lineare Belastungen kleiner Verformung. Die Steifigkeit des Systems wird im unverformten Zustand ermittelt und die Last in einem anschließenden Schritt angewendet. Die Ergebnisse können auf diese Weise für einfache Modelle mit der Plattentheorie erster Ordnung verglichen werden. Für eine ausreichende Vernetzung wird das jeweilig untersuchte Modell auf die kleinsten geometrischen Maße gestellt und soweit vernetzt bis die Änderung der maximalen Verformung zu der nächst größeren Vernetzung kleiner 7 % ist. Folglich ergeben sich für alle Modelle eine Netzauflösung von 0,02 und eine Knotenauflösung an Kanten von 0,67. Das Netz besteht aus planaren Schalenelement mit drei Knoten und basiert auf der Methode der natürlichen Dehnungsmoden (Papadrakakis et al., 2000 und Argyris et al., 1997). Folglich werden alle CAD-Modelle als Flächenmodell konstruiert. Die Elemente geben des Weiteren in oberer, mittlerer und unterer Schicht eine konstante Dehnung und Spannung aus, sie vernachlässigen transversale Scherverformungen. Als Vergleichsspannung für den gewählten zähen Werkstoff wird die Hypothese der Gestaltänderungsenergie (Von-Mises-Spannung) angewendet (Gross, 2012, S. 84).

3.8 Plausibilitätsrechnung der FEM-Simulation

Für die Validierung der FEM-Berechnungen werden die maximalen globalen Verformungen einer einfachen Platte überprüft. Die nach der kirchhoffschen Plattentheorie geltenden Voraussetzungen für Geometrie, Belastung, Verformung und Material werden beachtet (Hake und Meskouris, 2007, S. 75). Die Dimensionen der Konstruktion ist bei allen Lastfällen bis auf bei der Kreislast $0,01 \times 1 \times 1$ ($h \times b \times l$). Der Lastfall, Kreislast, wird durch eine Kreisplatte mit dem Durchmesser 1 und einer Dicke von 0,01 genähert.

Unter der Annahme, dass sich die Querschnittsverwölbungen ungehindert ausbilden können, ist die Theorie der St.-Venantschen Torsion mit den nachfolgenden Formeln nach Dankert

und Dankert (2011, S. 368 f.) anwendbar. Um diese Theorie zu approximieren, wird die Lagerung für die Plausibilitätsrechnung im Falle der Torsion nur translatorisch fest gelagert. Der Lastfall Torsion wird zudem mit der Software *Ansys* verifiziert. Mit den nach Tab. 3.1 genutzten Formelzeichen und Einheiten ergeben sich die nachfolgenden Gleichungen.

Tab. 3.1 Formelzeichen und deren Bedeutung samt Einheit für die Plausibilitätsrechnung.

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	m	Radius der Kreisplatte
b	m	Radius des Bereichs der Lasteinleitung
E	N/m ²	Elastizitätsmodul
G	N/m ²	Schubmodul
h	m	Dicke der Platte
F	N	Kraft
l	m	Seitenlänge der Platte
ν	-	Querkontraktionszahl
w_{max}	m	Maximale Verformung
x	m	Länge des Hebelarms

Die maximale Auslenkung bei Torsion ist gegeben durch:

$$w_{max} = \tan\left(\frac{1080 \times F \times x}{G \times h^3 \times \pi}\right) \times \frac{l}{2}. \quad (3.1)$$

Nach Paland (2002, S. 127) ergeben sich für die Flächenlast und Streckenlast nach den Gleichungen der elastischen Biegelinie für einfache, belastete Träger die anschließenden Formeln.

Die maximale Auslenkung für die Flächenlast mit Fest-/Loslagerung ergibt sich zu:

$$w_{max} = \frac{5 \times F \times l^3}{32 \times E \times h^3}. \quad (3.2)$$

Die maximale Auslenkung für die mittige Streckenlast mit Fest-/Loslagerung ist:

$$w_{max} = \frac{F}{4 \times E \times h^3 \times l^2}. \quad (3.3)$$

Der Lastfall Kreislast wird nach Mathiak (2008) durch eine allseitig in allen Freiheitsgraden fest eingespannte Kreisplatte genähert. Die maximale Auslenkung ergibt sich demnach zu:

$$w_{max} = \frac{3 \times F \times a^4 \times (1 - \nu^2)}{16 \times \pi \times b^2 \times E \times h^3} \times \left(\frac{b}{a}\right)^2 \times \left[4 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \times \left(4 \times \ln\frac{b}{a} - 3\right)\right]. \quad (3.4)$$

3.9 Parameteroptimierung

Die Parameteroptimierung schließt sich als letzter Schritt in der Entwicklung von bionischen Flächenversteifung an. Sie kommt zum Einsatz, wenn das Konstruktionsprinzip derart genau vorgegeben ist, dass eine Optimierung nur noch durch eine Veränderung von einigen Parametern erreicht werden kann (Degischer und Lüftl, 2009, S. 45). Weiterhin dient die Parameteroptimierung der optimalen Auslegung des Modells unter gegebenen Randbedingungen und Parametern.

Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Masse des Modells. Die Parameter sind die für das Modell geometrischen Variablen.

Eine Voraussetzung der Plattentheorie beschreibt, dass die Plattendicke kleiner als der maximale Betrag der Verformung der Plattenmittelfläche ist (Balke, 2014, S. 239). In Anbetracht dessen, dass die minimal mögliche Plattendicke in der Optimierung 0,002 betragen kann, wird für die Parameteroptimierung eine maximale Verformungsgrenze von 0,001 als Randbedingung festgelegt. Auf diese Art und Weise besitzen alle Modelle eine identische maximale Verformung samt einer vernachlässigbaren Abweichung und erfüllen folglich die Voraussetzung gleicher Steifigkeit für eine Vergleichbarkeit.

Auf eine Randbedingung der Spannung bzw. Auslastung wird aufgrund von nicht kerbspannungsfreien ausgelegten Konstruktion in dieser als Erststudie angedachten Arbeit verzichtet. Die Auslastung spiegelt das Verhältnis zwischen Streckgrenze des Materials und der maximalen Von-Mises-Spannung entlang eines jedes Schalenelement-Querschnitts wieder (Preisinger, 2013).

Für die Optimierung wird der in der Komponente Galapagos eingebundene evolutionäre Algorithmus verwendet. Dessen Definition beschreibt einen populations-basierenden metaheuristischen Optimierungsalgorithmus, welcher bionische Mechanismen wie Mutation, Rekombination und Überleben des Fittesten implementiert, um eine neue Generation von Lösungen iterativ zu erstellen (Weise, 2009, S. 95) (s. Abb. 3.7). Voraussetzung für deren Anwendung ist die starke Kausalität, so müssen kleine Änderungen der Ursache kleine Änderungen der Wirkung zur Folge haben (Nachtigall, 1998, S. 371).

So wird zunächst eine erste zufällige Population erstellt. Die fittesten dieser Generation werden in die nächste Generation auserwählt und durch Rekombination vervielfältigt. Weiterhin werden zufällig erstellte Individuen in die Populationen integriert, um eine große Vielfalt an Lösungen abzudecken und die Wahrscheinlichkeit der Konvergenz in ein lokales Optimum zu minimieren (Dimcic, 2011). Dieser Kreislauf wird solange ausgeführt, bis eine

ausreichende Fitness erreicht wird. Dieser evolutionäre Algorithmus spiegelt die Entwicklung der Natur zu optimal ausgelegten Systemen über lange Zeitperioden wieder. (Für weitere Information zu bionischen Optimierungen s. VDI 6224)

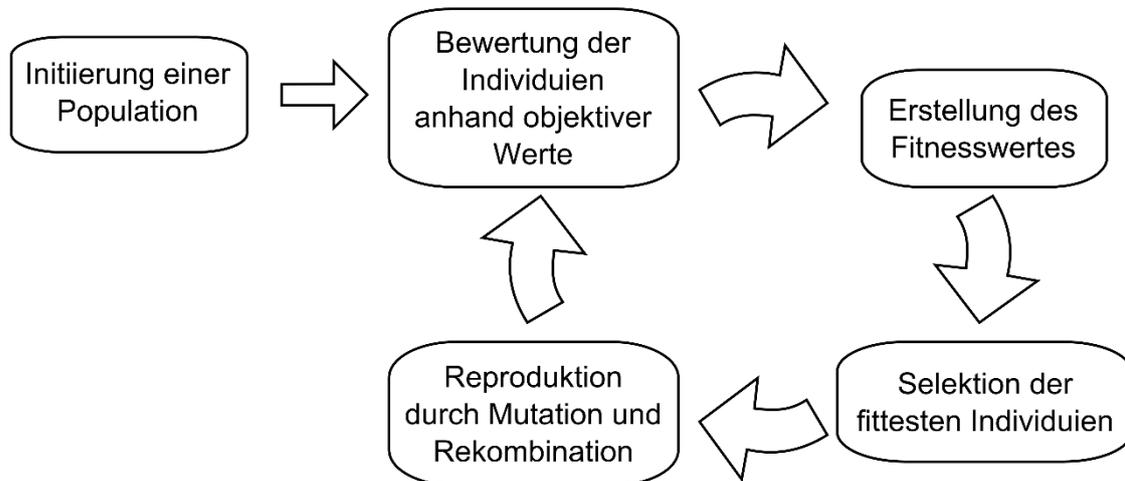


Abb. 3.7 Schematischer Kreislauf des evolutionären Algorithmus. Die Initiierung der Population stellt den Start der Optimierung dar. Der Kreislauf der Optimierung läuft solange, bis ein ausreichender Fitnesswert erreicht ist (verändert nach Weise, 2009, S. 96).

Die Einstellungen für den Optimierer werden empirisch ermittelt und ergeben sich folgendermaßen zu:

- Parameteranzahl $\times 4$ = Anzahl der Individuen je Generation
- Faktor der Individuenanzahl der ersten Generation = 2
- Inzuchtkoeffizient = 65 %
- Übertrag der besten 10 % zur nachfolgenden Generation

Es ergeben sich schließlich drei Schnittstellen in der Parameteroptimierung, die Konstruktion und Optimierung wird durch Grasshopper abgewickelt, die Vernetzung, FEM und die Erstellung des Lastfalls durch Karamba und letztlich die CAD-Wiedergabe durch Rhinoceros (s. Abb. 3.8).

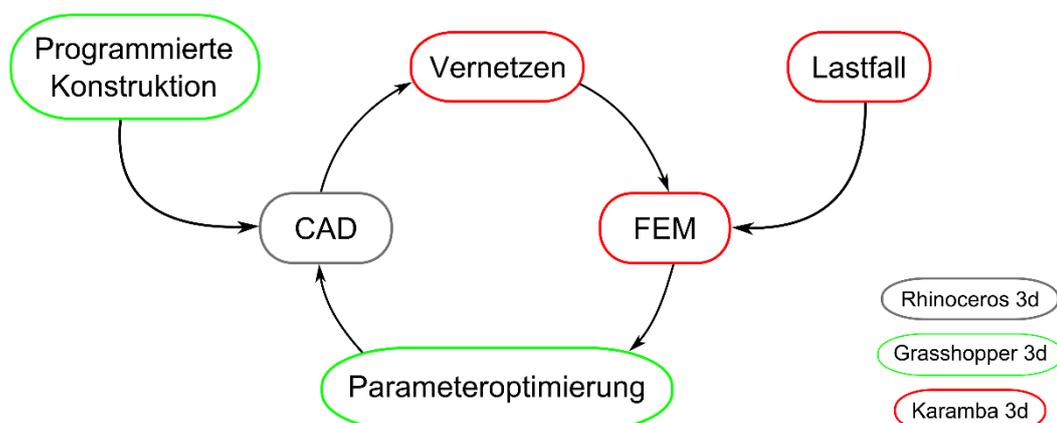


Abb. 3.8 Schematischer Ablauf unter Angabe der genutzten Programme einer Parameteroptimierung. Die Legende rechts unten ordnet den Farben ein Programm zu (verändert nach Haufe, 2011).

3.10 Kennwerte der Auswertung

Tab. 3.2 Formelzeichen und deren Bedeutung samt Einheit für die Kennwerte der Auswertung.

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
Δm	%	Massendifferenz
m_B	kg	Masse des bionischen Modells
m_R	kg	Masse des Referenzmodells
A	%	Auslastung
σ	N/m ²	Spannung (Von-Mises)
R_e	N/m ²	Streckgrenze
Δs	N/m ²	Erster Spannungskennwert, Diff. von s_B und s_R
ΔA	N/m ²	Zweiter Spannungskennwert, Diff. von A_{maxB} und A_{maxR}
Δe	N/m ²	Dritter Spannungskennwert, Diff. von e_B und e_R
s_B	-	Standardabweichung der Auslastungen des bionischen Modells
s_R	-	Standardabweichung der Auslastungen des Referenzmodells
A_{maxB}	N/m ²	Maximale Auslastung des bionischen Modells
A_{maxR}	N/m ²	Maximale Auslastung des Referenzmodells
e_B	%	Anzahl der Elemente des bionischen Modells in den oberen 20 % Auslastung zur Gesamtelementanzahl
e_R	%	Anzahl der Elemente des Referenzmodells in den oberen 20 % Auslastung zur Gesamtelementanzahl

Für die Bewertung der optimierten Modelle ergeben sich anhand der nach Tab. 3.2 genutzten Formelzeichen und Einheiten die nachfolgenden Kennwerte.

Für die Auswertung der Massen ist die prozentuale Massendifferenz gegeben durch:

$$\Delta m = \frac{100 \times m_B}{m_R} - 100. \quad (3.5)$$

Die Auslastung beläuft sich auf die nachstehende Formel:

$$A = \frac{100 \times \sigma}{R_e}. \quad (3.6)$$

Für die Auswertung der Spannungen bzw. Auslastungen ergeben sich folgende drei Kennwerte: Der erste Kennwert stellt die prozentuale Differenz der Standardabweichung der Auslastungen des bionischen Modells und des dazugehörigen Referenzmodells dar (s. Gleichung (3.7)). So kleiner ein Wert für die Standardabweichung eines Modells ist, so mehr gleicht die Verteilung der Auslastungen einer homogenen Spannungsverteilung.

$$\Delta s = \frac{100 \times s_B}{s_R} - 100 \quad (3.7)$$

Der zweite Kennwert beschreibt die prozentuale Differenz der maximalen Auslastungen (s. Gleichung (3.8)).

$$\Delta A = \frac{100 \times A_{maxB}}{A_{maxR}} - 100 \quad (3.8)$$

Der dritte und letzte Spannungskennwert gibt die prozentuale Differenz der Elementanzahlen der obersten 20 % Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl wieder (s. Gleichung (3.9)). So kleiner die Elementanzahl der obersten 20 % Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl ist, so eher kann davon ausgegangen werden, dass weniger hohe Spannungsbereiche im Modell vorhanden sind.

$$\Delta e = \frac{100 \times e_B}{e_R} - 100 \quad (3.9)$$

4 Ergebnisse

4.1 Verifikation der FEM-Simulation

Durch Einsetzen nach den Gleichungen (3.1) bis (3.4) ergeben sich die Ergebnisse der theoretischen maximalen Durchbiegung. Zudem sind die jeweiligen maximalen Verformungen der Simulation und die prozentualen Abweichungen in Tab. 4.1 ersichtlich. Die Netzauflösung beläuft sich bei der Kreislast auf 0,01 und bei allen anderen auf 0,02. Im Lastfall Torsion ergibt die FEM in Ansys in Relation zu Karamba 0,4 % Abweichung.

Tab. 4.1 Ergebnisse der Plausibilitätsrechnungen. Die Verformungen sind relativ zur Modellseitenlänge (1m).

Lastfall	Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Maximale Verformung der FEM	1,41E-2	1,19E-2	7,8E-2	1,25E-3
Maximale theoretische Verformung	1,8E-2	1,18E-2	7,44E-2	1,2E-3
Prozentuale Abweichung	21,6	0,85	5,4	3,7

4.2 Flächenversteifungen bei Diatomeen

Zum näheren Verständnis folgt in diesem Abschnitt eine Erläuterung der strukturellen Eigenschaften von Diatomeen hinsichtlich flächenversteifender Effekte. Da eine hierarchische Strukturierung eine Adaption und Optimierung des Materials auf jeder Ebene der Hierarchie für eine optimale Konstruktion ermöglicht, werden die strukturellen Eigenschaften der Diatomeen in sechs Ebenen gegliedert (Fratzl, 2007). Zudem ist eine höhere Anzahl von Hierarchieebenen mit einer erhöhten Materialeffizienz gleichzusetzen, insbesondere fraktale Modelle bestätigen diese Aussage (Degischer und Lüftl, 2009, S. 1). Ebenso sind nach Mattheck (1989) biologische Bauteile, so auch die Schalen von Diatomeen, nach dem Prinzip homogener Spannung optimiert.

Bei Diatomeen können unterschiedliche flächenversteifende Eigenschaften identifiziert werden (s. Abb. 4.1). Beim Aufbau einer Diatomeenschale ist zunächst stets ein geschlossenes Profil zu erkennen, geformt durch zwei Schalenhälften, um einen optimalen Membranspannungszustand bei eintretenden Lasten zu entwickeln (Dankert und Dankert, 2011, S. 455). Des Weiteren ist jede Schalenhälfte stets gebördelt, wie aus Abschnitt 2.2 bekannt erhöht dieses den Widerstand gegen Beulen und Verformung. Betrachtet man auf den folgenden makroskopischen und mikroskopischen Ebenen definierte Bauelemente der Schale, werden drei wesentliche Anordnungsweisen ersichtlich, die fraktale (selbstähnliche), die parallele und die versetzte Anordnung.

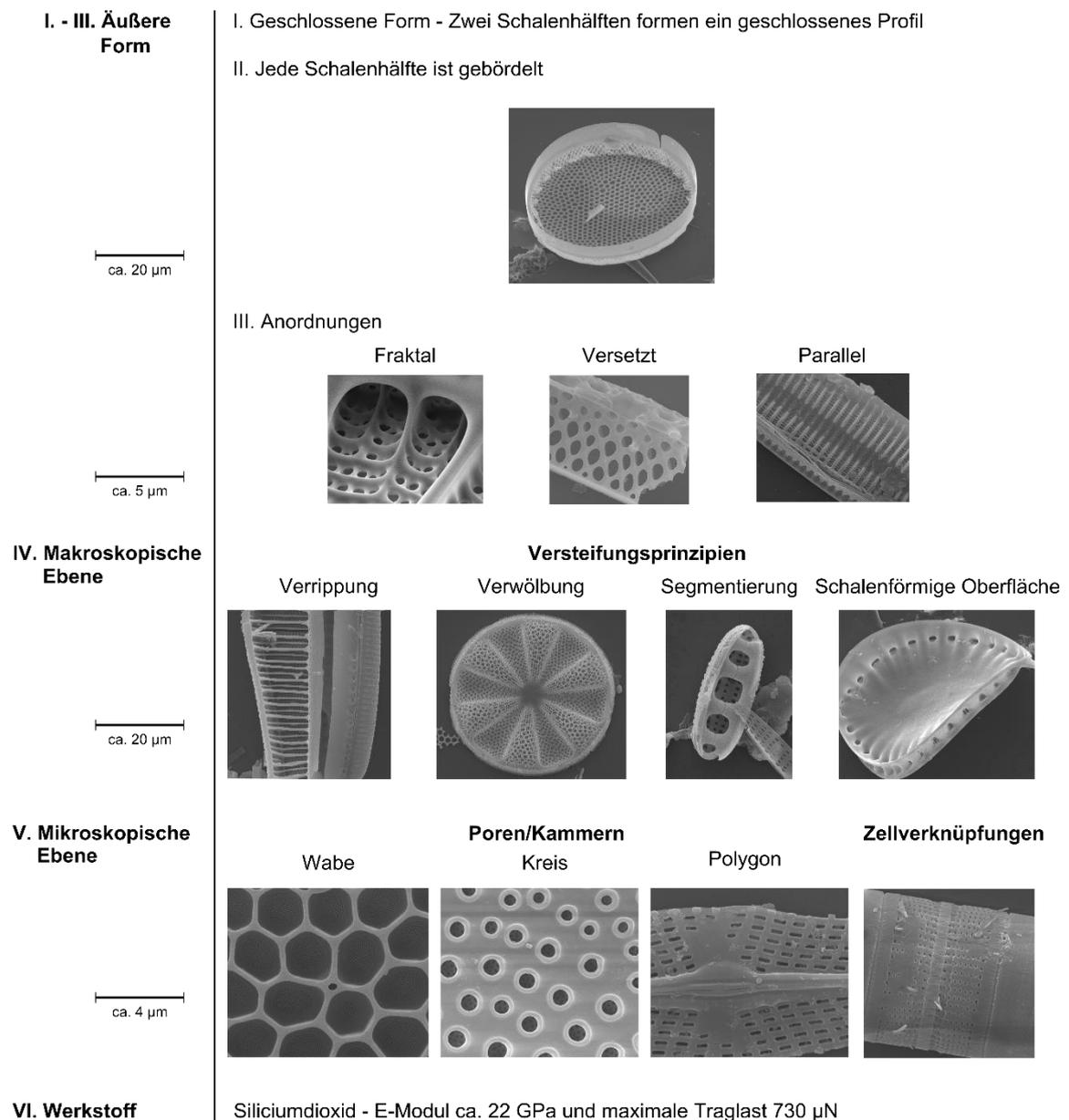


Abb. 4.1 Hierarchische Gliederung der Flächenversteifung bei Diatomeen. Links sind die jeweiligen Ebenen und der Maßstab für die rechts angegliederten Bilder angegeben. Rechts sind die Schalenstrukturen von Diatomeen den Ebenen zugeteilt.

Des Weiteren treten unterschiedliche Versteifungsprinzipien auf makroskopischer Ebene auf. So tragen Rippen, Wölbungen, Segmentierung und schalenförmige Oberflächen zur Versteifung der Gesamtstruktur bei. Auf mikroskopischer Ebene sind weiterhin die Poren bzw. Kammern gehäuft in Waben-, Kreis- oder Polygonform auffindbar. Ebenfalls sind Zellverknüpfungen durch Formschluss bei Diatomeen zu lokalisieren.

Auf der letzten Ebene trägt der Werkstoff zur Versteifung der Diatomee bei. So weist das Siliziumdioxid ein E-Modul von ca. 22 GPa und die Schale eine mögliche Traglast von bis zu 730 μN auf (Hamm et al., 2003). Diese Kennwerte zeigen ein versteifende Effekte und eine verringerte Verformung als Wirkung auf.

In den nachfolgenden Unterkapiteln des Abschnitts Ergebnisse werden die einzelnen bionischen Flächenversteifungsmodelle vorgestellt. Diesbezüglich wird zunächst jeweils das biologische Vorbild, deren Abstraktion und schließlich das parametrische Modell und das dazugehörige Referenzmodell erläutert.

4.3 Modell 1 – Verknüpfte Rippe

4.3.1 Vorbild und deren Abstraktion

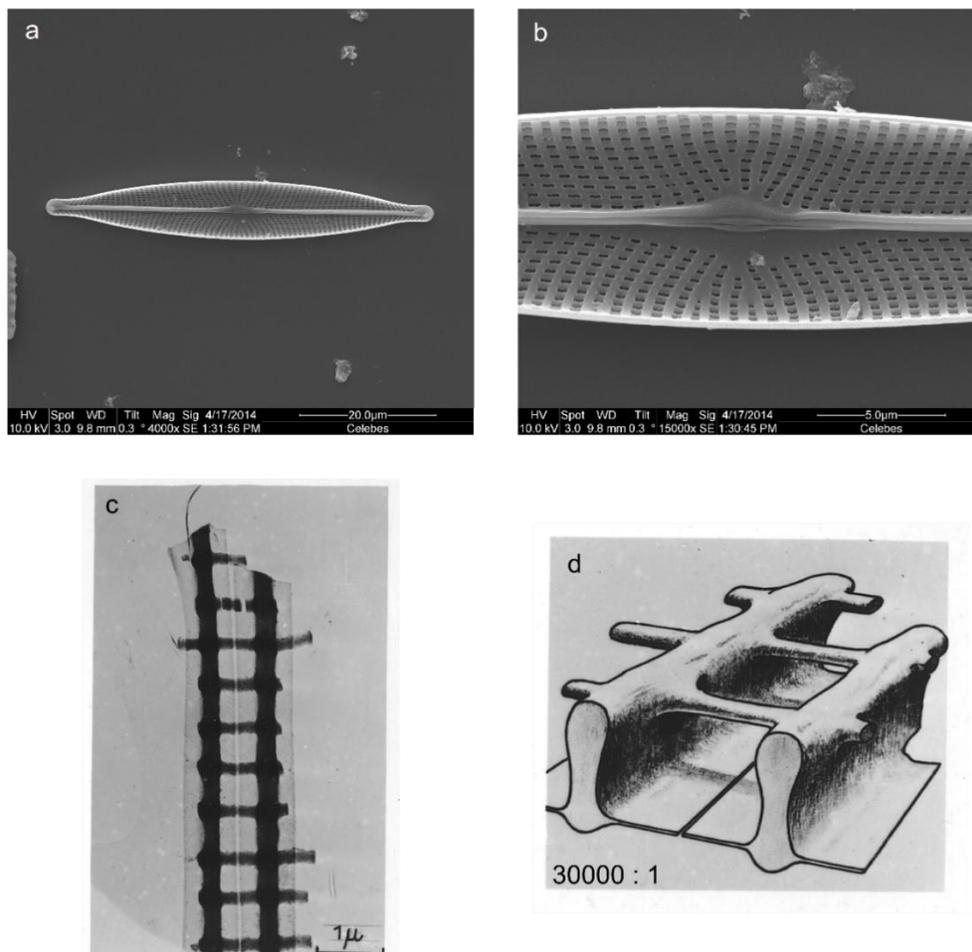


Abb. 4.2 Das ausgewählte biologische Vorbild *Navicula spec.* für das Modell verknüpfte Rippe. (a) und (b) REM-Aufnahmen in der Draufsicht. (c) Schalenbruchstück (Helmcke und Krieger, 1963, S. 173). (d) Abstrahierte Rekonstruktionszeichnung des Bruchstücks (ebd., S. 173).

Das erste von vier Modellen wird als verknüpfte Rippe bezeichnet. Als biologisches Vorbild dient *Navicula spec.* (s. Abb. 4.2). Als Pennate besitzt diese Gattung eine längliche Form und weist zur Raphe näherungsweise orthogonal verlaufende Rippen auf. Wie aus der Abbildung ersichtlich sind wiederum diese Rippen im Verhältnis zur Rippe über dünne Streben miteinander verbunden. Die den Streben gegenüberliegende Seite bildet eine flächige Struktur aus. Anhand dieser Struktur soll untersucht werden, ob Rippen mit oder

ohne diesen verknüpften Streben bei gleicher Steifigkeit leichter sind. Bei einer auf die flächige Seite orthogonal eingreifenden Kraft verleihen die Streben den Rippen eine höhere Steifigkeit, da im Bereich der Streben Zugspannungen auftreten. Wiederum können auf der Seite der Streben eingeleitete Kräfte eher kompensiert werden, da durch die Verknüpfungsstreben eine höhere Steifigkeit vorhanden ist als ohne.

4.3.2 Parametrische Modelle

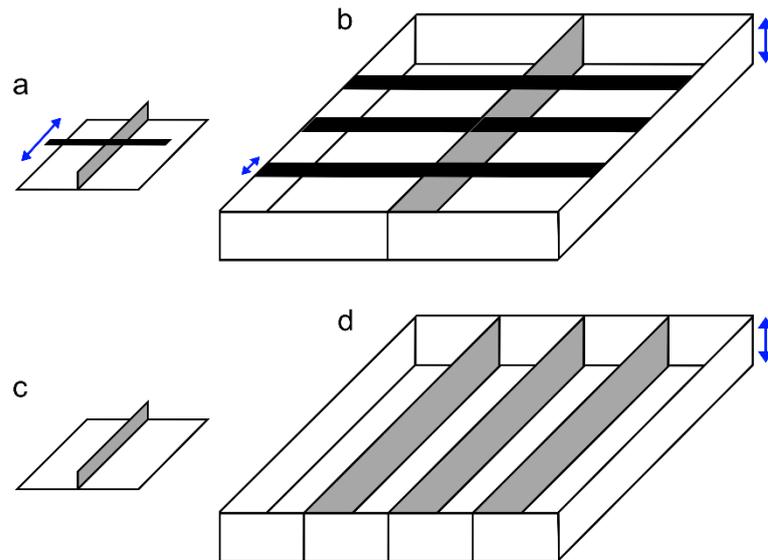


Abb. 4.3 Die parametrischen Modelle für die verknüpfte Rippe. Die blauen Pfeile stellen einige der variablen Parameter dar. (a) Das einzelne Versteifungselement, welches mehrfach auf die Fläche des Modells angewendet werden kann. (b) Eine mögliche Konfiguration des bionisch entwickelten Modells. (c) Das Versteifungselement für das Referenzmodell. (d) Eine mögliche Konfiguration des parametrischen Referenzmodells.

In diesem Abschnitt wird das parametrisch aufgebaute Modell und das dazugehörige Referenzmodell samt der Parameter erläutert. Dieses Modell wird mit der Methode Boxmorph erstellt (für nähere Erläuterungen s. Abschnitt 3.3). In Abb. 4.3 ist sowohl das parametrische Modell, wie es aussehen könnte, als auch das einzelne Versteifungselement, welches mit der Methode Boxmorph auf das Modell angewendet wird, dargestellt. Ebenso ist das parametrische Referenzmodell und wiederum das Versteifungselement abgebildet. Wie in Abschnitt 2.2.1 dargelegt bildet die einfache Rippe eine Referenz, die dem Stand der Technik entspricht.

Als Parameter dienen für das bionische Modell, die Höhe der Rippe, die Breite der Strebe und deren relative Positionen zueinander in einem jeden Versteifungselement. Des Weiteren ist wie auch bei allen folgenden Modellen die Dicke der Schalenelemente ein Parameter. Dabei hat stets die ebene geschlossene Fläche und die restliche Struktur, im Folgenden als Versteifungsstruktur bezeichnet, jeweils eine Dicke als Parameter. Zudem sind bei allen

Modellen, welche mit der Methode Boxmorph erstellt sind, die Anzahl der Zielboxen in die zwei Ebenenrichtungen variabel. Des Weiteren ist eine Drehung des gesamten Modells um 90° möglich, so dass die Lagerung auf die nächst freie Kante der Fläche wechselt. Im Anhang sind die Parameter tabellarisch für jedes Modell aufgelistet.

4.4 Modell 2 – Versteifte Rippe

4.4.1 Vorbild und deren Abstraktion

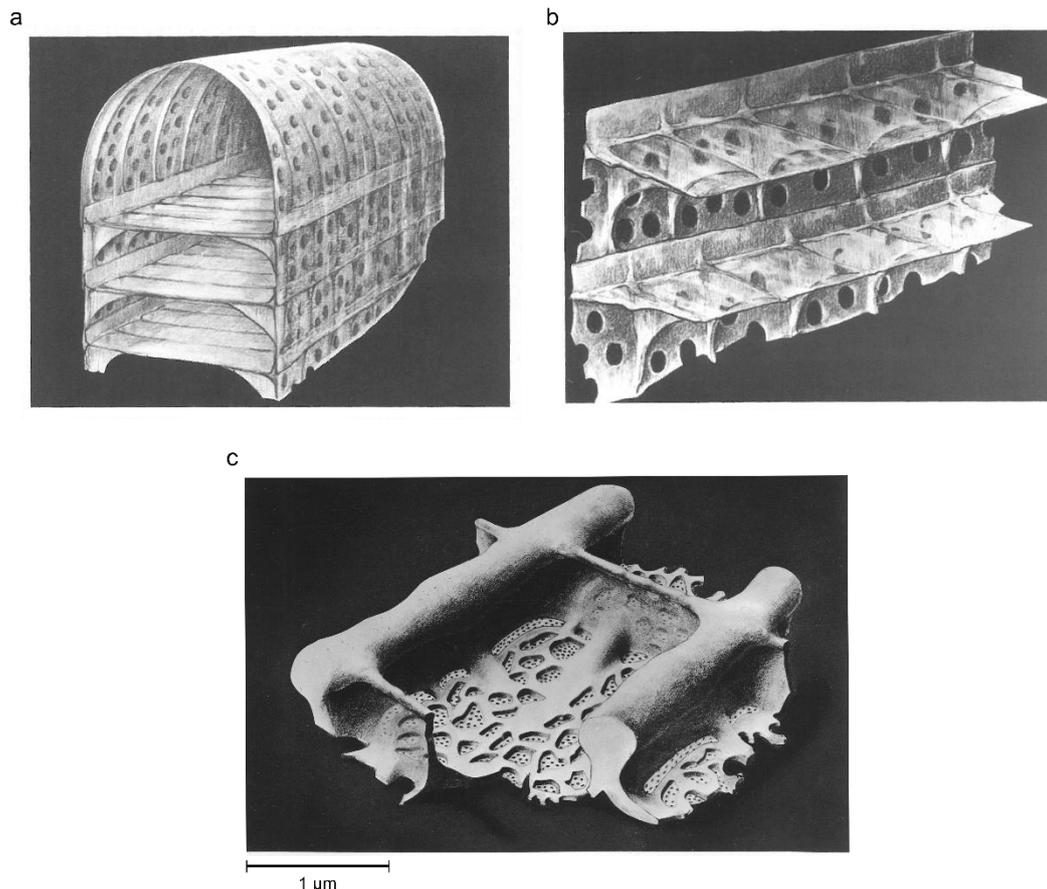


Abb. 4.4 Die biologischen Vorbilder anhand von abstrahierten Zeichnungen für das Modell versteifte Rippe. (a) Pervalvare Schalenquerschnitte von *Rhabdonema adriaticum* (Helmcke und Krieger, 1963, S. 354). (b) Gürtelbandausschnitt von (a) (ebd., S. 355). (c) Membrankammer von *Surirella gemma* (ebd., S. 100).

Modell 2 ist inspiriert von der Diatomee *Rhabdonema adriaticum* und dessen Gürtelregion. Wie in Abb. 4.4 ersichtlich sind in diesem Bereich mehrere Ebenen wiederholender Versteifungsdreiecke zwischen den orthogonal zueinanderstehenden Flächen angebracht. Des Weiteren besitzt die freie Kante dieser Dreiecke eine gebogene Form. Ebenso sind ähnliche Elemente an den Rippen von *Surirella gemma* aufzufinden. Die Vermutung liegt nahe, dass durch diese Versteifungsstrukturen der Einfluss der Rippe bzw. Fläche auf die Gesamtsteifigkeit erhöht wird. So gewinnt ebenso die Rippe bzw. Fläche wie auch die angegliederten Strukturen an Steifigkeit. Ebenfalls ist die Wirkfläche der Rippe, in der sie

schließlich z.B. das Entstehen von Beulen verhindert, deutlich vergrößert. Durch diese Elemente und deren Wirkung können letztlich weniger Rippen eingesetzt werden. Letztere These wird anhand der Optimierungen erörtert.

4.4.2 Parametrische Modelle

Wie das vorherige Modell wird auch dieses mit der Methode Boxmorph erstellt. In Abb. 4.5 sind jeweils das bionische Modell und das Referenzmodell dargestellt. Die Rippe wird von einer variablen Anzahl von stets in Paaren auftretenden Versteifungselementen unterstützt. Ebenso sind die Anzahl der Rippen und deren Höhe Parameter. Die Versteifungselemente können ebenfalls ihre Tiefe und Höhe unabhängig von der Rippenhöhe ändern. Des Weiteren ist die Biegung der freien Kante variabel. Das Referenzmodell stellt sich als einfache dem Stand der Technik entsprechende Rippenstruktur dar. Zudem sind die Dicke der Ebene und die Dicke der restlichen Struktur und eine Drehung des Gesamtmodells um 90° Parameter.

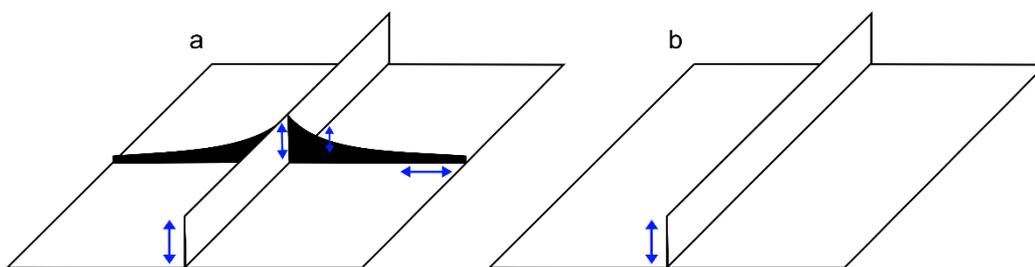


Abb. 4.5 Die parametrischen Modelle für die versteifte Rippe. Die blauen Pfeile stellen einige der variablen Parameter dar. (a) Das bionisch entwickelte Modell wie es als einzelnes Element mehrfach mit der Methode Boxmorph auf eine Fläche aufgebracht werden kann. (b) Das parametrische Referenzmodell unter selbiger Methodik verwendet.

4.5 Modell 3 - Schalennachbildung

4.5.1 Vorbild und deren Abstraktion

Modell 3 hat weniger die eine, sondern vielmehr die Diatomee an sich als biologisches Vorbild. Wie im Abschnitt 2.1 bereits beschrieben, besteht jede Diatomee aus zwei Halbschalen. Eine Halbschale stellt sich abstrahiert als Fläche mit einer gebördelten Kante dar. Es soll folglich untersucht werden, ob solche Strukturen bereits eine versteifende Wirkung auf die stets gegenüberliegende Fläche der Halbschale hat. Dabei kann diese Struktur Wölbungen hervorbringen, wie sie in Abb. 4.6 (b) und (c) zu erkennen sind. Von weiterer Bedeutung ist, dass sich gewölbte Strukturen nicht nur auf makroskopischer Ebene

ausbilden, sondern ebenfalls wie in Abb. 4.6 (a) auf mikroskopischer Ebene in der Porenstruktur zeigen. So sind diese Poren nicht zweidimensional (planar), sondern weisen mit ihrer Wölbungen drei Raumrichtungen auf.

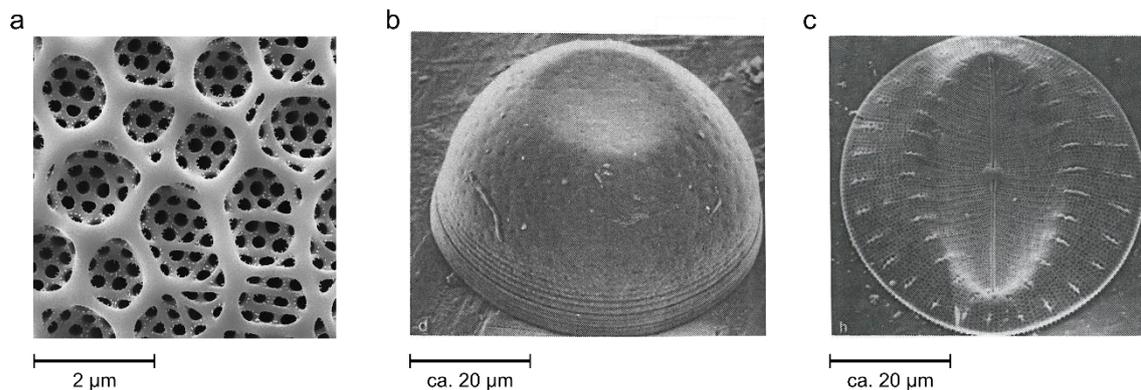


Abb. 4.6 Die biologischen Vorbilder für das Modell Schalennachbildung. (a) Detail-REM-Aufnahme der Porenstruktur von *Actinoptychus* spec. (ELiSE, 2014). (b) REM-Aufnahme einer Halbschale von *Podosira* spec. (Round et al., 1990, S. 164). (c) REM-Aufnahme der Valve von *Campyloneis* spec. in der Draufsicht (ebd., S. 507).

4.5.2 Parametrische Modelle

Das bionische Modell abstrahiert sich zu einer Wölbstruktur, welche aus drei Kreisen, deren Höhe und Durchmesser variabel sind, konstruiert wird. Mit der Funktion Loft wird in Grasshopper vom untersten Kreis zu dem obersten Kreis und über einen dazwischen liegenden Kreis eine Fläche generiert. Zudem sind zur weiteren Stabisilierung in der Mitte jeder Kante Versteifungsflächen, deren Höhe gleich der des mittleren Kreises ist. Die in Abb. 4.7 dargestellten Strukturen stellen die einzelnen Elemente dar, die wiederum mehrfach mit der Methode Boxmorph auf eine Fläche angewendet werden können. Anhand dieser Methode können die Kreise ebenfalls eine elliptische Form annehmen und auf diese Weise die morphologischen Formen der Pennaten abbilden. Wiederum werden stabilitätsschwache Zonen zwischen den Elementen durch die Versteifungsflächen minimiert.

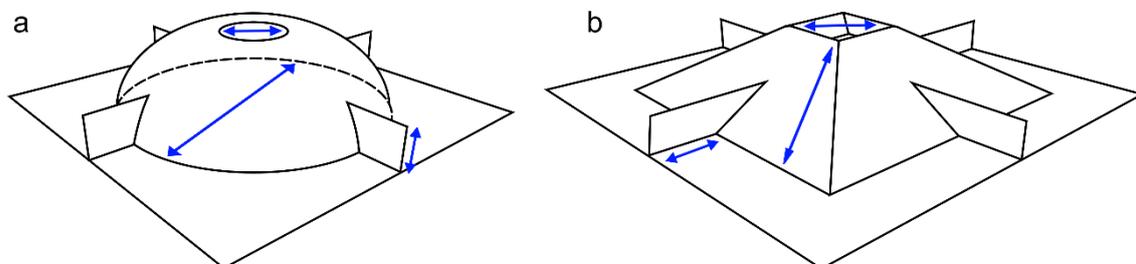


Abb. 4.7 Die parametrischen Modelle für das dritte Modell Schalennachbildung. Die blauen Pfeile stellen einige der variablen Parameter dar. (a) Das bionisch entwickelte Modell wie es als einzelnes Element mehrfach mit der Methode Boxmorph auf eine Fläche aufgebracht werden kann. (b) Das parametrische Referenzmodell unter selbiger Methodik verwendet.

Als Referenzmodell ergibt sich im Gegensatz zu den Freiformflächen des bionischen Modells eine Struktur, die einer vierseitigen und hohlen Pyramide mit abgeschnittener Spitze entspricht. Ebenso besitzt sie wie das bionische Modell vier äußere Versteifungsflächen. Durch dieses Modell wird versucht die bionische Struktur mit dem Stand der Technik zu vereinen, in dem sie sich in erster Linie aus planaren Flächen zusammensetzt. Sowohl die Größe der Grundfläche der Pyramide als auch die gegenüberliegende Öffnung sind Parameter. Des Weiteren ist die Höhe variabel und ebenfalls wie das bionische Modell besitzen die Ebene und die Versteifungsstruktur jeweils eine Dicke.

4.6 Modell 4 – Doppel-T-Wabe

4.6.1 Vorbild und deren Abstraktion

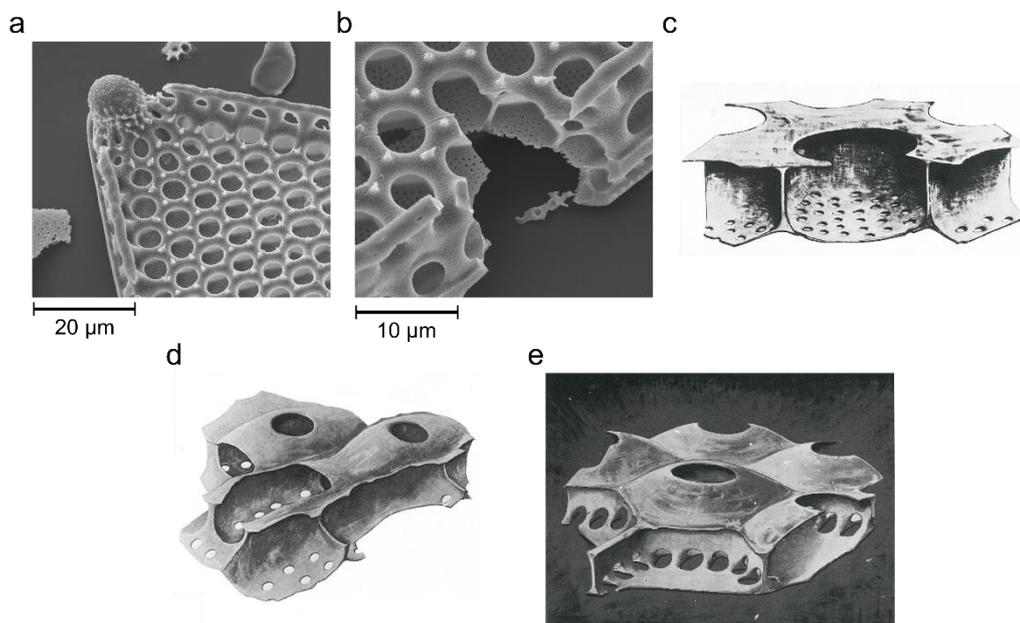


Abb. 4.8 Die biologischen Vorbilder für das Modell Doppel-T-Wabe. (a) und (b) REM-Aufnahmen der Diatomee *Triceratium* spec. (c) Abstraktion von (b) (Bach et al., 1984, S. 25). (d) Abstraktion von Kammern der Diatomee *Biddulphia* spec. (ebd., S. 90). (e) Abstraktion von Kammern der Diatomee *Biddulphia rhombus* (ebd., S. 93).

Modell 4 und folglich das letzte der vier entwickelten Modelle wird als Doppel-T-Wabe bezeichnet. Nach dem biologischen Vorbild *Triceratium* spec. und vielen weiteren Arten (z.B. *Thalssiosira* spec. oder *Coscinodiscus* spec.) wird die Grundform Wabe der Kammern identifiziert (s. Abb. 4.8 (a) - (c)). Des Weiteren ist ersichtlich, dass die einzelne Wabenkammer sowohl oben als auch unten geöffnet ist. Hieraus abstrahiert sich das Modell von Doppel-T-Trägern in der Anordnung von Waben. Außerdem kann bei der Gattung *Biddulphia* spec. und weiteren Arten erkannt werden, dass die an den Steg angrenzende Querfläche nicht eben, sondern nach außen gewölbt ist (s. Abb. 4.8 (e)). Folglich wird

untersucht, ob die geschlossene Wabensandwichstruktur gegenüber der bionischen besser ist. Die bionische gestaltet sich demnach ebenfalls als Wabensandwichstruktur, jedoch oben und unten mit Öffnungen in jeder Einzelkammer. Diese Materialeinbuße und somit Schwächung soll wiederum durch die Wölbungen kompensiert werden. Neben der Wabenstruktur wird des Weiteren eine Grundform identifiziert, die immer noch einer Wabe ähnelt, aber unter dem Aspekt des Winkels zwischen zwei Seitenflächen und deren gegenüberliegendem Paar annähernd an die 180° weicht. Es wird folglich ebenfalls untersucht, ob eine annähernde Rechteckform nach der Arbeitshypothese geeignet ist. Die Rechteck-Kammern sind dabei, wie in Abb. 4.8 (d) zu erkennen, um eine halbe Seitenlänge versetzt.

Standardmäßig sind Doppel-T-Träger gegen Kräfte die parallel zum Steg angreifen gut ausgelegt, jedoch weisen sie bei Torsion durch ihr offenes Profil einen geringen Widerstand auf. Durch mehrfache Anordnung, in der Regel orthogonal zueinander, sind diese wiederum auch gegen diese Lasten ausgelegt. Untersucht werden soll deshalb zudem, ob die Wabenanordnung sowohl gegen Querlasten als auch Torsion geeignet ist.

4.6.2 Parametrische Modelle

Die parametrischen Modelle für das Modell Doppel-T-Wabe werden im Gegensatz zu den ersten drei Modellen mit der Methode Voronoi konstruiert (s. Abschnitt 3.3). Als Parameter ergibt sich eine Dicke für den Steg und für die Deckschichten. Für das bionische Modell wird weiterhin die Stärke der Wölbung jeweils für unten und oben parametrisiert, gleiches gilt für die Größe der Öffnungen (s. Abb. 4.9 auf der nachfolgenden Seite). Für den Vergleich wird als Referenzmodell eine geschlossene Sandwichstruktur mit planaren Deckschichten genutzt. Für beide Modelle sind weiterhin die Höhe und die Anzahl der Waben in die beiden Ebenenrichtungen variabel. Zudem wird eine Drehung des Gesamtmodells bei konstanten Randbedingungen um 90° als Parameter ermöglicht.

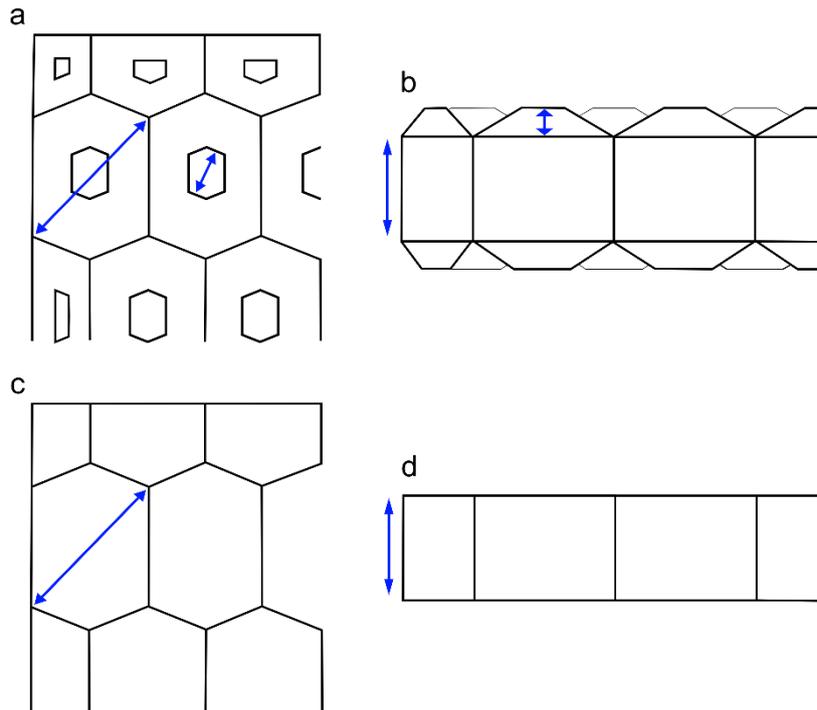


Abb. 4.9 Die parametrischen Modelle für das vierte Modell Doppel-T-Wabe. Die blauen Pfeile stellen einige der variablen Parameter dar. (a) Draufsicht einer möglichen Konfiguration des bionisch entwickelten Modells. (b) Seitenansicht von (a). (c) Eine mögliche Konfiguration des parametrischen Referenzmodells in der Draufsicht. (d) Seitenansicht von (c).

4.7 Optimierungsergebnisse

4.7.1 Modell 1 – Verknüpfte Rippe

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Parameteroptimierung für das Modell verknüpfte Rippe dargestellt. Exemplarisch beschreibt Abb. 4.10 das Konvergenzverhalten der insgesamt acht Parameteroptimierungen der Modellreihe verknüpfte Rippe durch eine Gegenüberstellung der geringsten Masse einer jeden Generation. Für die weiteren Modelle sind diese Abbildungen im Anhang platziert. In Abb. 4.11 sind die Konstruktionen für das Modell verknüpfte Rippe dargestellt. Die Massendifferenzen sind stets in Relation zum Referenzmodell. So ist das bionische Modell für den Lastfall Torsion um 5,87 % leichter als das dazugehörige Referenzmodell, aber um 0,85 % schwerer für den Lastfall Kreislast. Abb. 4.12 stellt die absoluten Massen als Balkendiagramm dar. Abb. 4.13 wiederum gibt die prozentualen Unterschiede der Spannungsergebnisse wieder.

Im Anhang sind jeweils die absoluten Ergebnisse der Massen, Spannungskennwerte und maximalen Verformungen tabellarisch aufgelistet. Des Weiteren sind die Parameter und ihre optimierten Endresultate sowohl tabellarisch als auch grafisch dargestellt.

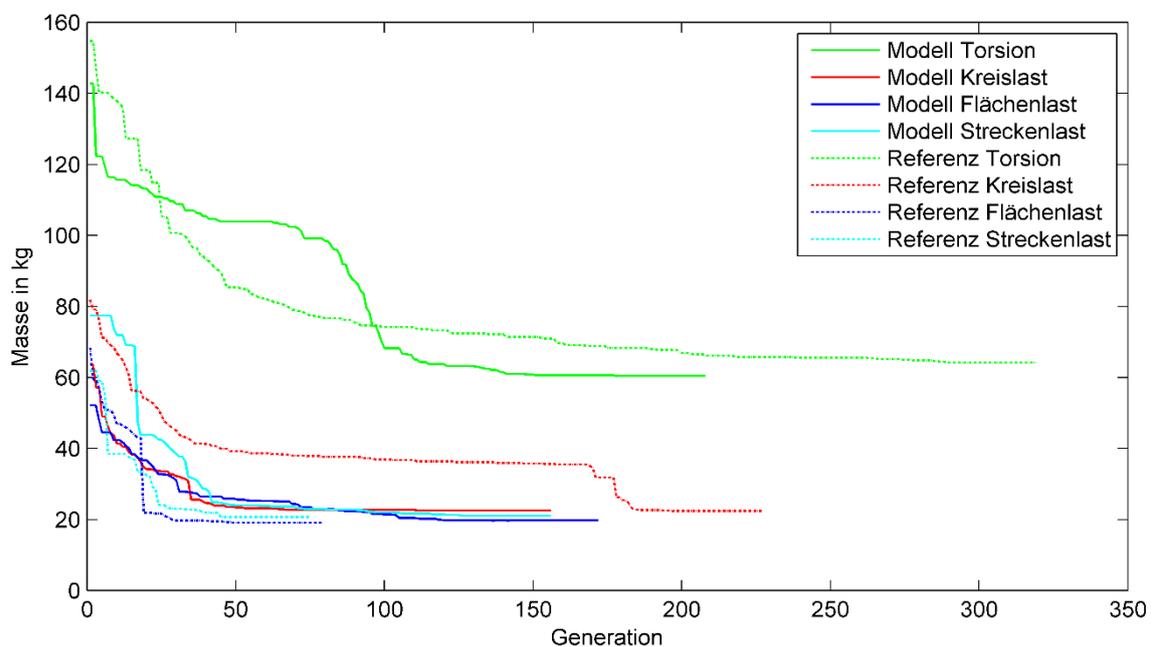


Abb. 4.10 Darstellung der geringsten Massen für jede Generation der Parameteroptimierung für das Modell verknüpfte Rippe.

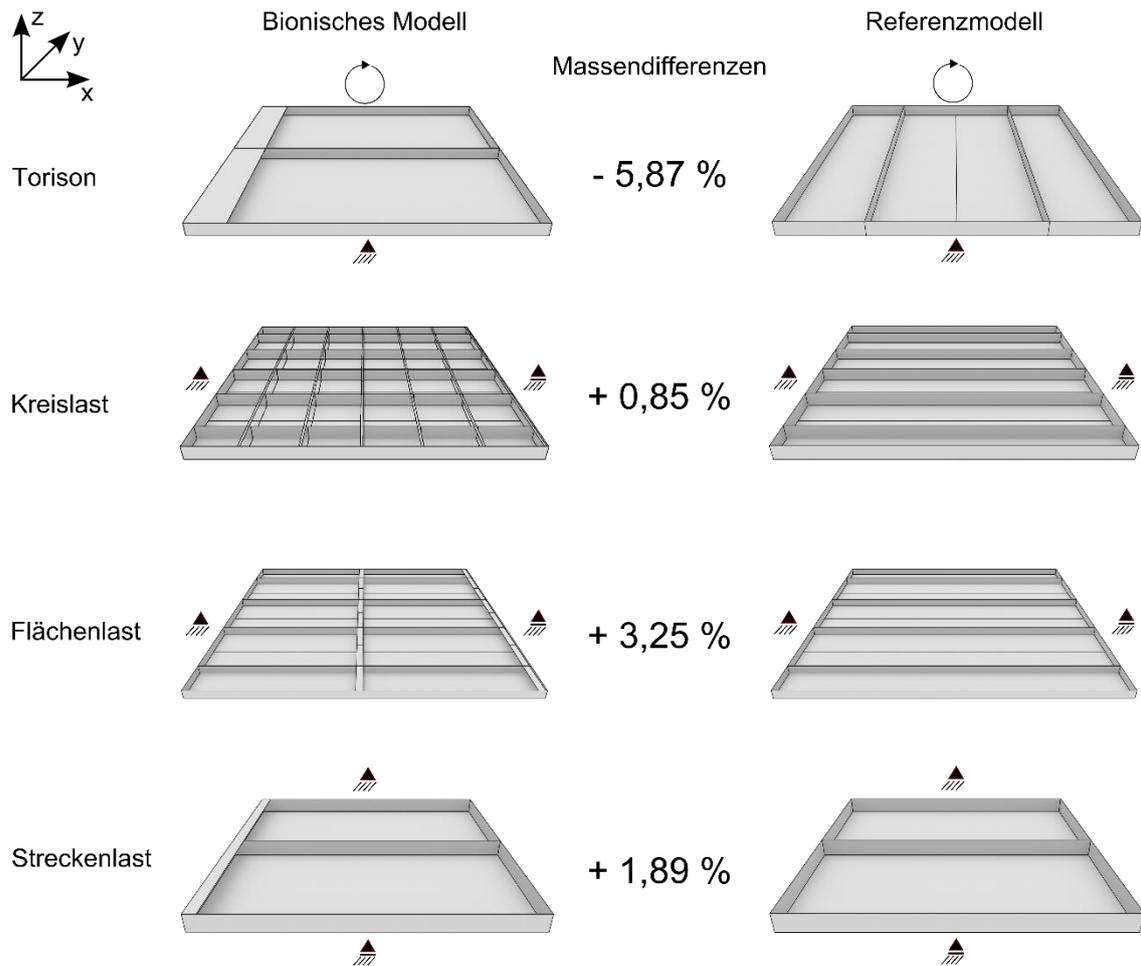


Abb. 4.11 Die parameteroptimierten Konstruktionen für das Modell verknüpfte Rippe nach Lastfall (links) gegliedert. Die bionischen Modelle sind auf der linken Seite, deren jeweiliges Referenzmodell auf der rechten Seite dargestellt. In der Mitte ist die jeweilige Massendifferenz des bionischen Modells in Relation zum Referenzmodell aufgelistet. Des Weiteren sind die gelagerten Kanten durch entsprechende Lagersymbole und das Drehmoment im Lastfall Torsion durch einen Kreisfeil gekennzeichnet.

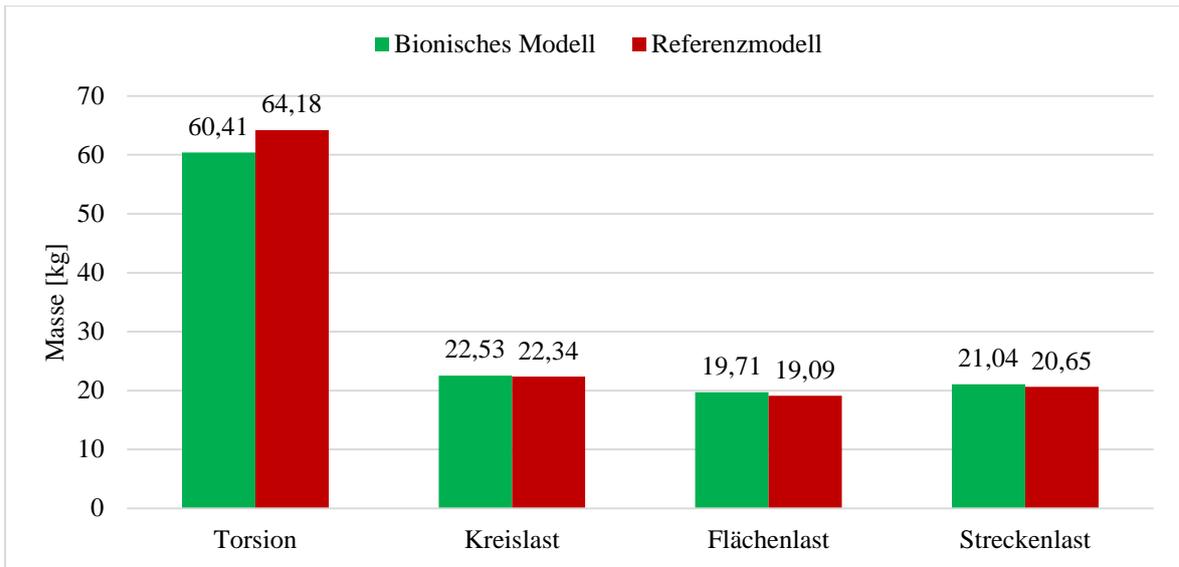


Abb. 4.12 Diagramm der absoluten Massen für das Modell verknüpfte Rippe jeweils für die vier Lastfälle.

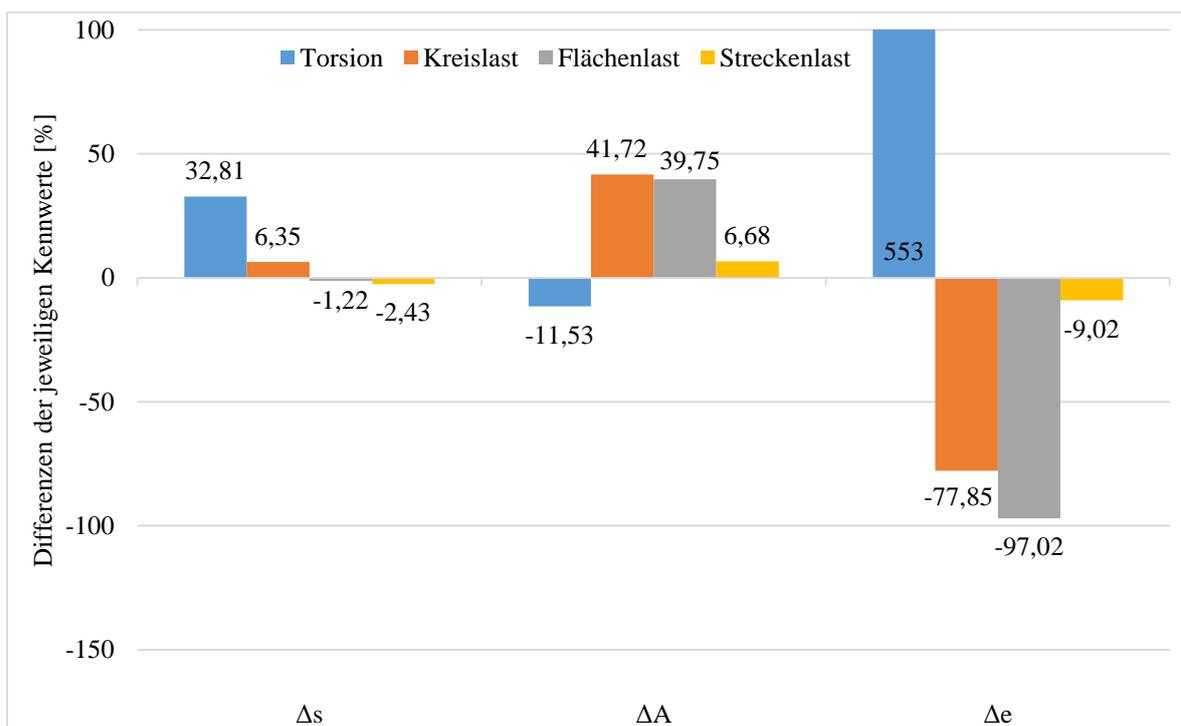


Abb. 4.13 Diagramm der Spannungsergebnisse für das Modell verknüpfte Rippe für die vier Lastfälle. Der erste Spannungskennwert (links) ergibt sich aus der Standardabweichung der Auslastungen für das jeweilige bionische Modell subtrahiert mit der Standardabweichung der Auslastungen für das entsprechende Referenzmodell. Der zweite Spannungskennwert (mittig) spiegelt die Differenz der maximalen Auslastungen wieder. Der dritte Spannungskennwert (rechts) gibt Auskunft über die Differenz der Elementanzahl der obersten 20 % Auslastung in Relation seiner Gesamtelementanzahl für das bionische Modell subtrahiert mit dem Wert des Referenzmodells. Alle Differenzen sind in prozentualer Einheit angegeben.

4.7.2 Modell 2 – Versteifte Rippe

Nach demselben Aufbau wie Abschnitt 4.7.1 folgen nun die Ergebnisse von dem Modell versteifte Rippe. In Abb. 4.14 sind die optimierten Konstruktionen dargestellt. Abb. 4.15 stellt die absoluten Massen und Abb. 4.16 die Spannungskennwerte der Modelle als Diagramm gegenüber. Im Anhang sind des Weiteren die absoluten Ergebnisse der Masse, Spannungskennwerte, maximalen Verformung und der Parameter tabellarisch aufgelistet.

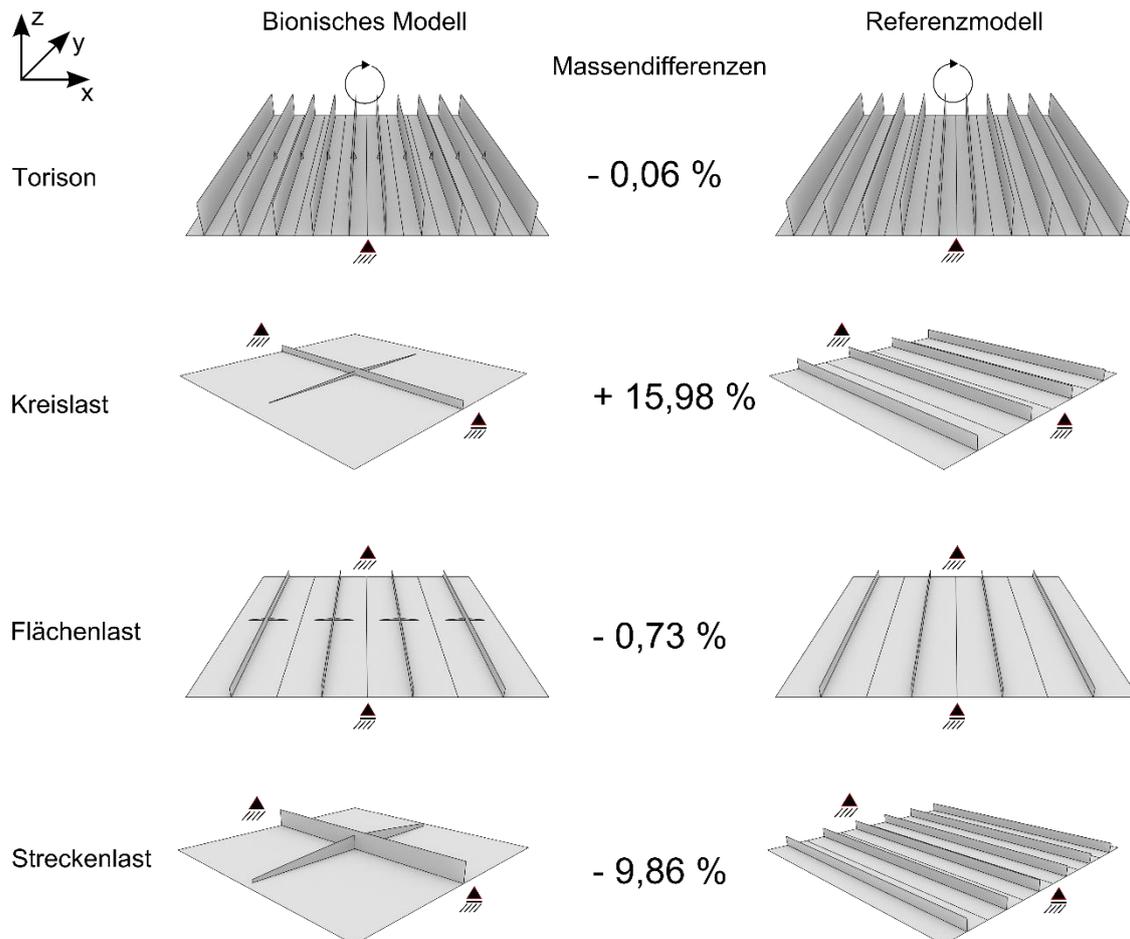


Abb. 4.14 Die parameteroptimierten Konstruktionen für das Modell versteifte Rippe nach Lastfall (links) gegliedert. Die bionischen Modelle sind auf der linken Seite, deren jeweiliges Referenzmodell auf der rechten Seite dargestellt. In der Mitte ist die jeweilige Massendifferenz des bionischen Modells in Relation zum Referenzmodell aufgelistet. Des Weiteren sind die gelagerten Kanten durch entsprechende Lagersymbole und das Drehmoment im Lastfall Torsion durch einen Kreis Pfeil gekennzeichnet.

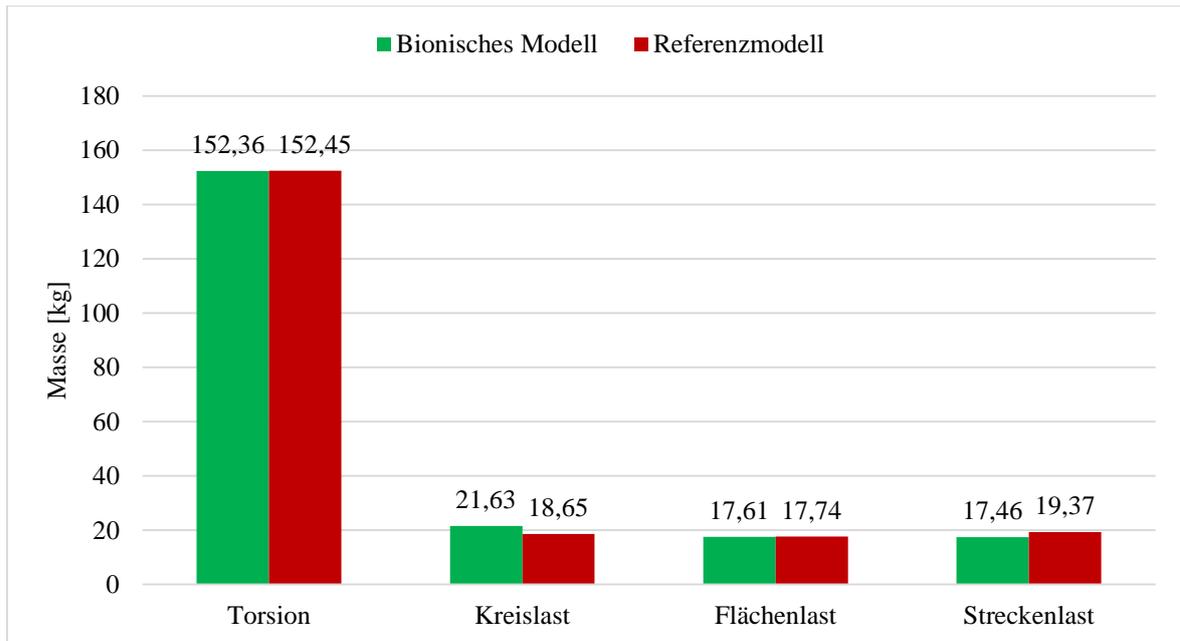


Abb. 4.15 Diagramm der absoluten Massen für das Modell versteifte Rippe jeweils für die vier Lastfälle.

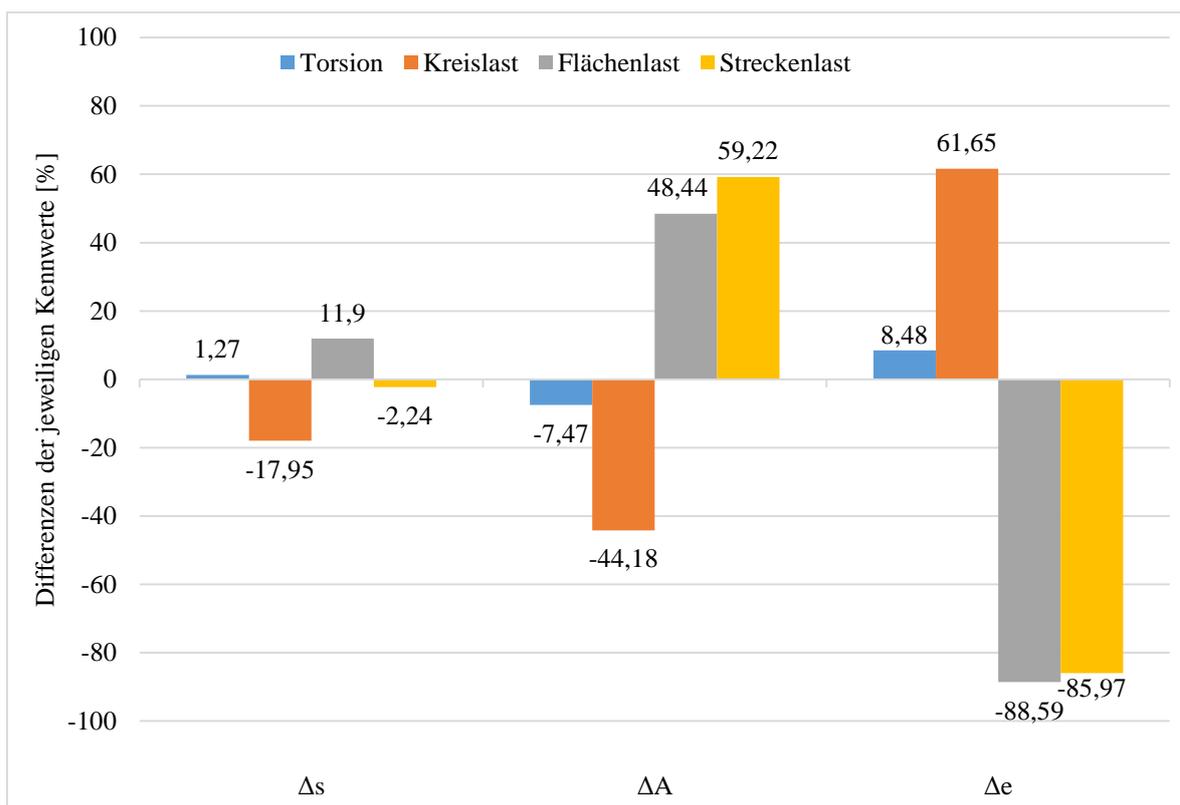


Abb. 4.16 Diagramm der Spannungsergebnisse für das Modell versteifte Rippe für die vier Lastfälle. Der erste Spannungskennwert (links) ergibt sich aus der Standardabweichung der Auslastungen für das jeweilige bionische Modell subtrahiert mit der Standardabweichung der Auslastungen für das entsprechende Referenzmodell. Der zweite Spannungskennwert (mittig) spiegelt die Differenz der maximalen Auslastungen wieder. Der dritte Spannungskennwert (rechts) gibt Auskunft über die Differenz der Elementanzahl der obersten 20 % Auslastung in Relation seiner Gesamtelementanzahl für das bionische Modell subtrahiert mit dem Wert des Referenzmodells. Alle Differenzen sind in prozentualer Einheit angegeben.

4.7.3 Modell 3 – Schalennachbildung

Die Ergebnisse für das Modell Schalennachbildung ergeben nach Abb. 4.20 die dargestellten optimierten Konstruktionen. Abb. 4.21 stellt zudem als Balkendiagramm die absoluten Massen dar, Abb. 4.22 die Spannungskennwerte. Wiederum sind im Anhang die absoluten Ergebnisse der Masse, Spannungskennwerte, maximalen Verformung und der Parameter vermerkt.

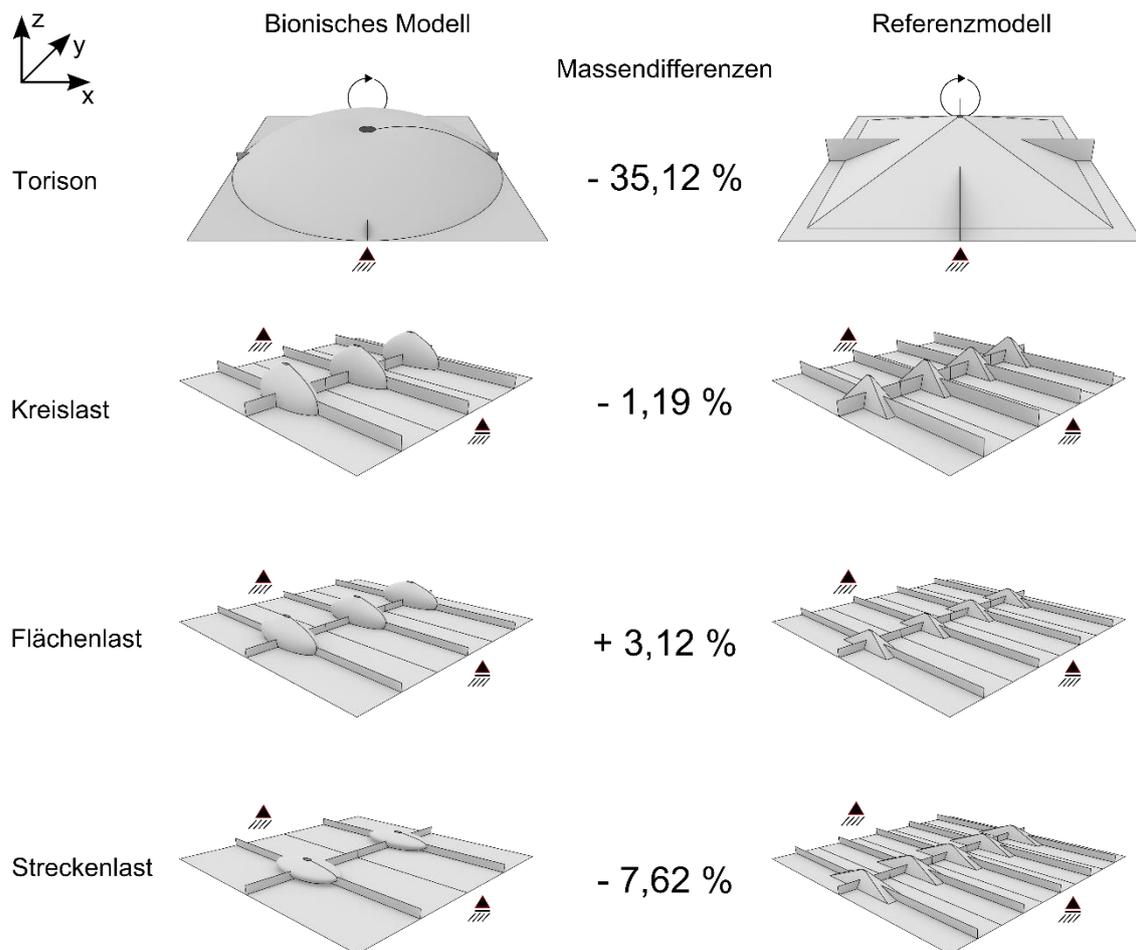


Abb. 4.17 Die parameteroptimierten Konstruktionen für das Modell Schalennachbildung nach Lastfall (links) gegliedert. Die bionischen Modelle sind auf der linken Seite, deren jeweiliges Referenzmodell auf der rechten Seite dargestellt. In der Mitte ist die jeweilige Massendifferenz des bionischen Modells in Relation zum Referenzmodell aufgelistet. Des Weiteren sind die gelagerten Kanten durch entsprechende Lagersymbole und das Drehmoment im Lastfall Torsion durch einen Kreisfeil gekennzeichnet.

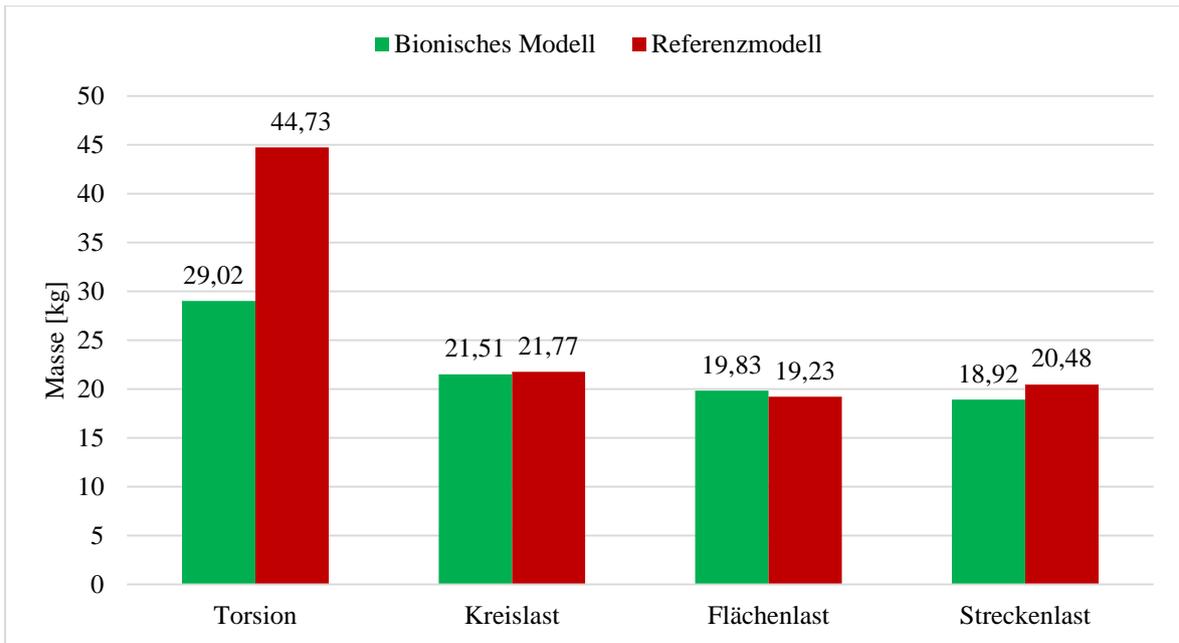


Abb. 4.18 Diagramm der absoluten Massen für das Modell Schalennachbildung jeweils für die vier Lastfälle.

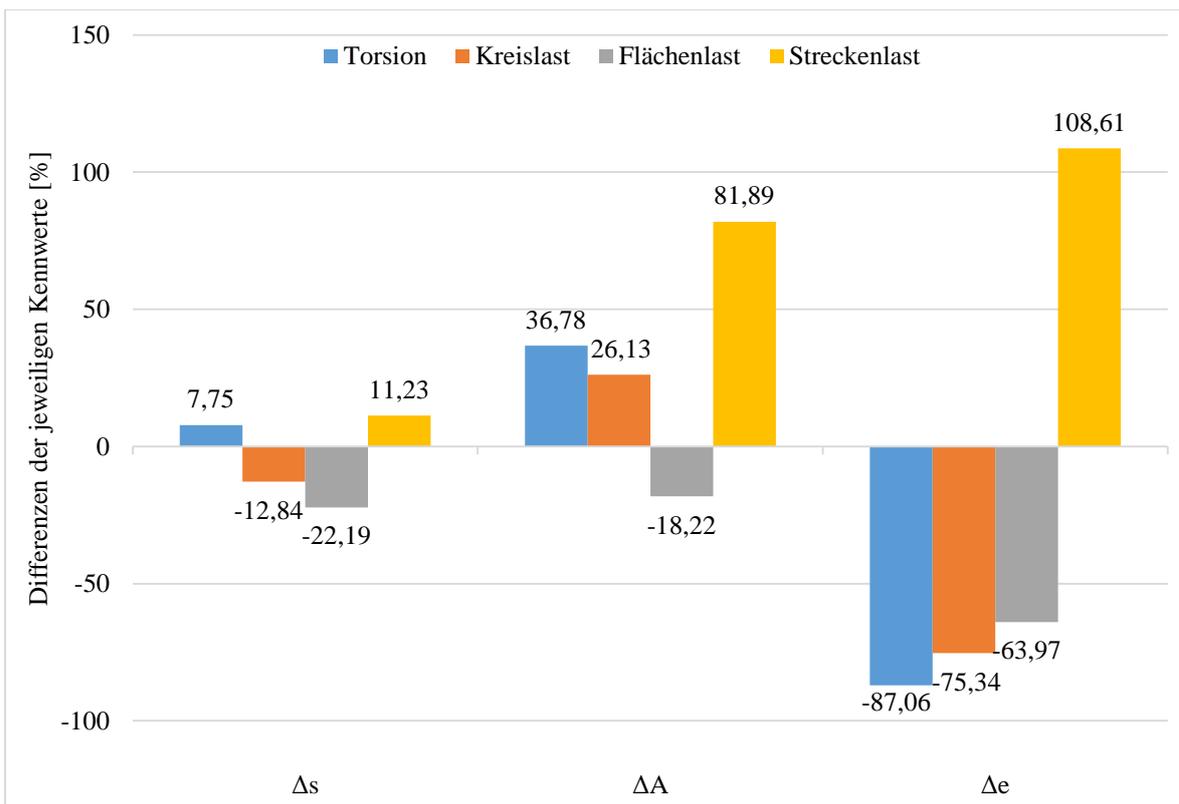


Abb. 4.19 Diagramm der Spannungsergebnisse für das Modell Schalennachbildung für die vier Lastfälle. Der erste Spannungskennwert (links) ergibt sich aus der Standardabweichung der Auslastungen für das jeweilige bionische Modell subtrahiert mit der Standardabweichung der Auslastungen für das entsprechende Referenzmodell. Der zweite Spannungskennwert (mittig) spiegelt die Differenz der maximalen Auslastungen wieder. Der dritte Spannungskennwert (rechts) gibt Auskunft über die Differenz der Elementanzahl der obersten 20 % Auslastung in Relation seiner Gesamtelementanzahl für das bionische Modell subtrahiert mit dem Wert des Referenzmodells. Alle Differenzen sind in prozentualer Einheit angegeben.

4.7.4 Modell 4 – Doppel-T-Wabe

Die Ergebnisse für das Modell Doppel-T-Wabe gestalten sich wie folgt: Abb. 4.20 stellt die parameteroptimierten Konstruktionen samt prozentualer Massendifferenz dar. Abb. 4.21 gibt Auskunft über die absoluten Massen der optimierten Strukturen, Abb. 4.22 gibt zudem Auskunft über die Spannungskennwerte. Im Anhang sind des Weiteren die absoluten Ergebnisse der Masse, Spannungskennwerte, maximalen Verformung und der Parameter tabellarisch aufgelistet.

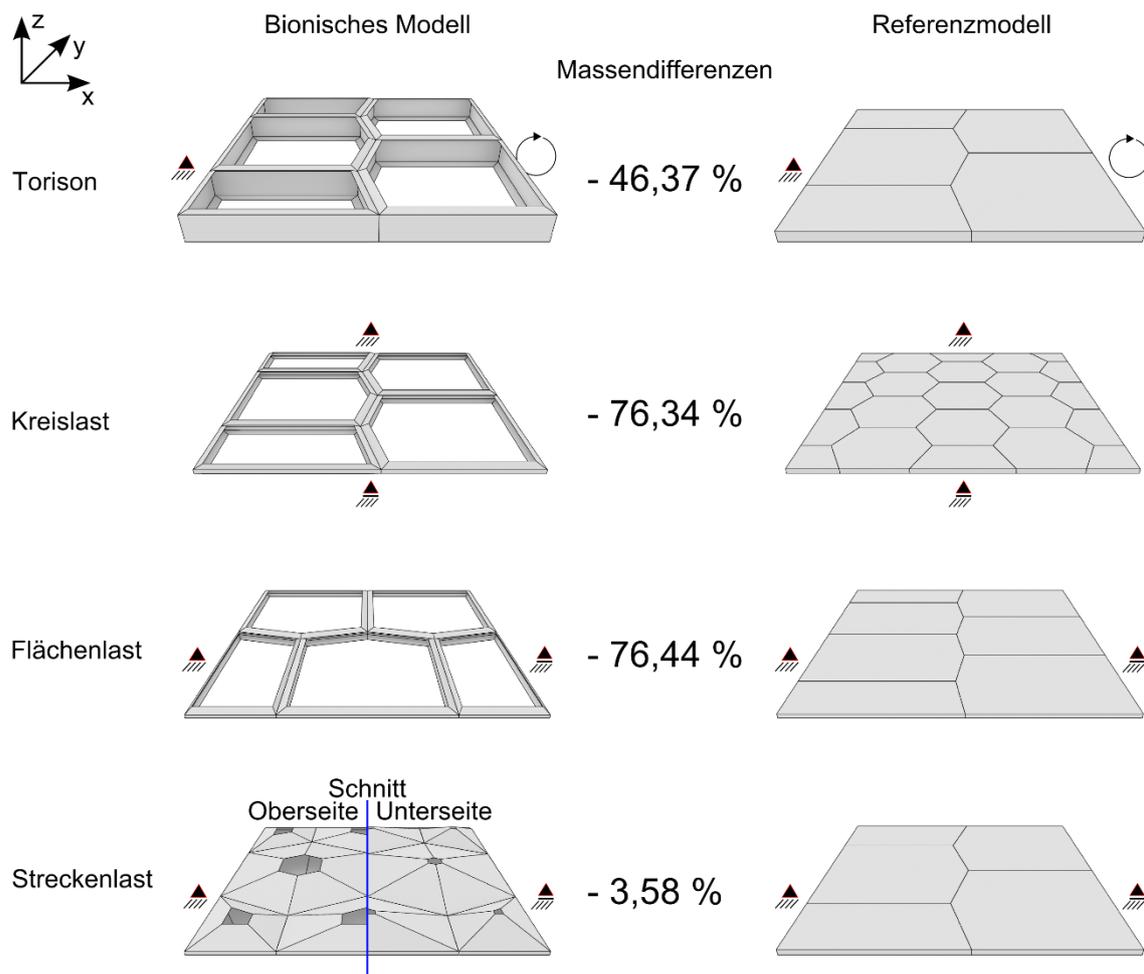


Abb. 4.20 Die parameteroptimierten Konstruktionen für das Modell Doppel-T-Wabe nach Lastfall (links) gegliedert. Die bionischen Modelle sind auf der linken Seite, deren jeweiliges Referenzmodell auf der rechten Seite dargestellt. In der Mitte ist die jeweilige Massendifferenz des bionischen Modells in Relation zum Referenzmodell aufgelistet. Des Weiteren sind die gelagerten Kanten durch entsprechende Lagersymbole und das Drehmoment im Lastfall Torsion durch einen Kreis Pfeil gekennzeichnet. Die Kräfteinleitung für die Lastfälle Kreis-, Flächen- und Streckenlast erfolgt in negative z-Richtung auf die obere Deckschicht.

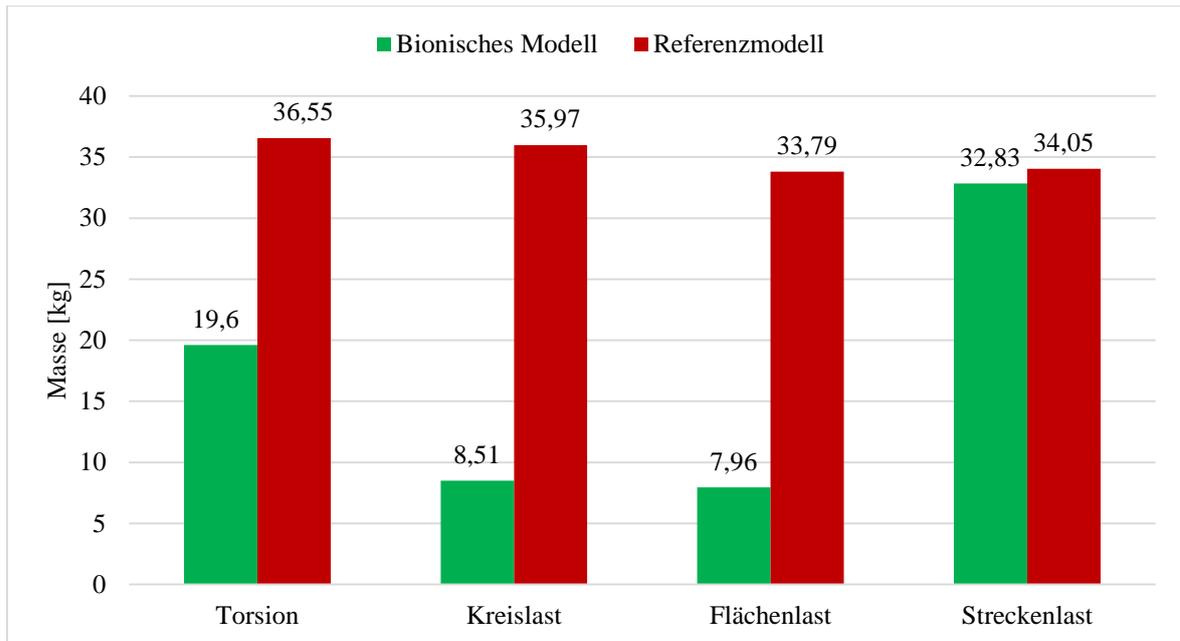


Abb. 4.21 Diagramm der absoluten Massen für das Modell Doppel-T-Wabe jeweils für die vier Lastfälle.

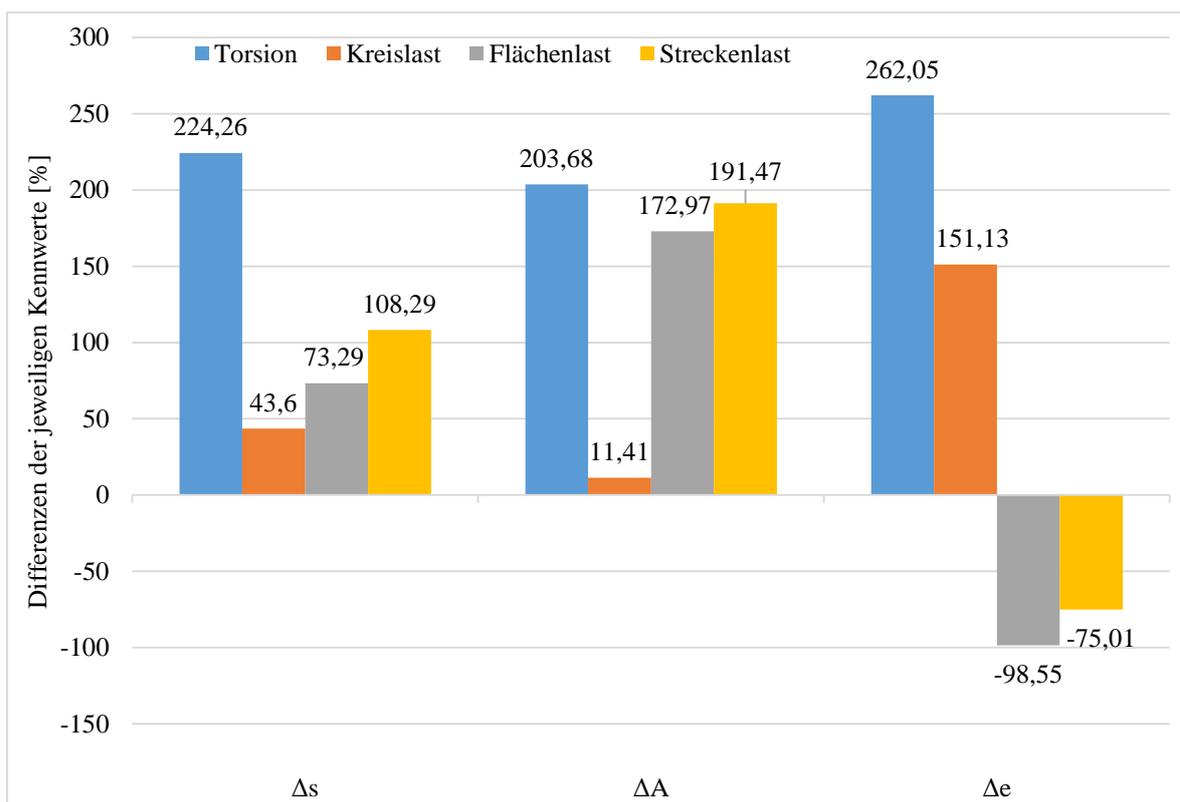


Abb. 4.22 Diagramm der Spannungsergebnisse für das Modell Doppel-T-Wabe für die vier Lastfälle. Der erste Spannungskennwert (links) ergibt sich aus der Standardabweichung der Auslastungen für das jeweilige bionische Modell subtrahiert mit der Standardabweichung der Auslastungen für das entsprechende Referenzmodell. Der zweite Spannungskennwert (mittig) spiegelt die Differenz der maximalen Auslastungen wieder. Der dritte Spannungskennwert (rechts) gibt Auskunft über die Differenz der Elementanzahl der obersten 20 % Auslastung in Relation seiner Gesamtelementanzahl für das bionische Modell subtrahiert mit dem Wert des Referenzmodells. Alle Differenzen sind in prozentualer Einheit angegeben.

5 Diskussion

5.1 Konstruktions- und FEM-Software

In diesem Abschnitt wird die für die Konstruktion verwendete Software Grasshopper und das FEM-Werkzeug Karamba diskutiert, da es gegenüber des klassischen Vorgehen in der Konstruktion eine deutlich differenzierte Vorgehensweise darstellt. Wie im Abschnitt 3.4 beschrieben werden bei Grasshopper und Karamba einzelne Bausteine, die eine Funktion darstellen, mit Eingaben und Ausgaben versorgt und miteinander wortwörtlich verbunden. Um nur einige Vorteile zu nennen: Erstens bieten diese Programme vielseitige Möglichkeiten Parameter in Echtzeit auf einfache Art und Weise zu verändern, zweitens bieten sie ein geeignetes Werkzeug in Erst- und Designstudien wie in der vorliegenden. Drittens, der in der Bionik unumgängliche Abstraktionsschritt kann anhand des programmatischen Aufbaus der Konstruktionen zu neuen Ideen und Konzepten führen. Jedoch sind sowohl Grasshopper und Karamba in einer frühen Entwicklungsphase und damit folglich ausbaufähig. So stellt die Vernetzungskomponente von Karamba bisher nur Schalen- und Balkenelemente zu Verfügung. Ebenso ist die Optimierungskomponente in Grasshopper bisher in der Ergebnisauswertung sehr aufwendig gestaltet. Des Weiteren sind unerwartete Programmabstürze in ihrer Ursachenfindung teilweise unergründlich und anzeigende Fehlermeldungen nicht immer ein Indiz für einen wirklichen Fehler. Grasshopper und Karamba sind dennoch zwei intuitiv zu erlernende Computer Aided Engineering-Programme (CAE), die durch ihre Konstruktionsweisen die Entwicklungszeiten einer Konstruktion bzw. Simulation beschleunigen können und eine berechnete Alternative zu klassischen CAE-Programmen darlegen.

5.2 Plausibilitätsbetrachtung der FEM-Software

Der Vergleich zwischen den theoretisch berechneten maximalen Verformungen und der Simulation weist für die Lastfälle Kreis-, Flächen- und Streckenlast eine vernachlässigbar kleine Abweichung von maximal ca. 5 % auf. Folglich kann die Plausibilität der Simulation belegt werden. Für den Lastfall Torsion ergibt sich eine Abweichung von circa 21 %. Wie im Abschnitt 3.7 bereits beschrieben, ist diese große Abweichung auf die Verwendung der Formeln für eine wölbfreie Torsion (St. Venantsche Torsion) zurückzuführen (Göttsche und Petersen, 2012, S. 94). Da die Ausbildung von Wölbungen aufgrund der starren Einspannung verhindert ist, liegt jedoch eine Wölbkrafttorsion vor. Die Berechnung stellt somit lediglich

eine gute Näherung dar (Dankert und Dankert, 2011, S. 366). Diese Vorgehensweise wird gewählt, da die durch die gehinderten Verwölbungen zusätzlich auftretenden Spannungen bei der Parameteroptimierung nicht als Randbedingung eingehen und des Weiteren die Verwölbungen durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden (ebd., S. 366). Dieselbe Simulation des Lastfalls Torsion mit der FEM-Software Ansys kann zudem das Ergebnis von der Software Karamba auf eine vernachlässigbare Abweichung von 0,4 % bestätigen.

Die Diskussion der Modelle wird im Folgenden jeweils in zwei Abschnitte gegliedert. Im ersten werden die Optimierungsziele und Randbedingungen samt der resultierenden Parameter betrachtet. Im nächsten Abschnitt werden die Spannungen, obgleich diese Größe keine Randbedingung der Optimierung darstellt, anhand der Kennwerte und beschreibender Aussagen näher analysiert.

5.3 Modell 1 – Verknüpfte Rippe

5.3.1 Masse und Parameter

Die absoluten Massen der bionischen Modelle und derer Referenzmodelle zeigen Werte in einer ähnlichen Größenordnung auf (s. Abb. 4.12). Nur für den Lastfall Torsion weist das bionische Modell eine deutliche bessere Masse mit einer Differenz von ca. 6 % auf (s. Abb. 4.11). In diesem Lastfall kann durch die Verknüpfungsstrebe die Anzahl der Rippen um eins minimiert werden. Ebenfalls fällt auf, dass die Rippen im bionischen Modell und im Referenzmodell senkrecht zueinander stehen, dies ist dem Einfluss der Verknüpfungsstrebe zuzuschreiben.

Bei den drei weiteren Lastfällen sind die Rippen stets parallel zueinander und senkrecht zu den Lagern ausgerichtet. Lediglich bei der Streckenlast verlaufen die Rippen direkt entlang der eingeleiteten Last, um einen direkten Kraftfluss in die Lagerung zu ermöglichen. Weiterhin sind die Massen des bionischen Modells stets größer als die des Referenzmodells. Für die Kreislast ergibt sich eine geringe Differenz von ca. 1 %, für die Streckenlast ca. 2 % und für die Flächenlast ca. 3 %. Die absoluten Massen liegen für diese drei Lastfälle um die 20 kg. Die Anzahl der Rippen sind jedoch bei allen diesen drei Lastfällen im Vergleich zu ihrer Referenz gleich groß. Ebenfalls ist die Höhe mit einer vernachlässigbaren Abweichung identisch. Für die geometrischen Maße der Verknüpfungsstreben dieser drei Lastfälle ergeben sich nur die minimal möglichen Werte. Es zeigt sich folglich, dass der Einfluss der Verknüpfungsstrebe nur für den Lastfall Torsion eine positive Bedeutung bezüglich der Masse aufweist. So weist die Dicke der Versteifungsstrukturen (ausgeschlossen ist die ebene

Fläche) des bionischen Modells eine Differenz von einem halben Millimeter zu dem Referenzmodell auf. Unklar bleibt die Art und Weise der Ausbildung der Verknüpfungsstrebe im Falle der Torsion, da sie unsymmetrisch zum Gesamtmodell ausgebildet ist. Der Effekt der Anbindung dieser Strebe an drei Außenkanten, insbesondere an einem Ort der maximalen Verformung wird jedoch eine Versteifung mit sich bringen, die prinzipiell einer lokalen Deckschicht bei einem Sandwichkonstrukt entspricht.

Bei einer auf die flächige Seite orthogonal eingreifenden Kraft treten im Bereich der Streben Zugspannungen auf, dieser Fakt macht eine Untersuchung mit einer Substitution des Materials dieser Streben mit einem Faserverbundmaterial interessant. Im Falle der Kreislast ist die Anzahl der Verknüpfungsstreben mit sechs Stück am größten. Eine Untersuchung, ob die geringe prozentuale Massendifferenz durch eine Materialsubstitution ausgeglichen werden kann, ist demnach ein Aspekt für eine weitere Analyse. Letztlich muss geschlussfolgert werden, dass das bionische Modell nur für den Lastfall Torsion die Arbeitshypothese bestätigt.

5.3.2 Spannungen

Wie bereits im Abschnitt 3.5 erwähnt, werden die Spannungen im Verhältnis zur Streckgrenze gesetzt und somit im Folgenden ebenfalls als Auslastung bezeichnet. Das bionische Modell verknüpfte Rippe weist im Bereich der Standardabweichung der Auslastungen im Falle der Torsion einen deutlich größeren Wert (ca. 30 %) auf (s. Abb. 4.13). Der Lastfall Kreislast zeigt mit 6 % die zweitgrößte Abweichung, die beiden weiteren Lastfälle weichen vernachlässigbar klein voneinander ab. Die Ursache beruht auf den Bereich um die Verknüpfungsstrebe und Rippe, da in diesem Bereich in großer Anzahl hohe Spannungen auftreten. Diese Tatsache beschreibt auch der dritte Spannungskennwert (s.u.). In Anbetracht des zweiten Kennwertes weist das bionische Modell bis auf bei dem Lastfall Torsion deutlich höhere Spannungen auf. Diese erreichen eine um ca. 40 % größere Auslastung im Lastfall Kreislast und Flächenlast. Lediglich der Lastfall Torsion zeigt eine um ca. 12 % geringere Auslastung im bionischen Modell.

Der letzte Kennwert, die Differenz der Elementanzahlen der obersten 20 % Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl, legt offen, wie viele Elemente im maximalen Spannungsbereich eines jeden Modells sind. Der Lastfall Torsion weist einen um ein vielfaches größeren Kennwert auf. Bei den weiteren drei Lastfällen sind die bionischen Modelle gegenüber den Referenzmodellen deutlich weniger hochbelastet. Der Bereich im Übergang von Verknüpfungsstrebe und Rippe reduziert die Hochspannungszone auf diesen

lokalen Bereich. Wohingegen die Referenzmodelle einen deutlich größeren Bereich höherer Spannungen entlang der Rippen besitzen. Wiederum ergeben sich wie bereits erwähnt in diesem Bereichen der bionischen Modellen deutlich höhere maximale Auslastungen.

Das bionische Modell legt im Lastfall Torsion letztlich eine geringere Masse und eine geringere maximale Auslastung offen und bleibt damit der einzige Lastfall, der die Arbeitshypothese bestätigt. Die drei weiteren Lastfälle weisen zwar geringfügig höhere Massen, aber auch größere maximale Auslastungen auf. Die weiteren Kennwerte weisen letztlich nur im Falle der Lastfälle Kreis-, Flächen- und Streckenlast weniger hochbelastete Bereiche auf. Andernfalls sind sie gleich bzw. schlechter im Vergleich zu dem Referenzmodell. Weiterhin kann eine Untersuchung mit einem Versteifungselement, welches wie das vorliegende Modell nicht nur eine, sondern zwei Verknüpfungsstreben besitzt, von Interesse sein. Auf diese Weise ist ebenfalls ein symmetrischer Aufbau des Gesamtmodells möglich.

5.4 Modell 2 – Versteifte Rippe

5.4.1 Masse und Parameter

Das bionische Modell versteifte Rippe und das entsprechende Referenzmodell weisen für die vier Lastfälle Massen in einer ähnlichen Größenordnung auf (s. Abb. 4.15). Für den Lastfall Torsion haben die Versteifungsdreiecke nahezu keine Wirkung, da sie gegen ihre minimalen Parametereinstellungen konvergiert sind. Weiterhin resultiert diese Schlussfolgerung aus der gleichen Masse (mit vernachlässigbarer kleiner Abweichung) und gleichen Parametereinstellungen nach der Optimierung.

Für den Lastfall Streckenlast bietet die optimierte bionische Konstruktion eine geeignete Lösung mit ca. 10 % weniger Masse (Abb. 4.14). So sind die Versteifungsdreiecke entlang der Streckenlast ausgebildet und leiten die Kraft in die Rippe und von dieser in die Lagerung. Eine ca. 1 % größere Masse weist das Referenzmodell im Falle der Flächenlast auf, dieser Vorteil entsteht durch eine geringe Höhe der Rippe des bionischen Modells. Die anderen Parameter sind identisch.

Für den letzten Lastfall Kreislast erweist sich die im Fall der Streckenlast noch kraftflussgünstige Struktur als ungünstig. Mit ca. 16 % mehr Masse hat das bionische Modell trotz dreier Rippen weniger einen Nachteil. Der entscheidende Parameter, der diese Massendifferenz verursacht, ist die Dicke der gesamten Versteifungsstruktur, welche um ein vielfaches größer ist als beim Referenzmodell. Die kreisförmig verteilte Last kann erst auf

diesem Wege ausreichend kompensiert werden und so die Randbedingung der Parameteroptimierung mit einer maximalen Verformungsgrenze von 0,001 erfüllen. Anzumerken bleibt weiterhin, dass sich die Versteifungsdreiecke stets im Bereich der maximalen Verformung bei orthogonal zur Ebene angreifenden Kräften ausbilden. Außerdem ist die Biegung der Versteifungselemente wie zu erwarten nach außen von der Ebene ausgeformt, so steht diese Größe im Verhältnis zum Biegemomentenverlauf. Schlussendlich kann die Arbeitshypothese für das Modell versteifte Rippe für die Lastfälle Torsion, Flächenlast und Streckenlast bestätigt werden.

5.4.2 Spannungen

Für das Modell versteifte Rippe ergeben sich bezüglich der Spannungskennwerte keine klaren Tendenzen. Die prozentualen Differenzen der Standardabweichung ergeben für den Lastfall Kreislast ca. 18 % mehr für das bionische Modell, die Verteilung der Spannungen ähnelt folglich eher der einer homogenen Spannungsverteilung (s. Abb. 4.16). Weiterhin zeigt sich im Falle der Flächenlast ein gegensätzliches Bild, das Referenzmodell ist um ca. 12 % homogener verteilt.

Für den Kennwert der maximalen Auslastung ergeben sich für die Torsion und Kreislast positiv zu bewertende Resultate, für die Flächen- und Streckenlast jedoch ebenso negativ zu bewertende. Bemerkenswert ist außerdem für den letzten Kennwert der Spannungen, das im Falle der Flächen- und Streckenlast die Anzahl der Elemente im Bereich der obersten 20 % deutlich geringer im bionischen Modell sind. Bei den bionischen Modellen ergibt sich jeweils in dem Bereich von Rippe und Versteifungselement eine erhöhte lokale Spannungszone. Bei den Referenzmodellen verteilt sich dieser Bereich jedoch entlang eines Großteils aller Rippen. Wiederum für die Lastfälle Torsion und Kreislast fällt der dritte Kennwert mit jeweils ca. 62 % und 9 % für das Referenzmodell optimaler aus. Es bleibt abschließend anzumerken, dass keine eindeutige Bewertung zwischen diesen drei Kennwerten für das Modell versteifte Rippe möglich ist. Je nach Kennwert sind unterschiedliche Präferenzen ausschlaggebend und ermöglichen so eine vielseitige Betrachtung und Bewertung der Spannungen dieser Modellreihe.

5.5 Modell 3 – Schalennachbildung

5.5.1 Masse und Parameter

Das dritte Modell beschreibt in der Analyse der Massendifferenzen unterschiedliche starke Differenzen, jedoch drei von vier zu Gunsten des bionischen Modells. Die absoluten Massen weisen ähnliche Größenordnungen auf (s. Abb. 4.18). Für den Lastfall Torsion ergibt sich jedoch eine um ca. 30 % kleinere Masse für das bionische Modell (s. Abb. 4.17). Diese Differenz wird in erster Linie durch die beiden Dicken-Parameter und die Höhe maßgebend verursacht. Weiterhin weist das bionische Modell für den Lastfall Streckenlast mit ca. 8 % und Kreislast mit ca. 1 % einen Vorzug auf. Für den Fall Kreislast sind insbesondere der Parameter Dicke der Versteifungsstruktur und die Anzahl der Elemente, welche für das bionische Modell um eins geringer ist, von Bedeutung. Wiederum ist die Anzahl der Elemente um drei größer für das Referenzmodell im Lastfall Streckenlast. Lediglich für den Lastfall Flächenlast weist das bionische Modell trotz zweier weniger Elemente eine um ca. 3 % größere Masse auf. Die Arbeitshypothese kann somit nur für Lastfall Flächenlast widerlegt werden. Weiterhin auffällig ist, dass für die orthogonal zur Ebene angreifenden Lasten alle Modelle die Wölbstrukturen am Ort der maximalen Verformung ausbilden und wohlgermerkt auch nur in diesem Bereich. Des Weiteren ist für den Lastfall Torsion, sowohl für das bionische Modell, als auch für das Referenzmodell nur ein Element über die gesamte Ebene ausgebildet.

5.5.2 Spannungen

Signifikante Werte ergeben sich insbesondere für den dritten Kennwert, der Auskunft über die Menge der Elemente im oberen Spannungsreich gibt. So ist die relative Elementanzahl für die Lastfälle Torsion, Kreis- und Flächenlast allesamt um ca. 60 % größer für das Referenzmodell (s. Abb. 4.19).

Für den Lastfall Torsion zeigt das bionische Modell eine erhöhte Spannung an der Lagerung und an der Krafteinleitung auf Höhe der Rotationsachse. Für das Referenzmodell liegen diese Bereiche ebenfalls an der Lagerung und an der Krafteinleitung, jedoch jeweils auf der Höhe der Ecken. Die Ursache dieser Tatsache liegt darin begründet, dass im Falle des bionischen Modells der Übergang Wölbung-Ebene direkt an der Kante anliegt. Beim Referenzmodell hingegen ist dieser Übergang weiter von der Kante entfernt und die Zone um die Lagerung und die Krafteinleitung weniger ausgesteift. Wiederum liegt beim

Referenzmodell durch die größeren hochbelasteten Bereiche eine deutlich geringere maximale Spannung vor.

Für den Lastfall Kreislast liegt die Begründung darin, dass sich eine Differenz von bis zu ca. 75 % des dritten Spannungskennwert für das bionische Modell ergibt, da im Bereich der Lasteinleitung nur ein Versteifungselement bzw. eine Wölbstruktur vorliegt und nicht wie im Falle des Referenzmodells zwei vorhanden sind. Im Übergang der Versteifungsfläche zur Wölbung sind dabei erhöhte Kerbspannungen anzutreffen. Auf dieselbe Art und Weise begründet sich der Ausschlag dieses Kennwerts für den Lastfall Flächenlast. Für den Lastfall der Streckenlast ist die Versteifungsfläche deutlich größer im Vergleich zur Wölbstruktur, so dass die Last nicht wie beim Referenzmodell in die Wölbstruktur abgeleitet werden kann. Ebenfalls ergibt sich so eine um ca. 80 % größere maximale Spannung.

Auffällig ist des Weiteren, dass die Spannungskennwerte für den Lastfall Flächenlast durchweg die bionische Struktur und für den Lastfall Streckenlast das Referenzmodell als geeigneter kennzeichnen.

Schlussendlich bleibt anzumerken, dass die Kombination aus einer Wölbstruktur mit einer Versteifungsfläche, ähnlich einer Rippe, durchaus positive Effekte bezüglich der Masse aufweist. Die Ausbildung dieser Strukturen für die Querkraftlastfälle ist dabei stets nah miteinander verwandt aussehend, ähnliches gilt für die beiden Modelle des Lastfalls Torsion. Es zeigt sich zudem, dass die Übergänge von Rippen zu Wölbungen fließender gestaltet werden sollten, um die Spannungen an diesen Stellen zu reduzieren. Ohne die Kombination aus Rippe und Wölbung sind die Bereiche zwischen den Wölbungen äußerst instabil, da nur eine ebene Fläche für Steifigkeit in diesem Bereich sorgen könnte. Anhand der optimierten Parameterwerte kann weiterhin bestätigt werden, dass die obere Öffnung der Wölbung keinen positiven Einfluss mit sich bringt und für weitere Arbeiten entfernt werden sollte.

5.6 Modell 4 – Doppel-T-Wabe

5.6.1 Masse und Parameter

Das letzte der vier Modelle, die Doppel-T-Wabe, zeigt in allen vier Lastfällen eine geringere Masse für das bionische Modell auf (s. Abb. 4.21). Im Lastfall Torsion liegt diese Differenz bei ca. 46 %, ebenfalls zeigt sich im Falle der Kreis- und Flächenlast mit ca. 76 % eine große Differenz (s. Abb. 4.20). Bei all diesen drei bionischen Modellen ist die Lochgröße auf die maximale Parametereinstellung gewichen. Es ergeben sich folglich Doppel-T-Träger, deren

Ober- und Unterseite zwar gewölbt ist, jedoch ebenso auf der minimalen Einstellmöglichkeit.

Für den Lastfall Torsion ist der Steg des bionischen Modells drei Mal so hoch wie der des Referenzmodells, folglich wird die eigentliche Steifigkeit über diesen Parameter generiert. Alle weiteren Parameter befinden sich auf ihren Extremwerten.

Der Lastfall Streckenlast liefert das dem biologischen Vorbild ähnlichste Optimierungsergebnis. Die Wölbung ist auf der Oberseite 0,03 und auf der Unterseite 0,05. Die Lochgröße auf der Oberseite beträgt 0,3 und auf der Unterseite 0,1. Mit ca. 4 % Massendifferenz ist der Unterschied zwar deutlich geringer als bei den anderen Lastfällen, aber immer noch im Sinne des bionischen Modells. Das bionische Modell beweist durch diese Parameterergebnisse die Eignung für den Fall Streckenlast. Die Last wird über die gewölbten Strukturen kraftflussgünstig in die Stege geleitet.

Die Arbeitshypothese ist folglich für alle vier Lastfälle bestätigt. Eine Ausbildung von Löchern, aber weiterhin ebenen Deckschichten des Referenzmodells würde für weitere Untersuchung jedoch den Vergleich plausibler erscheinen lassen. Insbesondere aufgrund der kaum vorhandenen Deckschichten im Falle der bionischen Modelle, ausgenommen im Lastfall Streckenlast, ist die Konsistenz der Lastbedingungen nicht mehr gegeben. Außerdem bilden nur zwei dieser acht Modelle vollständige Waben aus, so erscheint diese Struktur zumindest für die Kreislast beim Referenzmodell und für die Streckenlast des bionischen Modells geeigneter als eine annähernd rechteckige Grundform.

5.6.2 Spannungen

Die Spannungskennwerte zeigen im Gegensatz zu den Massendifferenzen ein für das Referenzmodell sprechendes Bild (s. Abb. 4.22). Im Lastfall Torsion sind alle Kennwerte des bionischen Modells um ein vierfaches größer. Diese Tatsache ist dem deutlich geringeren Materialeinsatz geschuldet, welcher wenig niedrigbelastetes Material mit sich bringt. Für die Kreis- und Flächenlast ist aufgrund der im Abschnitt 5.6.1 beschriebenen Inkonsistenz des Lastfalls ein Vergleich nicht mehr gerechtfertigt. Für weitere Untersuchungen ist letztlich die Lochgröße weiter einzuschränken, um die Lastfallbedingungen konstant zu halten.

Für das Referenzmodell im Lastfall Streckenlast ist der Steg entlang der Lasteinleitung hochbelastet, wohingegen das bionische Modell in diesem Bereich nur einen Stegabschnitt aufweist, welcher deutlich weniger belastet ist. So trägt die Konfiguration des bionischen Modells zu einer verbesserten Ableitung der Kräfte anhand der Wölbungen bei. Dennoch

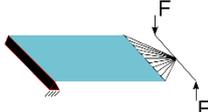
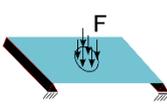
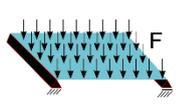
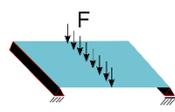
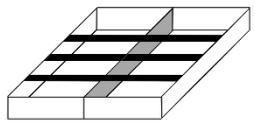
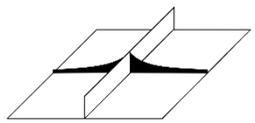
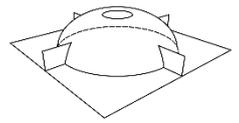
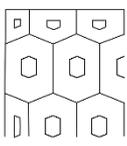
ergeben sich an den Kerbe der Löcher hohe Spannungen. Mithilfe von runden Löchern kann dieser Problematik entgegengewirkt werden. Jedoch führte die Vernetzungskomponente im Zusammenspiel mit der Optimierungskomponente bei dieser Konstruktion zu langen Rechenzeit und folglich zu Programmabstürzen.

5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Minimierung der Masse stellt das Ziel der Parameteroptimierung dar. Nach Tab. 5.1 ergeben sich folgende prozentuale Massenunterschiede für die vier bionisch entwickelten Modelle nach den jeweiligen Lastfällen. Es wird ersichtlich, dass das Modell verknüpfte Rippe lediglich im Fall der Torsion ein leichteres bionisches Modell kennzeichnet.

Nur im Lastfall Kreislast ist für das Modell versteifte Rippe das Referenzmodell leichter, jedoch zeigt sich mit ca. 16 % eine deutliche Differenz auf. Weiterhin ergibt sich für die Torsion eine sehr geringe Massendifferenz. Das Modell Schalennachbildung hat nur im Falle der Flächenlast ein schwereres bionisches Modell, im Lastfall Torsion mit ca. 35 % weniger Masse aber ein umso leichteres. Die Massen für die bionischen Modelle für die Lastfälle Kreis- und Streckenlast sind ebenfalls leichter. Das Modell Doppel-T-Wabe weist als einziges Modell in allen Lastfällen ein leichteres bionisches Modell auf, bisweilen mit sehr deutlichen Ergebnissen. Letztlich sprechen 11 von 16 Vergleiche für das leichtere bionische Modell bei gleicher Steifigkeit.

Tab. 5.1 Zusammenfassung der relativen Massenunterschiede für die vier Modelle nach Lastfällen. Grüne Zahlen geben ein leichteres bionisches Modell an, rote ein leichteres Referenzmodell.

Bionisches Modell \ Lastfall	Lastfall			
				
	- 5,87 %	+ 0,85 %	+ 3,25 %	+ 1,89 %
	- 0,06 %	+ 15,98 %	- 0,73 %	- 9,86 %
	- 35,12 %	- 1,19 %	+ 3,12 %	- 7,62 %
	- 46,37 %	- 76,34 %	- 76,44 %	- 3,58 %

5.8 Ausblick

In diesem Abschnitt werden mögliche weitere Untersuchungsaspekte hinsichtlich der Thematik Flächenversteifung, aber auch bezüglich der Thematik Automatisierung und Standardisierung angerissen. Die beiden Methodiken Boxmorph und Voronoi erweisen sich als einfache Werkzeuge zur Generierung komplexer fraktaler Strukturen. Als Weiterführung einer dieser Methoden bietet sich Boxmorph mit Attraktorenpunkten an. Anhand dieses Verfahrens können letztlich nicht nur stets identische Elemente auf Flächen transformiert werden, sondern ebenfalls individuell unterschiedliche Elemente (für nähere Erläuterungen s. Payne und Issa, 2009). Die Methode Voronoi hingegen kann im nächsten Schritt mit einer Dichtefunktion verknüpft werden. Auf diese Weise können die Generatorenpunkte durch mathematische Funktionen manipuliert werden (für nähere Erläuterungen s. Du et al., 1999 und Dimcic, 2011).

Weiterhin ergeben sich aus der immensen Formenvielfalt der Diatomeen alternative Ideen für Flächenversteifungen. Einige dieser alternativen möglichen biologischen Vorbilder, welche im Rahmen dieser Arbeit identifiziert wurden, sind im Anhang als Grafik dargestellt. Folglich ist eine inhaltliche Weiterführung der Thematik der vorliegenden Bachelorarbeit möglich.

6 Fazit

In diesem Abschnitt wird ein Resümee über die vorliegende Untersuchung und deren implementierende Aspekte gezogen. Der Prozess der Bionik kann mit dem biologischen Vorbild Diatomeen anhand des immensen Bild- und Probenmaterials als geeignetes Vorbild für flächenversteifende Strukturen eingestuft werden. Die Schalenstrukturen der Diatomeen bieten eine Formenvielfalt, welche keiner Imagination fern bleibt. Neben den entwickelten Modellen sind viele weitere Konzepte vorstellbar und ermöglichen eine anforderungsspezifische Auswahl.

Inhaltlich kann die Arbeitshypothese in 11 von 16 Lastfällen bestätigt werden. Von Modell zu Modell ergeben sich lastfallspezifische Eignungen und Eigenschaften der Konstruktionen. Je nach Anforderungen kann auf diese Weise ein Modell ausgewählt werden. Weiterhin zeigt kein Modell eine Auslastung über 100 % auf, dieses entspricht einem linear-elastisch Verhalten des Materials ohne plastische Verformung. Nichtsdestotrotz müssen für weitere Forschungen die Modelle überarbeitet und im Detail optimiert werden. Für eine thematische Erststudie, ebenfalls unter Anbetracht einer neuartigen Software, hat die vorliegende Arbeit eine Grundlage für weitere Untersuchungen geschaffen. Das eigentliche Leichtbaupotential der entwickelten Modelle lässt sich weiterhin detaillierter durch ein Anwendungsprojekt und durch einen Vergleich mit einem Referenzmodell abschätzen. Die eingangs erwähnten Klimaziele u. a für die Automobilbranche erweisen sich in Anbetracht der erzielten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit als nicht gänzlich unmöglich. Insbesondere die effektive Nutzung von Optimierungsmethoden eröffnet bisher unerreichte Potentiale im Hinblick auf den Leichtbau.

Dem ELiSE Verfahren und dem Projekt Automatisierung und Standardisierung wird ein weiterer Grundstein im Bereich Flächenversteifung gelegt. Die gewählten Methodiken Boxmorph und Voronoi sind zur Modellerstellung vielversprechend, erfordern jedoch Detaillösungen für komplexere Randbedingungen des Modells. Sie ermöglichen dennoch die effiziente Ausgestaltung einer großflächigen Konstruktion mit wiederkehrenden Bausteinen, wie in dieser Arbeit demonstriert. In der heutigen Konstruktion und Entwicklung kann anhand dieser Methoden ein effektives und zukunftsweisendes Werkzeug geformt werden.

Literaturverzeichnis

- Argyris J, Tenek L, Olofsson L (1997) *TRIC: a simple but sophisticated 3-node triangular element based on 6 rigid-body and 12 straining modes for fast computational simulations of arbitrary isotropic and laminated composite shells*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 145, 1-2, 11–85.
- Bach K, Burkhardt B, Helmcke J (1984) *IL28: Diatomeen I - Schalen in Natur und Technik*. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart.
- Balke H (2014) *Einführung in die Technische Mechanik*, Springer-Verlag, Berlin.
- Balzer M, Deussen O (2005) *Voronoi Treemaps*. Projektarbeit, Fachbereich Informatik und Informationswissenschaft, Universität Konstanz.
- Bäuerlein E (2003) *Biominalisation von Einzellern: eine außergewöhnliche Membranbiochemie zur Produktion anorganischer Nano- und Mikrostrukturen*. Angewandte Chemie, Jgg. 115, Nr. 6, 636–664.
- Berns H, Theisen W (2008) *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Bundesumweltministerium (2007) *Klimaagenda 2020: Der Umbau der Industriegesellschaft*. Bundesumweltministerium (Hrsg.), Berlin.
- Dankert J, Dankert H (2011) *Technische Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik*. 6. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- Deffke U (2013) *Elektromobilität: Das Auto neu denken*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Bonn.
- Degischer HP, Lüftl S (2009) *Leichtbau*. 1. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim.
- Dimic M (2011) *Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms*. Dissertation, ITKE, Universität Stuttgart.
- Dimic M, Scheible F (2009) *Controlled Parametrical Design Over Double Curved Surfaces*. Design Modelling Symposium, Berlin.
- DIN EN 10025 (2011) *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen*, Beuth Verlag GmbH.
- Du Q, Faber V, Gunzburger M (1999) *Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Jgg. 41, Nr. 4, 637–676.
- ELiSE (2014) *Firmeneigenes Bildmaterial*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, imare GmbH, Abteilung bionischer Leichtbau.

- Fratzl P (2007) *Biomimetic materials research: what can we really learn from nature's structural materials?* Journal of The Royal Society Interface, Nr. 4, 637–642.
- Göttsche J, Petersen M (2012) *Festigkeitslehre - klipp und klar: Für Studierende des Bauingenieurwesens*. 2. Auflage, Hanser, München.
- Gross D (2012) *Technische Mechanik*. 11. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Hake E, Meskouris K (2007) *Statik der Flächentragwerke*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Hamm C (2005a) *Kieselalgen als Muster für Technische Konstruktionen*. BIOSpektrum, Jgg. 11, Nr. 1, 41–43.
- Hamm C (2005b) *Leichtbaufelge für ein Kraftfahrzeug mit einem tragenden Speichenaufbau*, WO 2006/039878 A1.
- Hamm C, Smetacek V (2007) *Armor: Why, When, and How*. Evolution of Primary Producers in the Sea, 311–332.
- Hamm CE (2005c) *The evolution of advanced mechanical defenses and potential technological applications of diatom shells*. Journal of nanoscience and nanotechnology, Jgg. 5, Nr. 1, 108–119.
- Hamm CE, Merkel R, Springer O, Jurkojc P, Maier C, Prechtel K, Smetacek V (2003) *Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection*. Nature <London>, Jgg. 421, Nr. 6925, 841–843.
- Haufe P (2011) *Parametric lightweight optimization of structures with marine plankton geometries*. imare GmbH, Bremerhaven.
- Helmcke J, Krieger W (1963) *Diatomeenschalen im elektronenmikroskopischen Bild*. 2. Auflage, J. Cramer, Weinheim.
- Hill B (1999) *Naturorientierte Lösungsfindung: Entwickeln und Konstruieren nach biologischen Vorbildern*. 1. Auflage, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim.
- Hinz F (2014) *Alfred-Wegener-Institut Sammlung*. [online]
http://www.awi.de/de/forschung/fachbereiche/biowissenschaften/polare_biologische_ozeanographie/friedrich_hustedt_zentrum_fuer_diatomeenforschung/sammlung/
(11.07.2014).
- Hornbogen E, Warlimont H (2006) *Metalle: Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*. 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Kahlenborn W, Brüning L (2014) *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*. 1. Auflage, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Berlin.

- Khabazi Z (2010) *Generative Algorithms: using Grasshopper*,
www.MORPHOGENESISISM.com.
- Klein B (2011) *Leichtbau - Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 9. Auflage, Vieweg +Teubner, Wiesbaden.
- Macherauch E, Zoch H (2011) *Praktikum in Werkstoffkunde: 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. 11. Auflage, Vieweg +Teubner, Wiesbaden.
- Maier M (2010) *Leichtbaudatenbank ELiSE: Benutzerhandbuch*. 1. Auflage, Institut für Marine Ressourcen GmbH (Hrsg.), Bremerhaven.
- Maier M, Schulz J, Thoben K (2012) *Verfahren zur funktionalen Ähnlichkeitssuche technischer Bauteile in 3D-Datenbanken*. Datenbank-Spektrum, Jgg. 12, Nr. 2, 131–140.
- Maier M, Siegel D, Thoben K, Niebuhr N, Hamm C (2013) *Transfer of Natural Micro Structures to Bionic Lightweight Design Proposals*. Journal of Bionic Engineering, Jgg. 10, Nr. 4, 469–478.
- Mathiak FU (2008) *Ebene Flächentragwerke II: Grundlagen der Plattentheorie*. 1. Auflage, Hochschule Neubrandenburg.
- Mattheck C (1989) *Engineering components grow like trees*. Kfk-Bericht (4648).
- Nachtigall W (1998) *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Naguschewski R (2012) *Lightweight optimization of circular lightweight plates inspired by diatoms*. Bachelor-Thesis, Hochschule Bremen.
- Paland E (2002) *Technisches Taschenbuch*. 7. Auflage, Schaeffler KG, Herzogenaurach.
- Papadrakakis M, Argyris JH, Apostolopoulou C, Koutsourelakis S (2000) *The tric shell element: theoretical and numerical investigation*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 182, 1-2, 217–245.
- Payne A, Issa R (2009) *Grasshopper Primer for version 0.06.0007*,
www.Grasshopper3d.com.
- Pohl G, Martín-Palma RJ, Lakhtakia A (2011) *BOWOOSS: bionic optimized wood shells with sustainability*. SPIE. Jgg. 7950, San Diego.
- Preisinger C (2013) *Karamba: Parametric structural modeling*. 1.0.3 Auflage, Karamba.
- Riß F (2014) *Belastungsgerechte Auslegung von Sandwichbauteilen für die additive Fertigung*. Rapid.Tech, Erfurt.
- Romberg O, Hinrichs N (2011) *Keine Panik vor Mechanik!* 8. Auflage, Vieweg +Teubner, Wiesbaden.

-
- Round FE, Crawford RM, Mann DG (1990) *The Diatoms: Biology & morphology of the genera*. 1. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge [England], New York.
- Sanders W (2014) *Die große Stahl-Statistik 2014*. Stahlmarkt, Nr. 07.
- Täger O, Plath A (2013) *Bedeutung des Leichtbaus für die Automobilindustrie*. Fachtagung „Großserientaugliche thermoplastische Strukturen“ thermoPre, Chemnitz.
- Tributsch H (1980) *Wie das Leben leben lernte: Physikalische Technik in der Natur*. Dtv Sachbuch. Jgg. 1517, Dt. Taschenbuch-Verl., München.
- VDI 6220 (2012) *Bionik Konzeption und Strategie Bionik - Konzeption und Strategie: Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten*, VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences.
- VDI 6224 (2012) *Bionische Optimierung: Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung*, VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences.
- Weise T (2009) *Global Optimization Algorithms: Theory and Application*. 2. Auflage, www.it-weise.de.

A Anhang

Anhang für das Modell verknüpfte Rippe

Tab. A.1 Die absoluten Massen und die maximalen Verformungen ohne Einheit, da sie in Relation zu der Modellseitenlänge (1m) angegeben sind, für das Modell verknüpfte Rippe. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem leichteren bionischen Modell, rot einem leichteren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Masse [kg]	60,41	22,53	19,71	21,04
	max. Verformung	0,000995	0,000987	0,000952	0,000994
Referenzmodell	Masse [kg]	64,18	22,34	19,09	20,65
	max. Verformung	0,000997	0,000978	0,000984	0,000974
Δ der Massen [%]		-5,87	0,85	3,25	1,89

Tab. A.2 Die Ergebnisse der Spannungsanalyse für das Modell verknüpfte Rippe. Neben den absoluten Werten in Prozent, sind ebenso die prozentualen Differenzen dargestellt. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem besseren bionischen Modell, rot einem besseren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	2,55	4,02	2,43	3,21
	maximale Auslastung [%]	25,93	39,47	29,32	32,27
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,3918	0,1269	0,0295	0,2240
Referenzmodell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	1,92	3,78	2,46	3,29
	maximale Auslastung [%]	29,31	27,85	20,98	30,25
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,0600	0,5730	0,9886	0,2462
Δ der Standardabweichungen der Auslastungen [%]		32,81	6,35	-1,22	-2,43
Δ der maximalen Auslastungen [%]		-11,53	41,72	39,75	6,68
Δ der Elementanzahlen der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]		553	-77,85	-97,02	-9,02

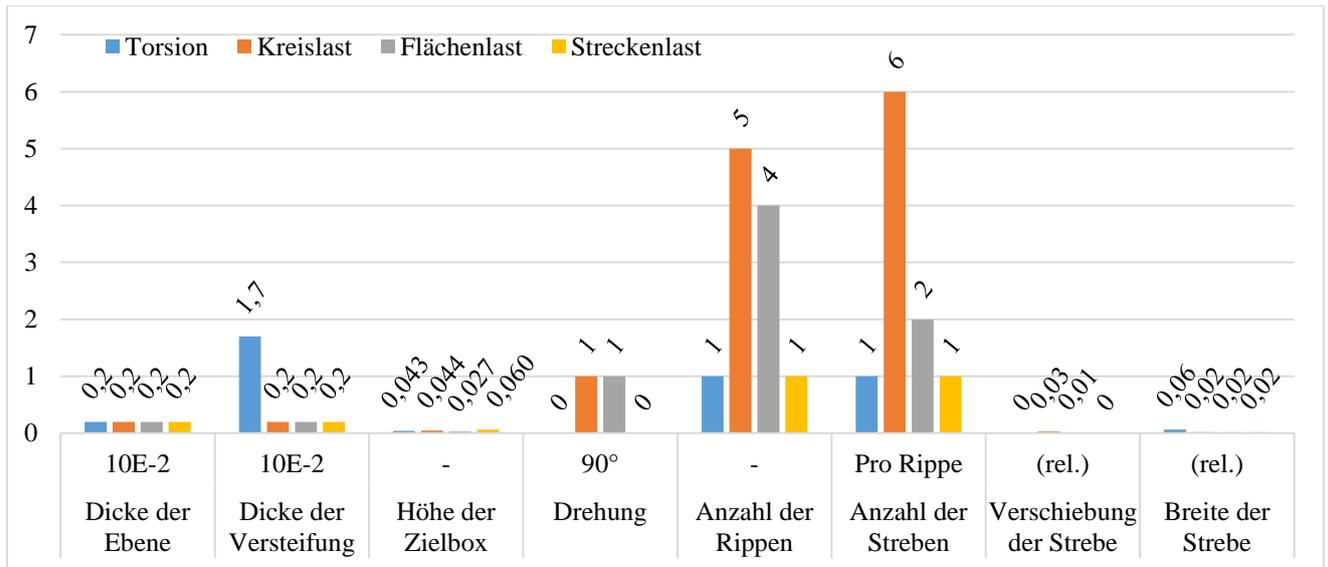


Abb. A.1 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der bionischen Modelle der verknüpften Rippe. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die sich auf die transformierende Geometrie mit der Methode Boxmorph beziehen.

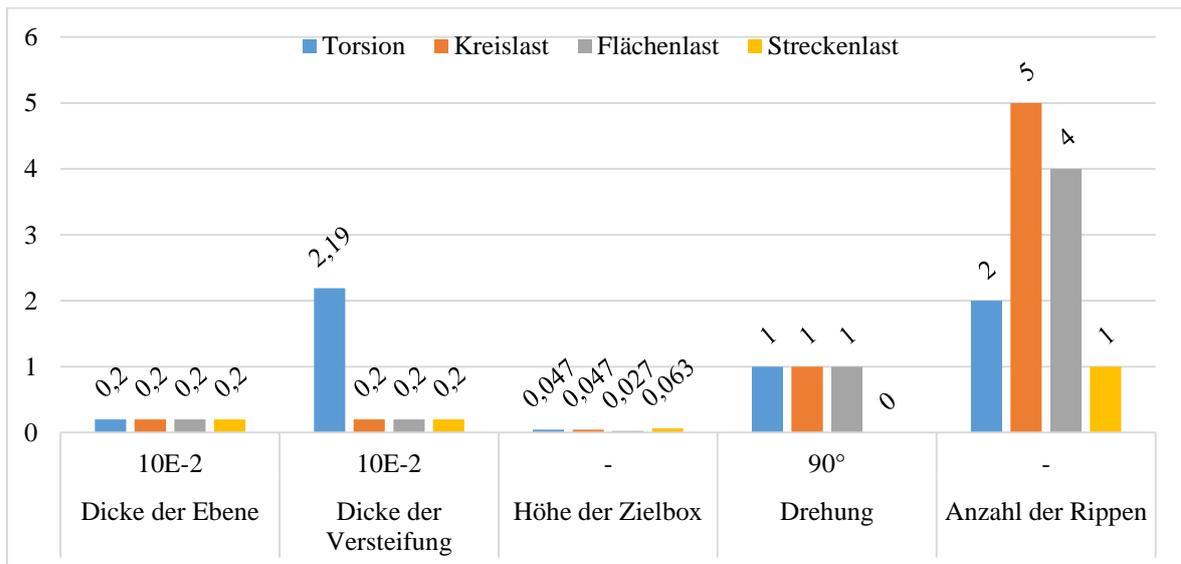


Abb. A.2 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der Referenzmodelle der verknüpften Rippe.

Tab. A.3 Auflistung der einzelnen Parameter des Modells verknüpfte Rippe, deren Einheit, deren minimaler und maximaler Grenzen und deren parameteroptimierter Endwerte. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die sich auf die transformierende Geometrie mit der Methode Boxmorph beziehen. (L1 – Torsion, L2 – Kreislast, L3 – Flächenlast, L4 – Streckenlast).

Parameter	Einheit	Min.	Max.	Bionisches Modell				Referenzmodell			
				L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Dicke der Ebene	10E-2	0,20	2,50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Dicke der Versteifung	10E-2	0,20	2,50	1,7	0,2	0,2	0,2	2,19	0,2	0,2	0,2
Höhe der Zielbox	-	0,01	0,20	0,04	0,04	0,03	0,06	0,05	0,05	0,03	0,06
Drehung	90°	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
Anzahl der Rippen	-	1	10	1	5	4	1	2	5	4	1
Anzahl der Streben	Pro Rippe	1	10	1	6	2	1	-	-	-	-
Verschiebung der Strebe	(rel.)	0,00	1,00	0	0,03	0,01	0	-	-	-	-
Breite der Strebe	(rel.)	0,02	0,50	0,06	0,02	0,02	0,02	-	-	-	-

Anhang für das Modell versteifte Rippe

Tab. A.4 Die absoluten Massen und die maximalen Verformungen ohne Einheit, da sie in Relation zu der Modellseitenlänge (1m) angegeben sind, für das Modell versteifte Rippe. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem leichteren bionischen Modell, rot einem leichteren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Masse [kg]	152,36	21,63	17,61	17,46
	max. Verformung	0,000999	0,001	0,001	0,000997
Referenzmodell	Masse [kg]	152,45	18,65	17,74	19,37
	max. Verformung	0,000999	0,000996	0,000974	0,000986
Δ der Massen [%]		-0,06	15,98	-0,73	-9,86

Tab. A.5 Die Ergebnisse der Spannungsanalyse für das Modell versteifte Rippe. Neben den absoluten Werten in Prozent, sind ebenso die prozentualen Differenzen dargestellt. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem besseren bionischen Modell, rot einem besseren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	2,39	2,88	2,35	3,06
	maximale Auslastung [%]	50,05	16,17	22,86	32,56
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,0371	1,5484	0,2026	0,1716
Referenzmodell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	2,36	3,51	2,10	3,13
	maximale Auslastung [%]	54,09	28,97	15,4	20,45
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,0342	0,9579	1,776	1,2234
Δ der Standardabweichungen [%]		1,27	-17,95	11,9	-2,24
Δ der maximalen Auslastungen [%]		-7,47	-44,18	48,44	59,22
Δ der Elementanzahlen der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]		8,48	61,65	-88,59	-85,97

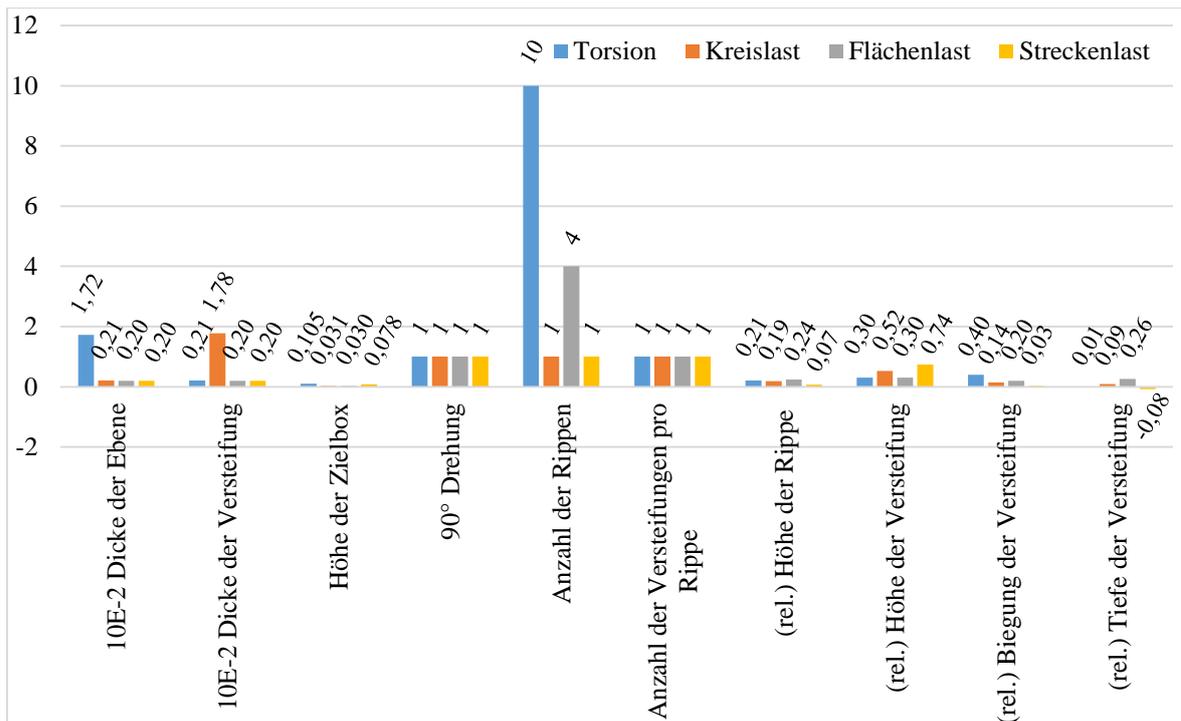


Abb. A.3 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der bionischen Modelle der versteiften Rippe. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die sich auf die transformierende Geometrie mit der Methode Boxmorph beziehen.

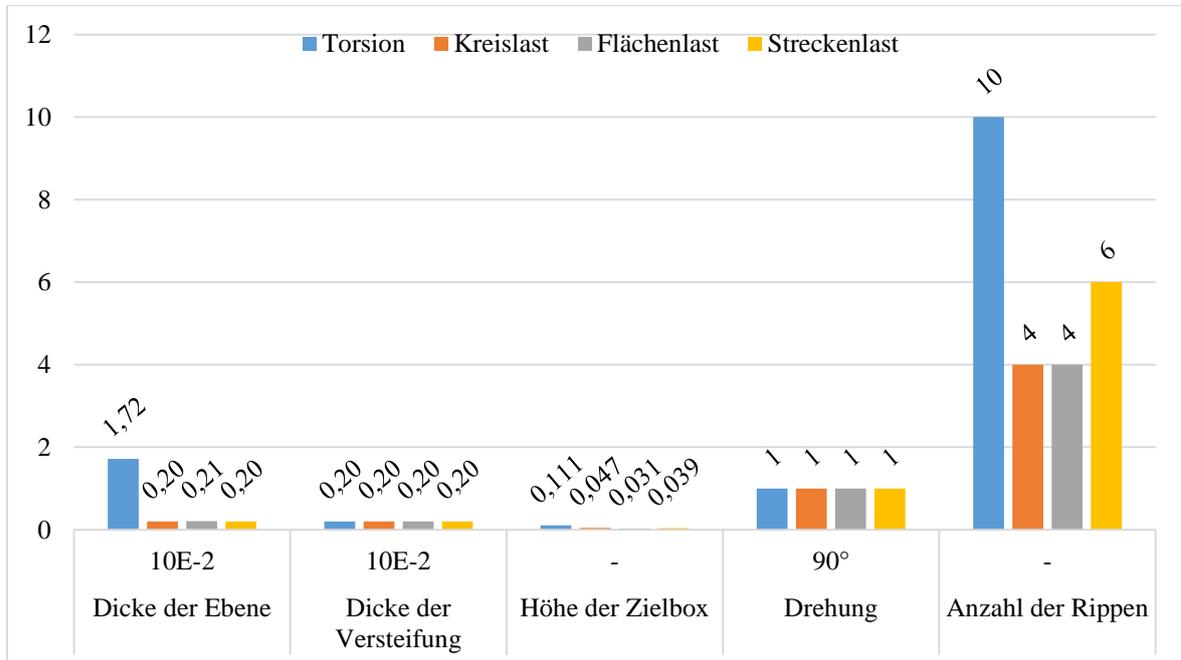


Abb. A.4 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der Referenzmodelle der versteiften Rippe.

Tab. A.6 Auflistung der einzelnen Parameter des Modells versteifte Rippe, deren Einheit, deren minimaler und maximaler Grenzen und derer parameteroptimierter Endwerte. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die sich auf die transformierende Geometrie mit der Methode Boxmorph beziehen. (L1 – Torsion, L2 – Kreislast, L3 – Flächenlast, L4 – Streckenlast).

Parameter	Einheit	Min.	Max.	Bionisches Modell				Referenzmodell			
				L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Dicke der Ebene	10E-2	0,20	2,50	1,72	0,21	0,20	0,20	1,72	0,20	0,21	0,20
Dicke der Versteifung	10E-2	0,20	2,50	0,21	1,78	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Höhe der Zielbox	-	0,030	0,300	0,11	0,03	0,03	0,08	0,11	0,05	0,03	0,04
Drehung	90°	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Anzahl der Rippen	-	1	10	10	1	4	1	10	4	4	6
Anzahl der Versteifungen	Pro Rippe	1	10	1	1	1	1	-	-	-	-
Höhe der Rippe	(rel.)	0,03	0,40	0,21	0,19	0,24	0,07	-	-	-	-
Höhe der Versteifung	(rel.)	0,30	1,00	0,30	0,52	0,30	0,74	-	-	-	-
Tiefe der Versteifung	(rel.)	0,00	0,40	0,40	0,14	0,20	0,03	-	-	-	-
Biegung der Versteifung	(rel.)	-0,30	0,30	0,01	0,09	0,26	-0,08	-	-	-	-

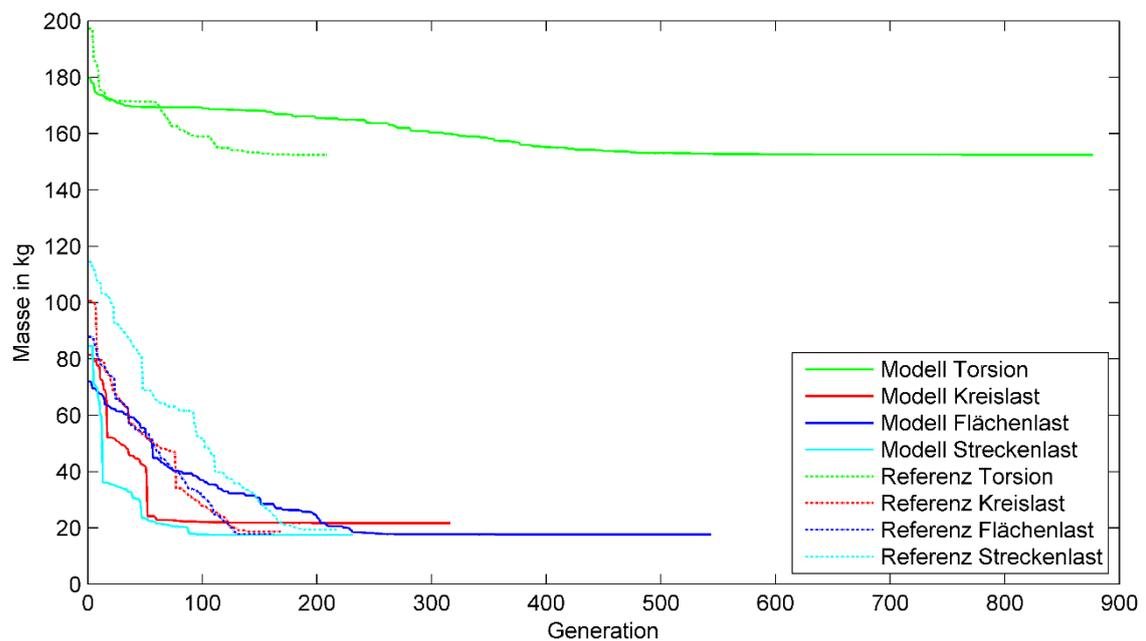


Abb. A.5 Darstellung der geringsten Massen für jede Generation der Parameteroptimierung für das Modell versteiften Rippe.

Anhang für das Modell Schalennachbildung

Tab. A.7 Die absoluten Massen und die maximalen Verformungen ohne Einheit, da sie in Relation zu der Modellseitenlänge (1m) angegeben sind, für das Modell Schalennachbildung. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem leichteren bionischen Modell, rot einem leichteren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Masse [kg]	29,02	21,51	19,83	18,92
	max. Verformung	0,000998	0,001	0,000998	0,001
Referenzmodell	Masse [kg]	44,73	21,77	19,23	20,48
	max. Verformung	0,000999	0,000996	0,000981	0,000977
Δ der Massen [%]		-35,12	-1,19	3,12	-7,62

Tab. A.8 Die Ergebnisse der Spannungsanalyse für das Modell Schalennachbildung. Neben den absoluten Werten in Prozent, sind ebenso die prozentualen Differenzen dargestellt. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem besseren bionischen Modell, rot einem besseren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	4,59	3,87	2,56	4,06
	maximale Auslastung [%]	52,84	81,28	32,73	75,41
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,0622	0,0127	0,0663	0,0557
Referenzmodell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	4,26	4,44	3,29	3,65
	maximale Auslastung [%]	38,63	64,44	40,02	41,46
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,4808	0,0515	0,184	0,0267
Δ der Standardabweichungen [%]		7,75	-12,84	-22,19	11,23
Δ der maximalen Auslastungen [%]		36,78	26,13	-18,22	81,89
Δ der Elementanzahlen der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]		-87,06	-75,34	-63,97	108,61

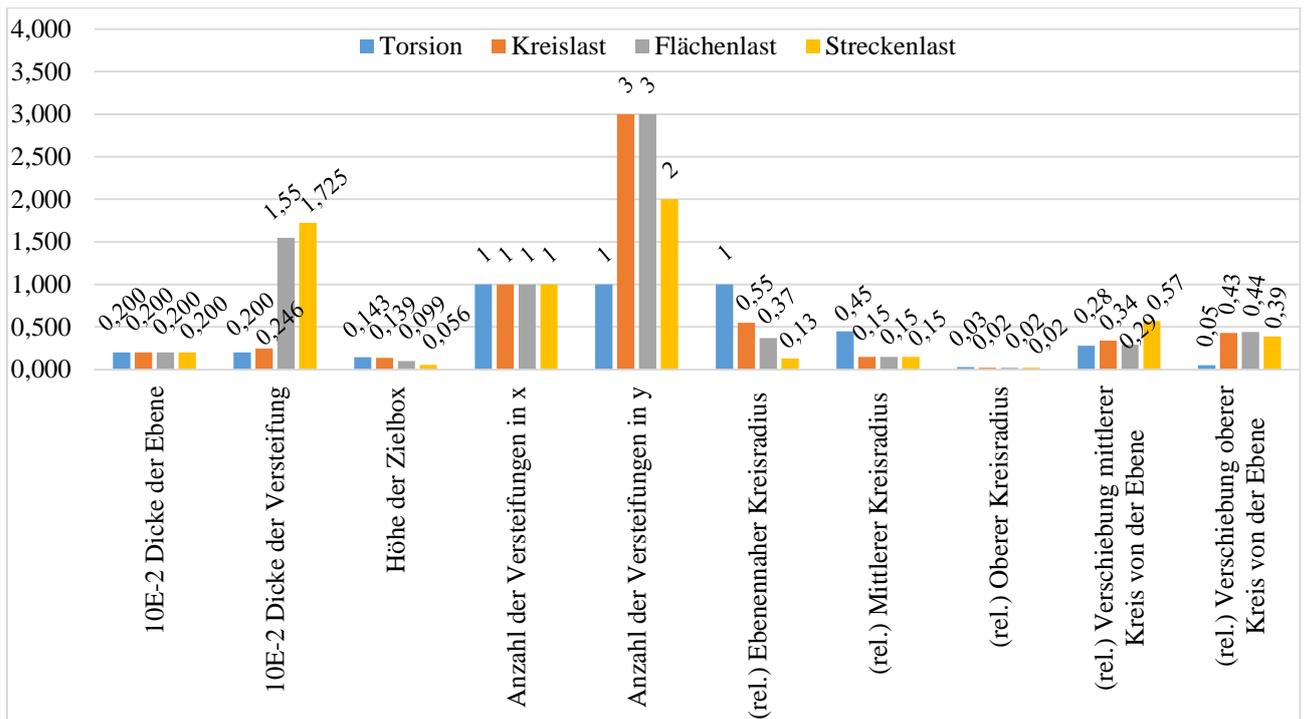


Abb. A.6 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der bionischen Modelle der Schalennachbildung. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die sich auf die transformierende Geometrie mit der Methode Boxmorph beziehen.

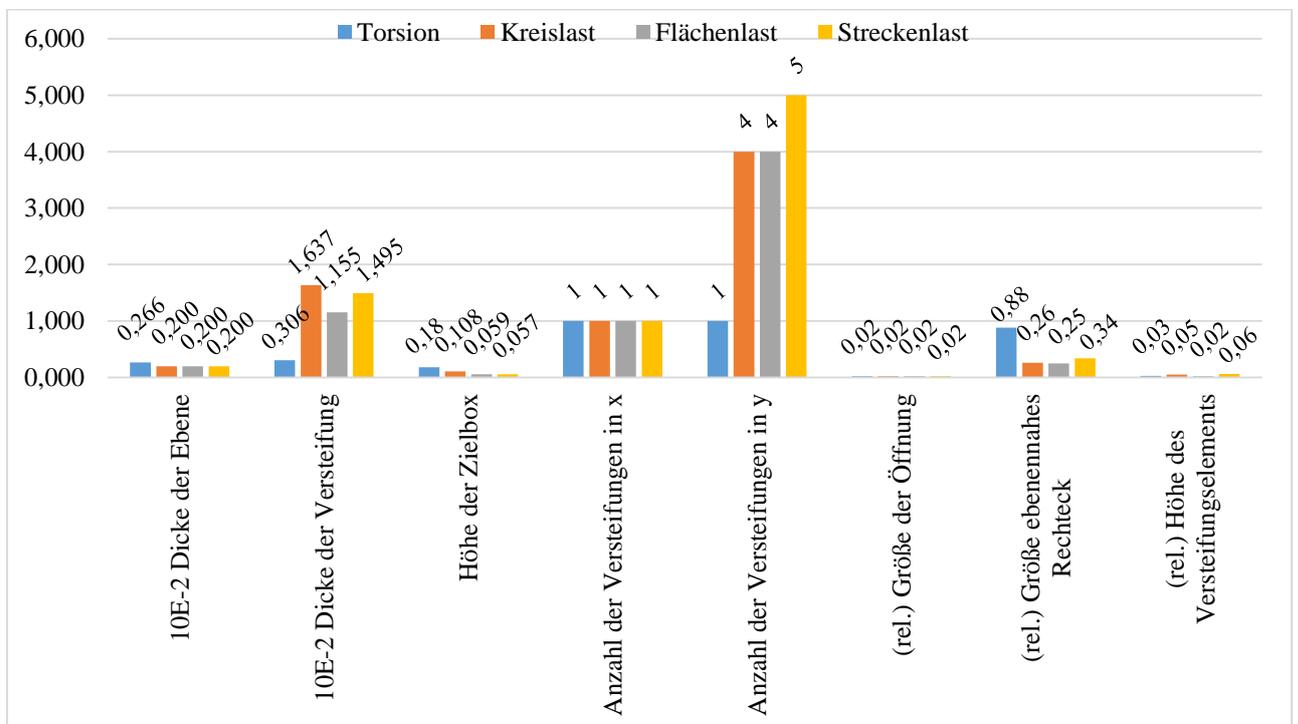


Abb. A.7 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der Referenzmodelle der Schalennachbildung. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die sich auf die transformierende Geometrie mit der Methode Boxmorph beziehen.

Tab. A.9 Auflistung der einzelnen Parameter des Modells Schalennachbildung, deren Einheit, deren minimaler und maximaler Grenzen und derer parameteroptimierter Endwerte. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die sich auf die transformierende Geometrie mit der Methode Boxmorph beziehen. (L1 – Torsion, L2 – Kreislast, L3 – Flächenlast, L4 – Streckenlast).

Parameter	Einh.	Min.	Max.	Bionisches Modell				Referenzmodell			
				L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Dicke der Ebene	10E-2	0,20	2,50	0,20	0,20	0,20	0,20	0,26	0,20	0,20	0,20
Dicke der Versteifung	10E-2	0,20	2,50	0,20	0,25	1,55	1,73	0,31	1,64	1,16	1,5
Höhe der Zielbox	-	0,02	0,30	0,14	0,14	0,1	0,06	0,18	0,11	0,06	0,06
Anzahl der Versteifungen in x	-	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1
Anzahl der Versteifungen in y	-	1	10	1	3	3	2	1	4	4	5
Ebenennaher Kreisradius	(rel.)	0,00	1,00	1	0,55	0,37	0,13	-	-	-	-
Mittlerer Kreisradius	(rel.)	0,15	0,45	0,45	0,15	0,15	0,15	-	-	-	-
Oberer Kreisradius	(rel.)	0,02	0,20	0,03	0,02	0,02	0,02	-	-	-	-
Verschiebung mittlerer Kreis von der Ebene	(rel.)	0,25	0,80	0,28	0,34	0,29	0,57	-	-	-	-
Verschiebung oberer Kreis von der Ebene	(rel.)	0,05	0,60	0,05	0,43	0,44	0,39	-	-	-	-
Größe der Öffnung	(rel.)	0,02	0,20	-	-	-	-	0,02	0,02	0,02	0,02
Größe ebenennahes Rechteck	(rel.)	0,25	0,95	-	-	-	-	0,88	0,26	0,25	0,34
Höhe des Versteifungselements	(rel.)	0,01	0,20	-	-	-	-	0,03	0,05	0,02	0,06

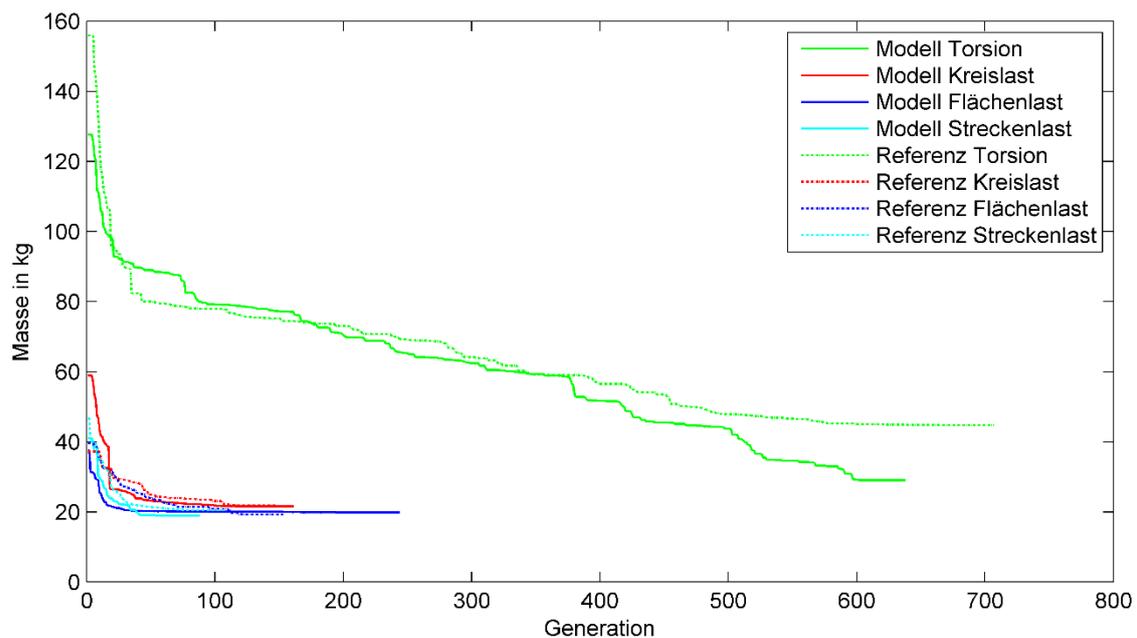


Abb. A.8 Darstellung der geringsten Massen für jede Generation der Parameteroptimierung für das Modell Schalennachbildung.

Anhang für das Modell Doppel-T-Wabe

Tab. A.10 Die absoluten Massen und die maximalen Verformungen ohne Einheit, da sie in Relation zu der Modellseitenlänge (1m) angegeben sind, für das Modell Doppel-T-Wabe. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem leichteren bionischen Modell, rot einem leichteren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Masse [kg]	19,6	8,51	7,96	32,83
	max. Verformung	0,001003	0,001	0,000818	0,001
Referenzmodell	Masse [kg]	36,55	35,97	33,79	34,05
	max. Verformung	0,000995	0,00999	0,000948	0,000941
Δ der Massen [%]		-46,37	-76,34	-76,44	-3,58

Tab. A.11 Die Ergebnisse der Spannungsanalyse für das Modell Doppel-T-Wabe. Neben den absoluten Werten in Prozent, sind ebenso die prozentualen Differenzen dargestellt. Die prozentualen Differenzen der Massen sind des Weiteren durch einen Farbcode hinterlegt. Grün entspricht einem besseren bionischen Modell, rot einem besseren Referenzmodell.

		Torsion	Kreislast	Flächenlast	Streckenlast
Bionisches Modell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	5,48	3,59	2,53	3,77
	maximale Auslastung [%]	47,83	22,06	23,23	45,44
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,1698	0,7564	0,0504	0,0822
Referenzmodell	Standardabweichung der Auslastungsverteilung	1,69	2,50	1,46	1,81
	maximale Auslastung [%]	15,75	19,8	8,51	15,59
	Elementanzahl der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]	0,0469	0,3012	3,4727	0,3289
Δ der Standardabweichungen [%]		224,26	43,6	73,29	108,29
Δ der maximalen Auslastungen [%]		203,68	11,41	172,97	191,47
Δ der Elementanzahlen der obersten 20 % der Auslastung in Relation zur Gesamtelementanzahl [%]		262,05	151,13	-98,55	-75,01

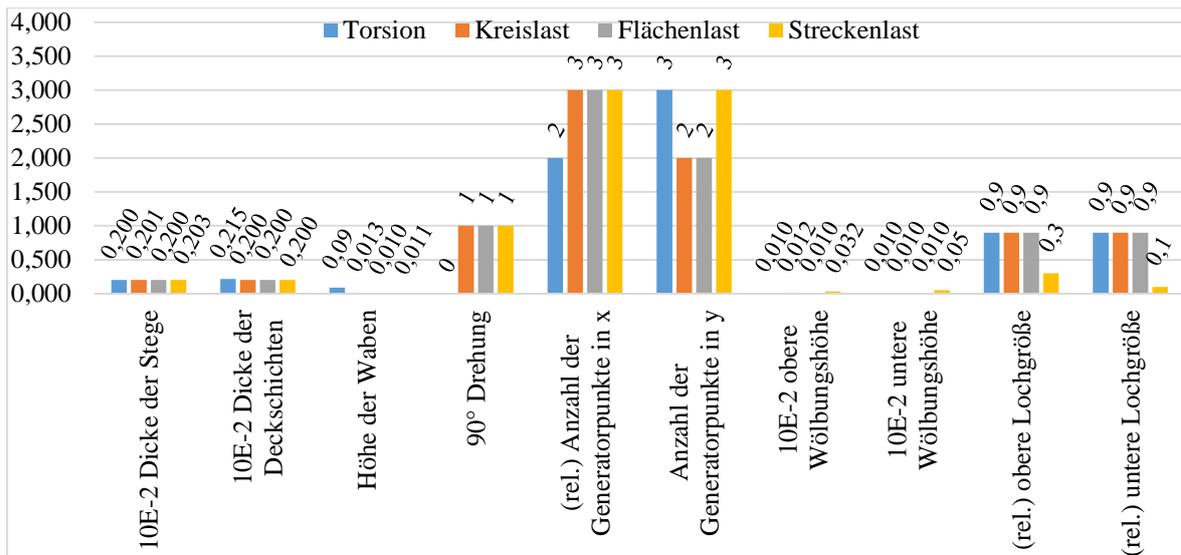


Abb. A.9 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der bionischen Modelle der Doppel-T-Wabe. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die skalierbare Werte in Relation zum maximal möglichen Wert darstellen.

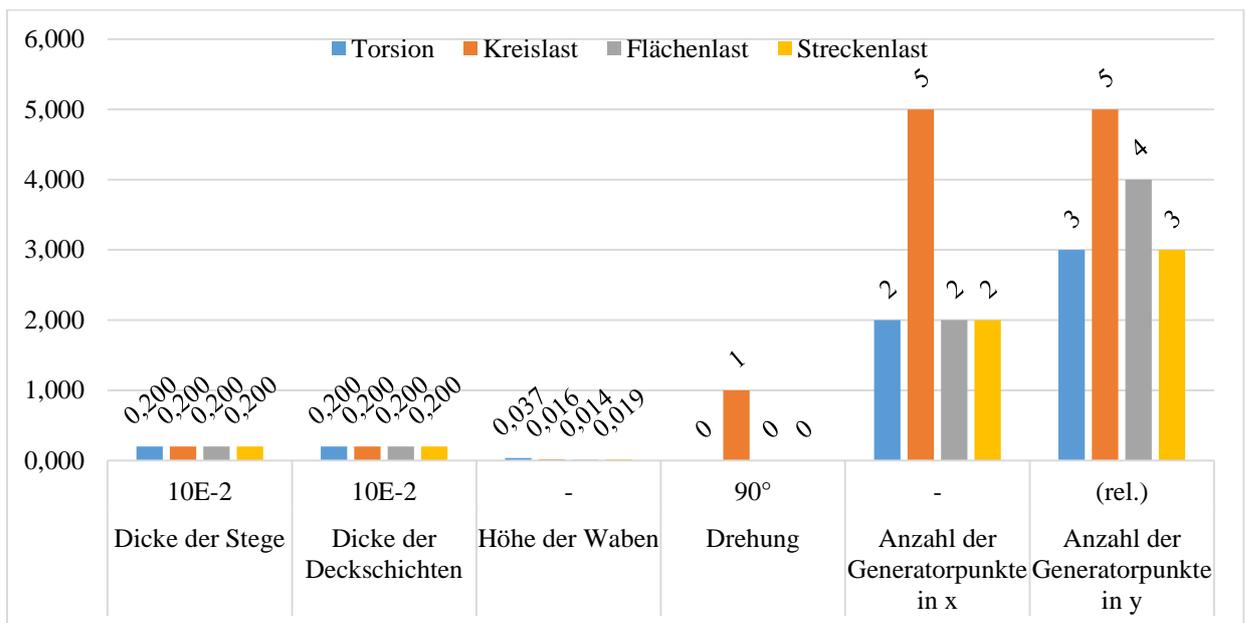


Abb. A.10 Diagramm der Parameter für die Ergebnisse der Optimierung der Referenzmodelle der Doppel-T-Wabe. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die skalierbare Werte in Relation zum maximal möglichen Wert darstellen.

Tab. A.12 Auflistung der einzelnen Parameter des Modells Doppel-T-Wabe, deren Einheit, deren minimaler und maximaler Grenzen und derer parameteroptimierter Endwerte. Die relative Einheit kennzeichnet Parameter, die skalierbare Werte in Relation zum maximal möglichen Wert darstellen. (L1 – Torsion, L2 – Kreislast, L3 – Flächenlast, L4 – Streckenlast).

Parameter	Einheit	Min.	Max.	Bionisches Modell				Referenzmodell			
				L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
Dicke der Stege	10E-2	0,200	2,500	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Dicke der Deckschichten	10E-2	0,200	2,500	0,22	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Höhe der Waben	-	0,010	0,300	0,09	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02
Drehung	90°	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0
Anzahl der Generatorpunkte in x	-	3	10	2	3	3	3	2	5	2	2
Anzahl der Generatorpunkte in y	(rel.)	2	11	3	2	2	3	3	5	4	3
obere Wölbungshöhe	10E-2	0,010	0,100	0,01	0,01	0,01	0,03	-	-	-	-
untere Wölbungshöhe	10E-2	0,010	0,100	0,01	0,01	0,01	0,05	-	-	-	-
obere Lochgröße	(rel.)	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,3	-	-	-	-
untere Lochgröße	(rel.)	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	-	-	-	-

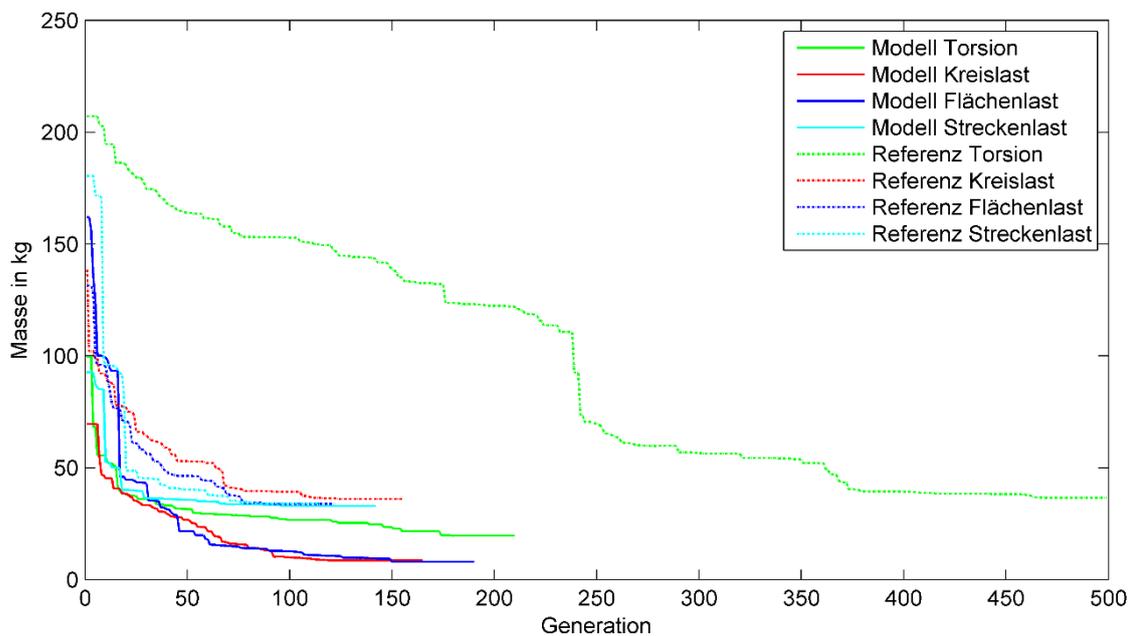


Abb. A.11 Darstellung der geringsten Massen für jede Generation der Parameteroptimierung für das Modell Doppel-T-Wabe.

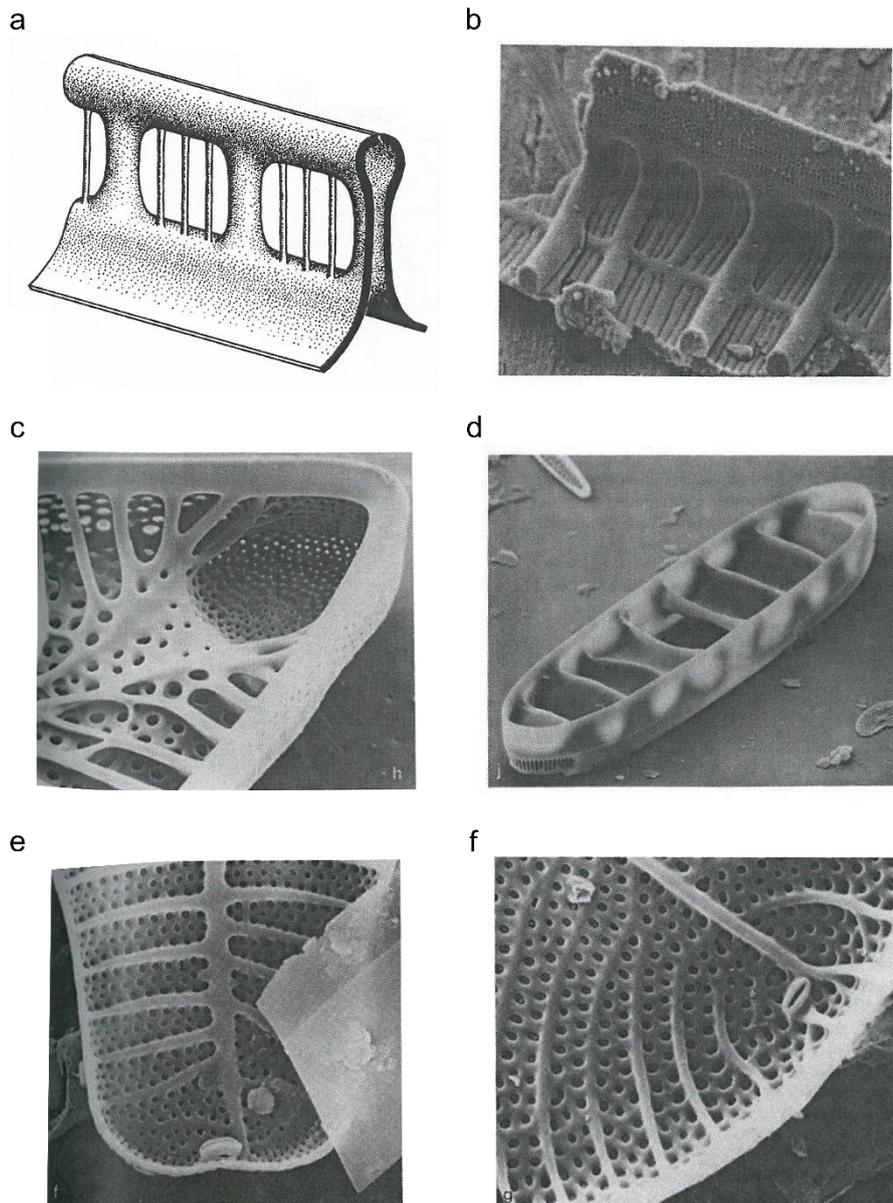


Abb. A.12 Einige der alternativen Diatomeen-Schalenstrukturen, die potentiell als Vorbild für Flächenversteifungen dienen können. (a) Eine aufgelöste Rippe mit wenigen Hauptstreben und mehreren dünnen Stützstreben (z.B. *Surirella* spec., *Stenopterobia* spec. oder *Campylodiscus* spec.) (Round et al., 1990, S. 45). (b) Fraktale Rippenstruktur (*Diatoma* spec.) (ebd., S. 365). (c) Diatomeen-Halbschale, deren zulaufende Form im Inneren durch Streben ausgefüllt ist (*Sheshukovia* spec.) (ebd., S. 225). (d) Ausgliederung einer Struktur durch offene Profile (*Grammatophora* spec.) (ebd., S. 437). (e) und (f) Rippen, die alternierend und adaptiv der Morphologie entsprechend verlaufen (*Podocystis* spec.) (ebd., S. 397).

**Westfälische Hochschule
Abteilung Bocholt**

Fachbereich Maschinenbau

Name: Sommer

Vorname: Paul

Matrikel-Nr.: 201128590

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Bachelorarbeit selbständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen und bei Zitaten kenntlich gemachten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Bremerhaven, den 29.08.2014

B Daten-CD

Die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit entstandenen und für das nähere Verständnis notwendigen Dateien sind auf der folgenden Daten-CD enthalten.

Inhalte:

- Grasshopper-Dateien aller Modelle
- Digitale Ausgabe der vorliegenden Bachelorarbeit