

ENTWICKLUNG EINER SYSTEMATISCHEN VORGEHENSWEISE FÜR BIONISCHEN LEICHTBAU

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

ZUR ERLANGUNG DES GRADES
DOKTOR-INGENIEUR

GENEHMIGTE

DISSERTATION

VON
DIPL.-ING. MORITZ MAIER

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben
Prof. Dr.-Ing. Axel Herrmann

Tag der mündlichen Prüfung: 16.09.2015

Für meinen Vater

Kurzfassung

In den Ingenieurwissenschaften ist ein etablierter Prozess für leichtbaugerechtes Konstruieren bekannt, welcher jedoch den kritischen Arbeitsschritt der Konzeptfindung enthält, der in der Technik derzeit meist nur durch Erfahrung und auf Basis bereits bestehender Konstruktionen gelöst wird.

In der Natur hat die Evolution sehr ausgereifte Bauprinzipien hervorgebracht, welche als Vorbilder für technische Leichtbaukonstruktionen dienen können. Nach Darwin überlebt aufgrund der natürlichen Selektion nur das am besten angepasste Individuum. Planktonorganismen z. B. entwickelten über mehrere Millionen Jahre stabile Leichtbauweisen ihrer Schalen. Sie müssen zum einen extrem stabile Defensivstrukturen besitzen, um sich gegenüber Fressfeinden behaupten zu können, zum anderen müssen sie mit ihrem Baumaterial möglichst sparsam umgehen, um nicht aufgrund ihres Gewichtes in Wassertiefen abzusinken, in denen keine Photosynthese mehr möglich ist.

In dieser Arbeit wird vor diesem Hintergrund ein systematischer Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien zu technischen Leichtbaulösungen untersucht. Es wird eine systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau entwickelt, welche das Potential von Planktonschalen zur Konzeptfindung nutzt und durch eine Ergänzung der etablierten Produktentwicklungsmethodik der Ingenieurwissenschaften umgesetzt werden kann.

Zunächst wird hierfür der Auswahlprozess untersucht, welcher dem Auffinden eines oder mehrerer passender natürlicher Vorbilder für ein technisches Problem dient. Mit Hilfe einer speziellen Suchfunktionalität erfolgt ein schnelles Auffinden passender natürlicher Vorbilder innerhalb eines Wissensspeichers. Gegenstand des Wissensspeichers sind biologische Vorbilder, die hinsichtlich ihrer strukturmechanischen Eigenschaften aufbereitet vorliegen. Eine vereinfachte Bewertung des Leichtbaupotentials der biologischen Vorbilder wird im Wissensspeicher integriert. Die Abstraktion der Prinzipien der Natur zur technischen Lösung wird anschließend anhand eines Transfers biologischer Bauprinzipien mit Hilfe der Topologieoptimierung innerhalb eines speziellen Bauraumes der biologischen Strukturen untersucht. Die parametrische Optimierung wird als Hilfsmittel zur weiteren Spezialisierung der durch den automatisierten Transfer gewonnenen Bauprinzipien angewandt. Die betrachteten Methoden und Werkzeuge werden abschließend anhand eines aktuellen Anwendungsfalles getestet und bewertet. Hierzu wird eine Gründungsstruktur für eine Offshore-Windenergieanlage entworfen.

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Marine Ressourcen (IMARE), sowie am Alfred-Wegener-Institut Helmholtzzentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) und dem Institut für Produktion und Logistik der Universität Bremen (BIBA). Hier hatte ich die Möglichkeit, durch Erfahrungen aus zahlreichen internationalen Forschungs- und Industrieprojekten mein Thema zu entwickeln und meine Ansätze auf Konferenzen mit einem internationalen Fachpublikum zu diskutieren.

Zu besonderem Dank bin ich meinem Professor und Doktorvater Herrn Professor Thoben verpflichtet, der mich stets mit seinen scharfsinnigen Anregungen unterstützt hat. Ohne seinen wertvollen akademischen Rat wäre diese Arbeit nicht entstanden. Ebenso geht mein Dank an meinen Betreuer Christian, der mich stets in meinen Forschungen unterstützt hat und diese Arbeit mit sehr wertvollen Ratschlägen aus dem Bereich der Biologie bereichert hat. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei meinen Mitarbeitern und Freunden Marius, Nils, Daniel, Hanno, Sebastian, Robert und Lars, die mich in den vergangenen Jahren mit bereichernden Tipps und Diskussionsbeiträgen wiederholt in neue thematische Bahnen gelenkt haben und mich durch alle Höhen und Tiefen der Dissertation begleitet haben.

Eine herausragende Stellung in jeglicher Hinsicht nimmt meine Familie ein, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht zu dem Werk geworden wäre, das sie heute ist. Ein sehr bedeutungsvoller Dank gilt meinem Vater, der mich stets inspiriert und gestützt hat und mich auf allen Wegen dieser Arbeit bis zu seinem Tod begleitet hat.

„Der menschliche Schöpfergeist
kann verschiedene Erfindungen machen (...),
doch nie wird ihm eine gelingen, die schöner,
ökonomischer oder geradliniger wäre als die
der Natur, denn in ihren Erfindungen fehlt nichts
und nichts ist zu viel.“

Leonardo da Vinci

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Vorgehensweise und Zielstellung	10
2	Problemstellung	13
2.1	Vorgehen für leichtbaugerechte Konstruktionen	13
2.2	Bionische Konzepte und Entwürfe für leichtbaugerechtes Konstruieren	16
2.3	Zusammenfassung der Probleme und abgeleitete Forderungen	18
3	Stand der Technik	23
3.1	Konzeptfindung einer Leichtbaustruktur	23
3.2	Auffinden biologischer Vorbilder für technische Lösungen	26
3.2.1	Planktonorganismen als Vorbilder für Strukturleichtbau	28
3.3	Anpassung von Bauweisen an technische Randbedingungen	29
3.3.1	Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)	32
3.3.2	Soft-Kill-Option (SKO)	34
3.4	Spezialisierung von Konstruktionsentwürfen	35
3.4.1	Parameteroptimierung	36
3.4.2	Response Surface	38
3.4.3	Evolutionsstrategien	38
3.5	Diskussion und Fazit des Standes der Technik	42
4	Konzeptbildung	45
4.1	Arbeitsthesen und Vorgehen	46
4.2	Gliederung	47
5	Auffinden und Bewertung geeigneter biologischer Vorbilder zu einer technischen Leichtbauprobemstellung	49
5.1	Anforderungen und Inhalt eines Wissensspeichers	50
5.2	Funktionale Ähnlichkeitssuche	53
5.2.1	Merkmalsätze definieren	54
5.2.2	Merkmalstransformation	56
5.2.3	Clusteranalyse	58

5.2.4	Distanz, Similarität und Nächste-Nachbarn	60
5.2.5	Multidimensionale Skalierung	63
5.2.6	Diskussion der funktionalen Ähnlichkeitssuche	65
5.3	Einfache Strukturbewertung	65
5.3.1	Versagenshypothesen	66
5.3.2	Kennwerte	68
5.4	Umsetzung des Auffindens und Bewertens geeigneter biologischer Vorbilder .	72
5.4.1	Untersuchungen zum Basissystem	73
5.4.2	Umsetzung des Wissensspeichers auf Basis eines DAM Systems	76
5.4.3	Ressourcentypen	77
5.4.4	Suche nach Ressourcen	82
5.4.5	Umgang mit Suchergebnissen	86
6	Systematischer Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien	89
6.1	Kombination von Topologieoptimierung mit biologischen Bauprinzipien	90
6.1.1	Modifizierte SKO-Methode	92
6.1.2	SIMP-Methode innerhalb eines natürlichen Bauraumes	101
6.2	Umsetzung des Transfers von Konstruktionsprinzipien	104
6.2.1	3D-Aufnahmen mittels CLSM	104
6.2.2	Aufbereitung der Punktwolke zum Bauraum	105
6.2.3	Topologieoptimierung	106
6.2.4	Parametrische Optimierung	108
7	Anwendung am Beispiel einer Offshore Gründungsstruktur für Windenergieanlagen	115
7.1	Auffinden und Bewertung geeigneter biologischer Vorbilder	118
7.2	Systematischer Transfer der biologischen Konstruktionsprinzipien	120
7.3	Spezialisierung mit Hilfe parametrischer Optimierung	124
7.4	Dreibeiniges bionisches Jacket	128
8	Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse	131
8.1	Evaluation des Auffindens geeigneter Vorbilder im Wissensspeicher	131
8.2	Möglichkeiten und Grenzen des systematischen Prinzipientransfers	134
8.3	Diskussion der systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau	137
9	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Abkürzungsverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	III
	Tabellenverzeichnis	VII
	Literaturverzeichnis	VIII

1

Einleitung

Leichtbau hat sich als zukunftsweisende Schlüsseldisziplin im Ingenieurumfeld inzwischen fest etabliert. Insbesondere bei „Massen, welche beschleunigt oder gehalten werden müssen, gilt es zur Sicherstellung der Funktionserfüllung und im Sinne der ökologischen Verträglichkeit einer Struktur ein möglichst geringes Gewicht zu erzielen“ (Drechsler, 2006). Die von Heuss u. a. (2012) Anfang 2012 veröffentlichte Studie zum Thema Leichtbau kommt zu dem Schluss, dass sich der Leichtbaumarkt bis zum Jahr 2030 vervierfachen wird. Insbesondere im Automotive Bereich sind die vorgeschriebene Reduzierung des CO₂-Ausstoßes, sowie das aktuell bei Elektroantrieben infolge der schweren Akkus noch bedingte Mehrgewicht von rund einer Vierteltonne die beiden Hauptgründe, die höheren Kosten für Leichtbau in Kauf zu nehmen. Einer Masseersparnis von 100 kg steht beispielsweise bei einem PKW eine Verbrauchsmin-derung von durchschnittlich 0,5 L Kraftstoff je 100 km und 12 g/km CO₂ gegenüber (Klein, 2013, S. 1).

Schubert (2003) definiert Leichtbau als „Konstruktionsprinzip, das bei Erfüllung aller anderen Anforderungen ein Bauteil mit möglichst geringer Masse anstrebt“. Wiedemann (2007) sieht den Leichtbau als „Absichtserklärung, aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern“, oder gleichbedeutend „die Tragfunktion ohne Gewichtszunahme zu verbessern“. Die Hauptforderung an ein belastetes Bauteil ist, dass dieses so ausgelegt ist, dass die zulässige Beanspruchung in keinem Bereich überschritten wird und zugleich ein minimales Gewicht unter höchster Ausnutzung angestrebt wird. Diese Forderung ist in der Praxis jedoch meist nicht zu erzielen, da sie überlagert ist mit „Kostenaspekten, so

dass eine Extremlösung oft nicht verwirklichtbar ist und insofern zwischen technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein Kompromiss anzustreben ist“ (Klein, 2013).

1.1 Motivation

Beim Entwurf einer möglichst leichten funktionalen Struktur werden typischerweise Material substituiert und bereits bestehende Konstruktionen verändert bzw. optimiert, um so Entwicklungszeit und damit Kosten zu sparen. Diese Herangehensweise führt zu Lösungen, die von der Ausgangslösung geprägt sind und folglich wenig Spielraum für innovative, evtl. besser geeignete Lösungsansätze bieten. Nach Klein (2013, S. 11) ist „ein gutes Konzept letztlich auch der Garant für eine innovative Problemlösung. Der Konzeptentwicklung sollte daher große Bedeutung beigemessen werden. Leider zeigt die Erfahrung, dass man sich in der Praxis zu wenig mit Konzepten beschäftigt und sehr schnell nur eine Richtung verfolgt.“ Neue Konzepte, die nicht auf einer bestehenden Konstruktion basieren, sind nur durch einen kreativen Arbeitsschritt zu erreichen. Die prinzipielle Vorgehensweise für den Entwurf ist durch verfügbare Hilfsmittel wie Richtlinien und Konstruktionshandbücher gut beschrieben. Eine methodenbezogene Technik zum Entwurf von Konstruktionen wird beispielsweise in den VDI-Richtlinien (VDI 2221, 1993; VDI 2222 Blatt 1, 1997) aufgezeigt. Obwohl die Methodik gut beschrieben ist, gestaltet sich die Konzeptionierung eines Designs für eine gänzlich neue und daher unbekannte Lösung im frühen Entwicklungsstadium als schwierig und nimmt ca. 30% der Zeit eines kompletten Entwicklungsprojektes in Anspruch (Klein, 2013). Neben der Grundidee für eine neue Bauweise steht der Ingenieur der Tatsache gegenüber, dass Leichtbaukonstruktionen für konkrete technische Aufgabenstellungen durch sehr unterschiedliche Geometrien, Materialien und Bauweisen gelöst werden können. Da die Kombinationsmöglichkeiten aller denkbaren Variationen sehr zahlreich sind, ist deren Bewertung zu Beginn schwierig.

In der Natur hat die Evolution sehr ausgereifte Bauprinzipien hervorgebracht, welche als Vorbilder für technische Konstruktionen dienen können. Nach Darwin (1859) überlebt aufgrund der natürlichen Selektion nur das am besten angepasste Individuum. Wenn in natürlichen Systemen ein Selektionsdruck hinsichtlich Leichtbau besteht, sind folglich die hervorgebrachten Konstruktionen nahe einer optimalen Leichtbaulösung und können als Ideengeber für neuartige technische Leichtbaukonstruktionen dienen (Kull, 1990, S. 5).

Hier ist es jedoch nicht zielführend die Natur einfach zu kopieren, da diese neben Leichtbau immer auch anderen Zielgrößen gerecht werden muss. Nach Nachtigall (2008) ist es vielmehr notwendig, die natürlichen Phänomene und Funktionen zu verstehen, um diese Prinzipien als mögliche Lösung auf technische Probleme anzuwenden. Innovationssprünge, welche durch den Transfer biologischer Leichtbauweisen zu technischen Konstruktionen erzielt werden können, werden in der Bionik realisiert. Der englische Begriff „bionics“ wurde erstmals 1960 im Rahmen der Konferenz „Bionics Symposium: Living Prototypes - The Key to New Technology“ in Dayton, Ohio vorgestellt. Er leitet sich aus dem griechischen Stamm „bios“ (Leben) und dem

Suffix „-onics“ in der Bedeutung „Studium von“ ab. Im Deutschen ist das Kunstwort Bionik ein zusammengesetztes Wort aus Biologie und Technik. Bereits Ende des 15. Jahrhunderts entwarf Leonardo da Vinci seine ersten Flugmaschinen nach dem Vorbild der Natur (Gibbs-Smith, 1978) und legte damit den Grundstein der Bionik. Lilienthal (1889) fasste seine Beobachtungen in seinem 1889 veröffentlichten Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ zusammen und übertrug so die Leichtbaukonstruktion und Funktionsweise der Vogelflügel in die Technik (siehe Abb. 1.1). Seine Schlagflügelapparate wurden als starres Gerüst aus Weidenruten und Kantholmen ausgeführt und waren mit imprägniertem Baumwollstoff bespannt (siehe Abb. 1.2). Sir Joseph Paxton ließ sich im 19. Jahrhundert von den Blättern der Riesenseerose *Victoria amazonica* inspirieren und übertrug deren Bauweise auf die Dachkonstruktion des Crystal Palace anlässlich der Weltausstellung von 1851 in London.

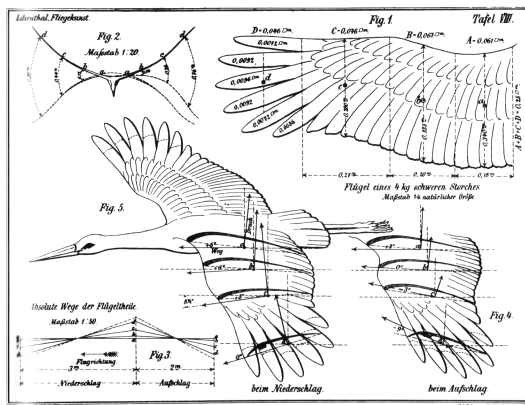


Abb. 1.1: Tafel VIII aus „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ von Otto Lilienthal



Abb. 1.2: Erste Gleitflugversuche von Otto Lilienthal mit kleinem Schlagflügelapparat

Die vorliegende Arbeit ist in die Forschungstätigkeiten im Themenumfeld der Planktonbiomechanik am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven (AWI) eingebunden. Die Aktivitäten der Forschergruppe zielen auf das Verständnis der funktionellen Morphologie¹ von Planktonorganismen ab. Als Plankton werden Organismen bezeichnet, welche im Wasser leben und deren Schwimmrichtung von den Wasserströmungen vorgegeben wird. Untersuchungen zur Evolution mariner Planktonorganismen, der Interaktion von Räuber/Beute-Organismen, Biomineralisation² und der Biodiversität von Planktongemeinschaften sind weitere Forschungsfelder, die von der Arbeitsgruppe untersucht werden. Eine besondere Organismuskategorie innerhalb des Planktons sind die sog. Kieselalgen oder auch Diatomeen. Im Rahmen dieser Forschungen postulierten Hamm u. a. (2003), dass die Schalen von Diatomeen hoch entwickelte und stabile Leichtbaugeometrien mit außergewöhnlichen Designs darstellen. Sie müssen zum einen extrem stabile Defensivstrukturen besitzen,

¹Ziel der funktionellen Morphologie ist es, eine Struktur im Hinblick auf eine bestimmte Funktion zu untersuchen.

²Biomineralisation bezeichnet den Vorgang, bei dem als Folge der Lebenstätigkeit von Organismen mineralische Produkte entstehen.

um sich gegenüber Fressfeinden behaupten zu können, zum anderen müssen sie mit ihrem Baumaterial, welches eine höhere Dichte als Wasser hat, möglichst sparsam umgehen, um nicht in Wassertiefen abzusinken, in denen keine Photosynthese mehr möglich ist. Die Anzahl der Parameter, welche die evolutive Entwicklung der Schalen bestimmen, ist folglich überschaubar: strukturelle Festigkeit dient dem Schutz vor Fressfeinden; Leichtigkeit verhindert ein Absinken. Während vieler Millionen Jahre der Evolution fanden unzählige Optimierungsschritte statt. Über 100.000 verschiedene Arten mit unterschiedlichen Leichtbaustrukturen sind derzeit bekannt (Hamm, 2005a). Im Gegensatz zu höher entwickelten biologischen Vorbildern, bei denen neben Schutz und Gewicht eine enorme Vielzahl an weiteren Selektionsdrücken wie z. B. bei Vögeln die Aerodynamik, Steuerfähigkeiten, Wärmemanagement und Balzelemente, vorhanden ist, konnten die zugrunde liegenden Selektionsdrücke der Schalen von Diatomeen relativ umfassend beschrieben und verstanden werden, was eine Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Übertragung von Prinzipien aus der Natur in die Technik ist.

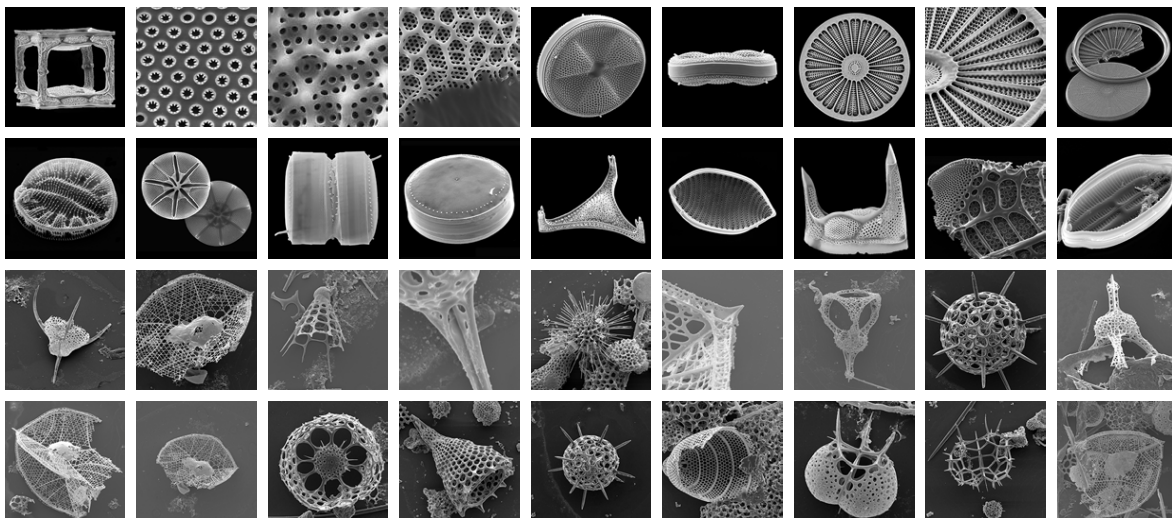


Abb. 1.3: Zeile eins und zwei: Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen von Diatomeenschalen; Zeile drei und vier: REM Aufnahmen unterschiedlicher Exoskelette von Radiolarien

Diatomeen sind mikroskopisch kleine Algen mit einer durchschnittlichen Größe von wenigen Mikrometern bis zu einigen Millimetern, die in der photischen Zone der Ozeane treiben (Round u. a., 1990). Sie bilden den Hauptbestandteil des Phytoplanktons und sind verantwortlich für einen Großteil der ozeanischen Primärproduktion³ (Aberle u. a., 2007; Epstein, 1997; Fry u. Wainright, 1991; Mann, 1999; Sherr u. Sherr, 2007). Diatomeen sind in Bezug auf die Artenvielfalt und Biomasse die wichtigste Gruppe einzelliger Mikroalgen und dominieren oft die Phytoplankton-Zusammensetzung in den Ozeanen und in vielen Süßwasser-Ökosystemen (Armbrust, 2009; Brownlee u. Taylor, 2001; Nelson u. a., 1995; Smetacek, 1999). Sie haben sich gegenüber einer breiten Palette von Räubern wie Copepoden und Krill zu schützen (Smetacek, 2001) und besitzen daher aufwendig gebaute Panzer. Die grundlegende Struktur

³Produktion von Biomasse, die am Anfang der Nahrungskette steht

der Kieselalgen ist das hochfeste, kieselensäurehaltige Exoskelett (Frustel, vgl. Abb. 1.3 erste und zweite Reihe). Diese Frustel gleicht einem Bunker aus zwei Schalen. Der Bildungsprozess der Frustel wird initialisiert durch Kondensationsprodukte der Orthokieselsäure innerhalb eines speziellen Vesikels (Drum u. Pankratz, 1964). Obwohl die Frusteln hauptsächlich aus biogenem, amorphem Silikat bestehen, sind sie nicht rein mineralisch. Sie enthalten Silaffine⁴ und langkettige organische Komponenten, welche ein vielseitiges Verbundmaterial bilden (Sumper u. Kröger, 2004). Brunner u. a. (2009) konnten, wie in Abb. 1.4 dargestellt, zeigen, dass zusätzliche Chitinfasern innerhalb der Silikatschalen von Diatomeen einen komplexen Materialmix bilden.

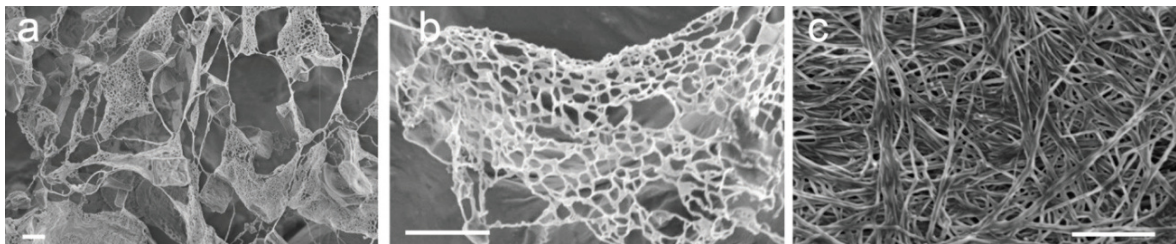


Abb. 1.4: a) REM-Aufnahmen von organischen Gerüststrukturen der Diatomee *Thalassiosira pseudonanna*. b) Mit NH_4F behandelte Probe bei der das Silikat gelöst wurde. c) Mit NH_4F und NaOH behandelten Probe. Die Kieselsäure und organische Verbindungen sind aufgelöst. Nur das Chitin ist noch vorhanden. (Quelle: Brunner u. a. (2009))

Der prinzipielle Aufbau einer Diatomee ist in Abb. 1.5 dargestellt. Die einer runden Schachtel ähnelnde Diatomee besteht aus zwei Deckeln (Epivalve und Hypovalve), welche durch Gürtelbänder zusammengehalten werden. Die Zelle befindet sich im Inneren der Schachtel.

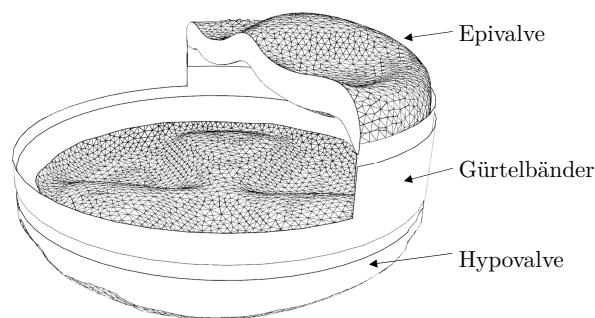


Abb. 1.5: Prinzipieller Aufbau einer Kieselalge

Diatomeen werden von Organismen unterschiedlichster Größe angegriffen. Von kleinsten Erregern wie beispielsweise Viren (Nagasaki, 2008) über heterotrophe Nanoflagellaten⁵ (Sherr u. Sherr, 2007), parasitäre Protisten und Pilze bis hin zu vielzelligen Tieren (sog. Metazoa, insbesondere sog. Ruderfußkrebse oder auch Copepoden, siehe Abb. 1.6) müssen sich die Diatomeen schützen. Während die Zellmembran den Schutz vor Kleinsternregern sicherstellen

⁴Niedermolekulare Produkte, welche in der Lage sind aus gewöhnlicher Kieselsäure innerhalb von Minuten einen Festkörper mit komplexer Nanostruktur auszufällen

⁵Einzellige Lebewesen, die peitschenähnliche Zellfortsätze besitzen

soll, stellt die Frustel einen mechanischen Schutz vor größeren Feinden dar. Nach Bertram ist „die Hauptbeziehung zwischen den Diatomeen und den Copepoden (...) die Räuber - Beute - Beziehung“ (Bertram, 2010, S. 12). Diatomeen müssen sich folglich nicht nur innerhalb ihrer eigenen Spezies behaupten, sondern müssen sich ebenfalls interspezifisch⁶ durchsetzen. Der mechanische Schutz erfolgt hierbei durch die Einlagerung von Kieselsäure in ihre Schalen. Hierfür nutzen sie das hochfeste Material Siliciumdioxid (amorphes Silikat / Opal mit 98% $SiO_2 \cdot H_2O$, berechnete Festigkeit bis ca. 560 N/mm^2), um sich zu panzern. Mehrere Studien beschäftigen sich mit der Bildung dieser Strukturen, der Unterstrukturen und deren Kombination (z. B. (Kröger u. a., 2000, 1999; Pickett-Heaps, 1998; Poulsen u. a., 2003; Sumper, 2002; Sumper u. Brunner, 2008)) sowie den Umwelteinflüssen auf die Strukturen (z. B. Hutchins u. Bruland (1998); Marchetti u. Cassar (2009); Takeda (1998); Wilken u. a. (2011)).

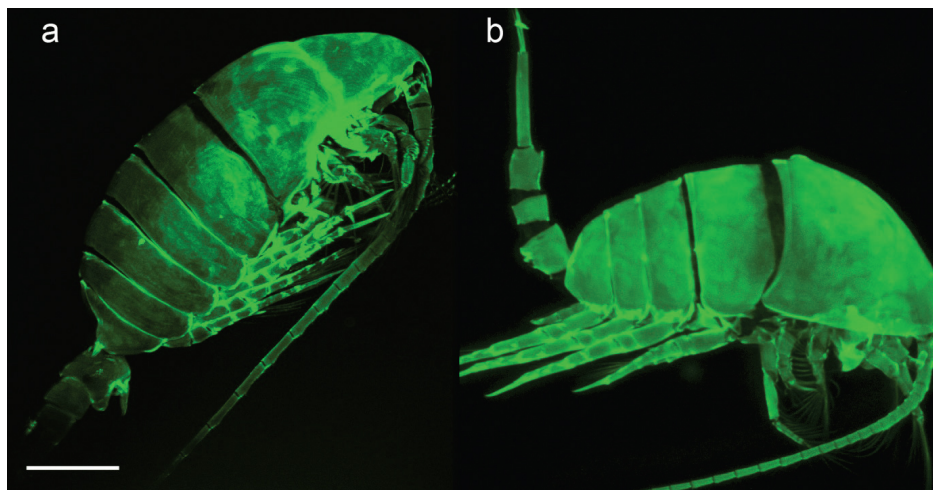


Abb. 1.6: Darstellung der Nordsee-Copepoden *Centropages hamatus* (a) und *Temora longicornis* (b). Skalierungsbalken: $200 \mu\text{m}$

Das hochfeste Material hat jedoch auch eine relativ hohe Dichte von ca. $2,2 - 2,7 \text{ g/cm}^3$, welche bei zu masselhafter Panzerung zum Absinken der antriebslosen Kieselalgen führen würde. Da mit zunehmender Wassertiefe die Lichtintensität stark abnimmt, müssen Kieselalgen in den oberen Wasserschichten verweilen, um genügend Sonnenlicht für die lebensnotwendige Photosynthese aufnehmen zu können. Dies ist nur mit einer leichten Panzerung möglich.

Das Wettrennen zwischen den leichten Defensivstrukturen (Kieselalgen) und den aggressiven Zahnstrukturen (Gnathobasen) der Copepoden führte über viele Evolutionsschritte zu sehr ausgereiften Leichtbauweisen bei den Schalen der Diatomeen. Die ebenfalls hoch spezialisierten Copepoden nutzen beispielsweise eine Art Zahnschmelz aus Kieselsäure (vgl. Abb. 1.7), welcher den Gnathobasen zusätzliche Festigkeit verleiht (Michels u. Schnack-Schiel, 2005).

Michels u. a. (2012) untersuchten den komplexen Materialmix innerhalb der Zahnstrukturen von Copepoden. Wie in Abb. 1.8 gezeigt, werden verschiedene Materialien wie beispielsweise

⁶Konkurrenz zwischen zwei Arten, welche als Selektionsfaktor für die Evolution wirkt

Resilin, Chitin und Silikat miteinander verbunden, um eine weiche Lagerung des extrem harten Zahnschmelzes zu erreichen. In diesem Aufbau wird eine Anpassung der Zahnstrukturen gegen mechanische Beschädigung und Verschleiß vermutet, die sehr wahrscheinlich zusammen mit den fortschrittlichen Architekturen der Diatomeen in einem evolutionären Wettrüsten entwickelt wurde (Michels u. a., 2012).

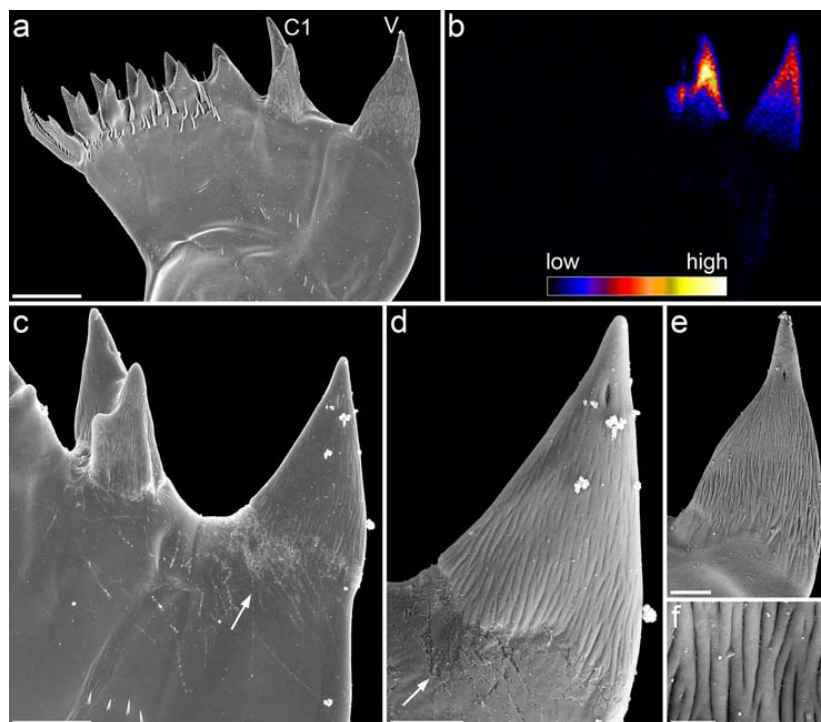


Abb. 1.7: Aufnahmen von Michels u. a. (2012, S. 2): (a, c-f) REM Aufnahmen der Gnathobasen von weiblichen *Centropages hamatus*: (a) Übersicht über die komplette Gnathobase; (c) Überblick über den ventralen Teil der distalen Gnathobase; (d) detaillierte Ansicht des in (c) gezeigten ventralen Zahns; (e) detaillierte Ansicht des in (a) gezeigten ventralen Zahns, (f) filamentöse Mikrostruktur auf der Oberfläche des in (c) und (d) gezeigten ventralen Zahns. (b) μ -PIXE Mapping zeigt die Verteilung und Konzentration von Silizium in einer Gnathobase eines weiblichen *C. hamatus*; die Orientierung der Gnathobase ist ähnlich der Gnathobase in (a). Pfeile zeigen Bereiche mit einer großen Anzahl von Kratzern. Maßstabsbalken = 20 μm (a), 10 μm (c), 5 μm (d, e), 1 μm (f); V = ventraler Zahn, C1 = 1. zentraler Zahn

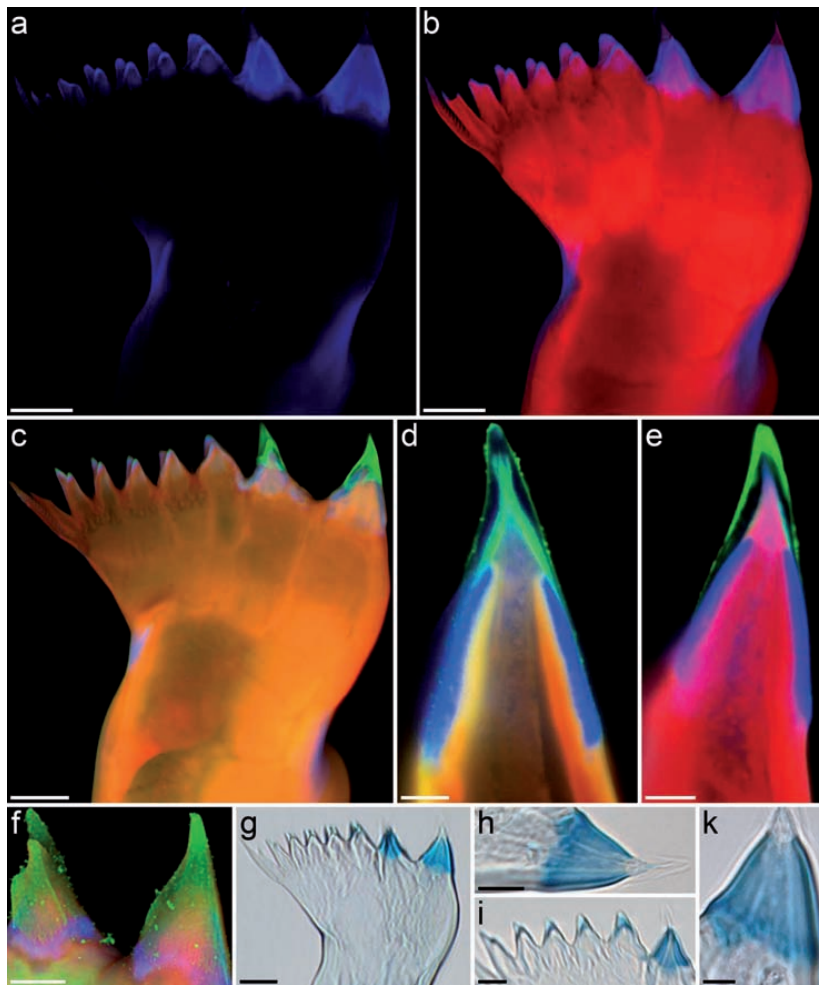


Abb. 1.8: Aufnahmen von Michels u. a. (2012, S. 3): (a-f) Konfokale Laser Scanning Mikroskopie (CLSM) Aufnahmen der Gnathobasen von weiblichen *Centropages hamatus*: ((a-c) Maximale Intensität Projektionen (MIPs) zeigen die komplette Gnathobase; (d, e) 1 µm dicker optischer Schnitt durch den ventralen Zahn; (f) MIP zeigt den ventralen und ersten zentralen Zahn): (a) Resilin-Verteilung; (b) Chitinhaltiges Exoskelett (rot) und Resilin-dominante Strukturen (blau); (c-f) Chitinhaltiges Exoskelett (orange, rot), Resilin-dominante Strukturen (blau, hellblau) und silikathaltige Strukturen (grün). (g-k) Lichtmikroskopische Aufnahmen der Gnathobasen von weiblichen *C. hamatus*; Skalen = 20 µm (a, b, c, g), 10 µm (f, h, i), 5 µm (d, e, k).

Da die Defensivstrukturen einem extrem großen Portfolio an Lastfällen (hauptsächlich durch die Angriffe der Copepoden mit ihren Gnathobasen) ausgesetzt werden können, entwickelten sich im Laufe der Zeit sehr gute „Generalisten“, welche keine großen Schwachstellen hinsichtlich einer beliebigen Belastung aufweisen. Kommt es dennoch zum Versagen der Struktur, so wird die Zelle im Inneren vom Räuber ingestiert. Einige von Räubern zerstörte Schalen sind in Abb. 1.9 mit Hilfe von REM Aufnahmen dargestellt.

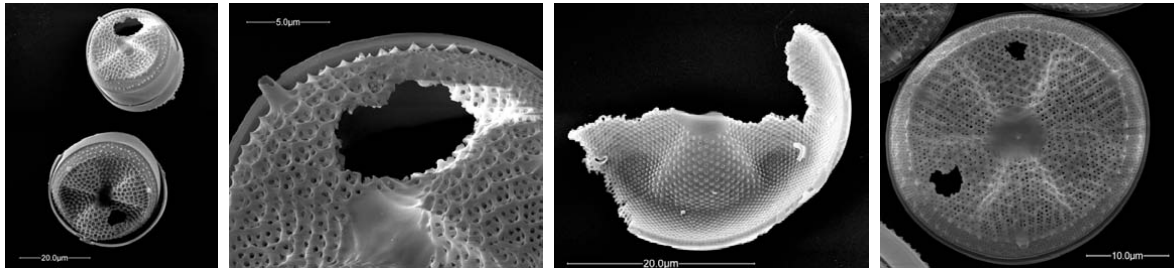


Abb. 1.9: REM Fraßspur von Copepoden (*Acartia spec.*) Weibchen an Diatomeenschalen (*A. senarius*) (Bertram, 2010)

Neben den Diatomeen sind Radiolarien bzw. Strahlentierchen eine weitere Gruppe, welche komplizierte mineralische Skelette produzieren (siehe Abbildung 1.3 dritte und vierte Reihe). Sie sind amöboide Protisten⁷ und kommen ausschließlich in den Ozeanen vor. Wie Diatomeen müssen auch sie sich mechanischen Herausforderungen stellen. Da sie bevorzugt in den nährstoffreichen oberen Schichten der Wassersäule leben, ist Leichtbau für ein geringes Gewicht unumgänglich. Im Gegensatz zu den kastenförmigen Kieselsäurestrukturen der Diatomeen, deren Innenraum weitgehend leer ist, scheinen Radiolarien frei in der Gestaltung ihrer Exoskelette (Schalen) zu sein. Daher existieren innerhalb der Gruppe der Radiolarien sowohl Arten mit hohlen Schalen, als auch welche, die mit komplexen Fachwerken gefüllt sind.

Das methodische Vorgehen für den Übertrag der Konstruktionsweisen von Diatomeen zu technischen Konstruktionen wurde 2003 von Hamm als Patent eingereicht und 2005 veröffentlicht (Hamm, 2003a). Das „Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur“ beschreibt das Vorgehen wie die Schalenarchitekturen von biomineralisierten Einzellern aus der Natur ausgewählt und deren konstruktive Daten abgenommen werden können (vgl. Abb. 1.10). Hamm unterscheidet hierbei zwischen Schalenarchitekturen und Feinstrukturen. Schalenarchitekturen beschreiben die ganzheitliche makroskopische Konstruktionsweise einer Schale (z. B. Rippen, Spanten, gewölbte Flächen, etc.) wohingegen Feinstrukturen als Detaillösungen (z. B. Poren, Sandwichaufbauten, Waben, etc.) im mikroskopischen Bereich zu verstehen sind. Gefundene Lösungen werden anschließend kombiniert, skaliert und optimiert. Damit ist in der Theorie ein systematischer Weg aufgezeigt, der biologische Vorbilder als Vorlage für technische Konzepte nutzbar macht und folglich neuartige Leichtbaukonzepte für technische Fragestellungen schaffen kann.

⁷Vielgestaltige Gruppe von Einzellern, die keine feste Körperform besitzen

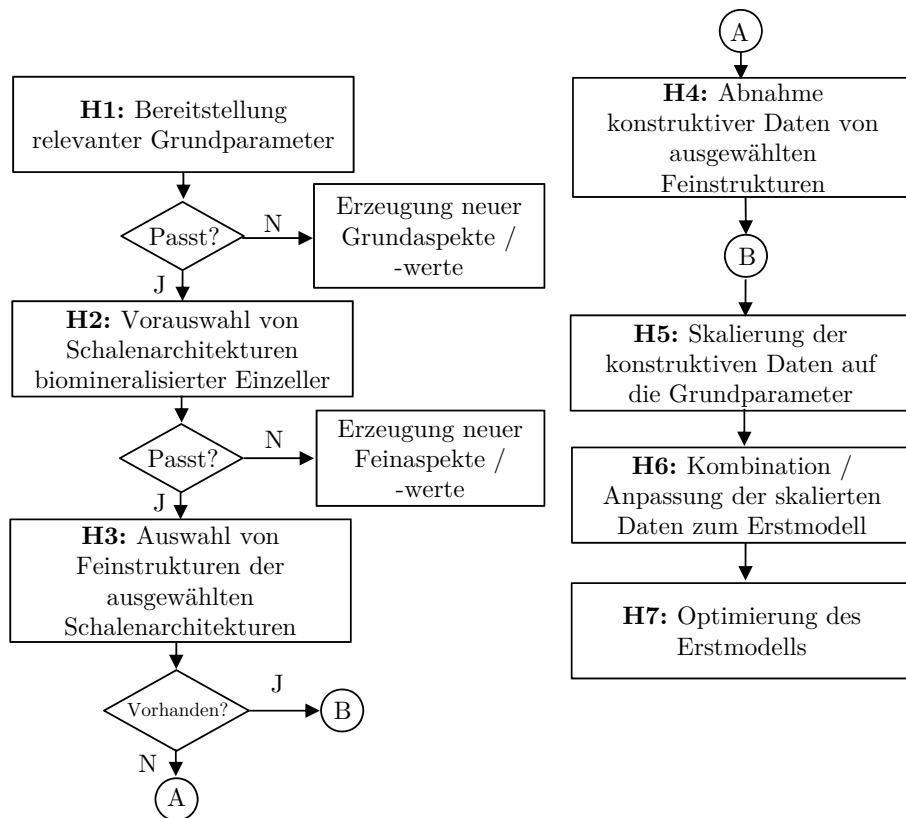


Abb. 1.10: Flussdiagramm des Verfahrens zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur nach Hamm (2003a) in sieben Schritten (H1 bis H7)

1.2 Vorgehensweise und Zielstellung

Das von Hamm aufgezeigte Vorgehen entstammt der biologischen Grundlagenforschung, weshalb der Fokus hierbei mehr auf der Auswahl und Kombination von biologischen Konstruktionsprinzipien liegt und weniger in einer Beschreibung der Umsetzung der Prinzipien zu technischen Leichtbauweisen. Es unterliegt zu weiten Teilen subjektiven Komponenten und eignet sich folglich nur bedingt als systematische Vorgehensweise für Leichtbaukonstruktionen. In Forschungsprojekten benötigt das Verfahren ein vergleichsweise großes Team an Spezialisten, um eingesetzt werden zu können. Die Aufbereitung der biologischen Vorbilder, sowie deren systematische Nutzung für innovative Leichtbauprinzipien, wie sie in der Natur und insbesondere bei den Diatomeen vorhanden sind, sind bisher nicht realisiert. Dem entgegen sind in den Ingenieurwissenschaften Produktentstehungsprozesse (PEP) für Leichtbauprojekte etabliert, welche jedoch bei der Konzeptfindung größtenteils auf Erfahrungswissen von Leichtbauexperten setzen und keine systematische Nutzung biologischer Vorbilder berücksichtigen.

Eine systematische Berücksichtigung von biologischen Konstruktionsprinzipien in einer ingenieurwissenschaftlichen Entwicklungslogik könnte innovative Leichtbauweisen generieren und so leistungsfähige Konstruktionen nach dem Vorbild der Natur erschaffen. Hierfür müsste

das von Hamm dargestellte Verfahren und der PEP eines Leichtbauprojektes miteinander kombiniert werden, die nötigen Anpassungen identifiziert und neue Methoden für die noch offenen Fragestellungen und Schnittpunkte entwickelt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine Vorgehensweise für bionischen Leichtbau zu entwickeln, welche das Leichtbaupotential von Diatomeen unter Berücksichtigung des Verfahrens von Hamm nutzt und mit einer etablierten Entwicklungslogik der Ingenieurwissenschaften umgesetzt werden kann.

Ein Überblick über die Inhalte dieser Arbeit ist in Abb. 1.11 dargestellt. Nach einer grundlegenden Problemherleitung werden diejenigen Schritte einer Entwicklungslogik für leichtbaugerechtes Konstruieren identifiziert, welche für die Umsetzung von bionischen Leichtbauweisen angepasst oder neu gestaltet werden müssen. Es wird zunächst die Umsetzung des Auswahlprozesses geeigneter biologischer Vorbilder betrachtet. Ein Wissensspeicher mit geeigneter Suchfunktion ermöglicht an dieser Stelle die nachhaltige Ablage von mikroskopischen Daten und ein effizientes Auffinden passender Vorbilder. Anschließend wird eine vereinfachte universelle Strukturbewertung untersucht, die es ermöglicht eine objektive Qualifizierung einzelner Strukturen bezüglich eines Lastfalles durchzuführen. Der Transfer von Prinzipien aus der Natur zu technischen Konzepten wird im Anschluss näher beleuchtet. Darauf folgend werden Möglichkeiten zur weiteren Spezialisierung der durch den Transfer gefundenen Bauprinzipien hinsichtlich eines technischen Lastfalls untersucht. Abschließend werden die untersuchten Methoden und Werkzeuge anhand eines aktuellen Anwendungsfalles validiert. Hierzu wird eine Gründungsstruktur für eine Offshore-Windenergieanlage entworfen, optimiert und anschließend mit dem Stand der Technik verglichen. Die anwendungsorientierte Umsetzung lässt schlussendlich eine Validierung der in dieser Arbeit entwickelten systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau zu.

Kapitel 1	Leichtbau	Bionik	Plankton	Einleitung
Kapitel 2	Entwicklungslogik		Anpassung an Bionik	Problemherleitung
Kapitel 3	Möglichkeiten des Konzeptentwurfs einer Leichtbaustruktur			Stand der Technik
Kapitel 4	Strukturleichtbau nach dem Vorbild der Natur			Konzeptbildung
Kapitel 5	Auffinden und Bewerten von geeigneten biologischen Vorbildern		Systematischer Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien	Umsetzung
Kapitel 6				
Kapitel 7	Anwendungsbeispiel			Validierung
Kapitel 8	Diskussion und Beurteilung			Diskussion
Kapitel 9	Zusammenfassung und Ausblick			Zusammenfassung

Abb. 1.11: Struktureller Aufbau der Arbeit

2

Problemstellung

Das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren folgt methodisch einzelnen Arbeitsschritten. Aufbauend auf der Richtlinie VDI 2221 (1993) gliedert die Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 (1997, S. 3) das Vorgehen in sieben einzelne Schritte. Ausgehend von einem Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung („Anforderungsliste“) erfolgt das Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen („Funktionsstrukturen“). Anschließend werden Lösungsprinzipien und deren Strukturen gesucht („Prinzipielle Lösung“). Als weiteren Arbeitsschritt wird das Gliedern in realisierbare Module („Modulare Strukturen“) und deren Gestalten („Vorentwürfe“) beschrieben. Nachdem im nächsten Schritt das gesamte Produkt gestaltet wurde („Gesamtentwurf“) erfolgt im abschließenden Arbeitsschritt die Ausarbeitung der Ausführungs- und Nutzungsangaben („Produktdokumentation“). Die Richtlinie VDI 2223 (2004) vertieft die Arbeitsschritte der modularen Strukturen bis hin zum Gesamtentwurf weiter und zeigt den Entwurfsprozess als methodisch durchzuführenden Arbeitsprozess auf.

2.1 Vorgehen für leichtbaugerechte Konstruktionen

Eine allgemein gültige und methodenbezogene Konstruktionstechnik für Leichtbauweisen wird durch eine Spezialisierung der allgemeinen Konstruktionslehre unter Berücksichtigung der besonderen Gegebenheiten der Leichtbautechnologie erreicht (Feyerabend, 1990; Klein, 2013). Hierbei ist das Gewichtsminimum die stärkste Bedingung. Das Vorgehen für leichtbaugerechtes Konstruieren fasst Klein (2013, S. 10ff) wie folgt zusammen:

1. *Klären der Aufgabenstellung*: Informationsbeschaffung über die Anforderungen einer Aufgabe und Erstellung einer Anforderungsliste; Eingrenzung bestehender Bedingun-

- gen und ihre Bewertung für die Lösungserfüllung; Festlegung einer Lösungsrichtung; technisch-wirtschaftliche Konsequenzen,
2. *Konzipieren* (Findung einer prinzipiellen Lösung): Hinterfragung der Aufgabe und Sichten des Kernproblems; Zerlegung des Kernproblems in untergeordnete Teilprobleme; Suche nach Lösungswegen zur Erfüllung der Teilprobleme; Kombination der Teilproblemlösungen zu Lösungsansätzen für das Kernproblem; Bewertung der Lösungen; Erstellung von Konzeptskizzen,
 3. *Entwerfen* (gestalterische Konkretisierung einer Lösung): maßstäbliche Konkretisierung der Konzeptskizzen zu Bauvarianten; Bewertung, Vereinfachung und Auswahl einer Variante; Überarbeitung zu einem Gesamtentwurf,
 4. *Ausarbeiten* (fertigungs- und montagegerechte Festlegung einer Lösung): endgültige Bestimmung der Geometrie, Dimensionen, Werkstoffe und Herstellung, um die notwendigen Fertigungsunterlagen erstellen zu können,
 5. *Prototypen-Herstellung*: Kontrolle der Funktionen, Montage etc.,
 6. *Testprozeduren*: Überprüfung der Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer.

Wie in Abb. 2.1 visualisiert, lässt sich das Vorgehen in einem Flussdiagramm als Produktentstehungsprozess darstellen. Der initiale Schritt eines Leichtbauprojektes ist hierbei das Klären der Aufgabenstellung. Hierzu gehören u. a. möglichst realistische Lastannahmen, Zulassungsfragen, Bauvorschriften, Leichtbauphilosophien, Werkstoffauswahl, Bauweisen, Lebensdauer, Funktionalität, Sicherheitsfaktoren und Fertigungstechniken. Außerdem sind Kriterien hinsichtlich Kostenvorgaben, vorhandenes Know-how, vorhandene Maschinen, Verfügbarkeit von Rohstoffen, Patentfragen, Termine, Risikobereitschaft, Kundenakzeptanz, Inspizierbarkeit, Reparierbarkeit, Recyclingfähigkeit, Austauschbarkeit und Familienkonzepte zu berücksichtigen. Von diesen Randbedingungen ausgehend, wird in einem zweiten Schritt das Konzept ausgearbeitet. Die Umsetzung des Konzeptes aus Schritt zwei wird anschließend zu Entwürfen ausgearbeitet (Schritt drei). Hierzu gehört die Erarbeitung von Geometrien, Funktionen und Dimensionierung der Bauteile. Die Schritte vier (Ausarbeitung von Fertigungsunterlagen), fünf (Prototypen-Fertigung) und sechs (Erprobung) werden häufig auch virtuell durch Simulationen realisiert, um die Optimierungsschleife zwischen Schritt vier und fünf möglichst kostengünstig und schnell umsetzen zu können.

Der größte Unsicherheitsfaktor, welcher das Leichtbauprojekt wesentlich beeinflusst, ist das Konzipieren. Nach Klein (2013, S.11) wird „(...) ein gutes Ergebnis hier nur auf der Basis eines gesicherten Leichtbauwissens erzielt. Kreativität alleine wird gewöhnlich nicht ausreichen, da der gewählte Werkstoff meist eine bestimmte Bauweise vorschreibt und hierdurch wiederum Leichtbaueffekte zum Tragen kommen. Letztlich verlangt dies eine ideale Kombination von theoretischen Grundlagen und praktischer Erfahrung.“

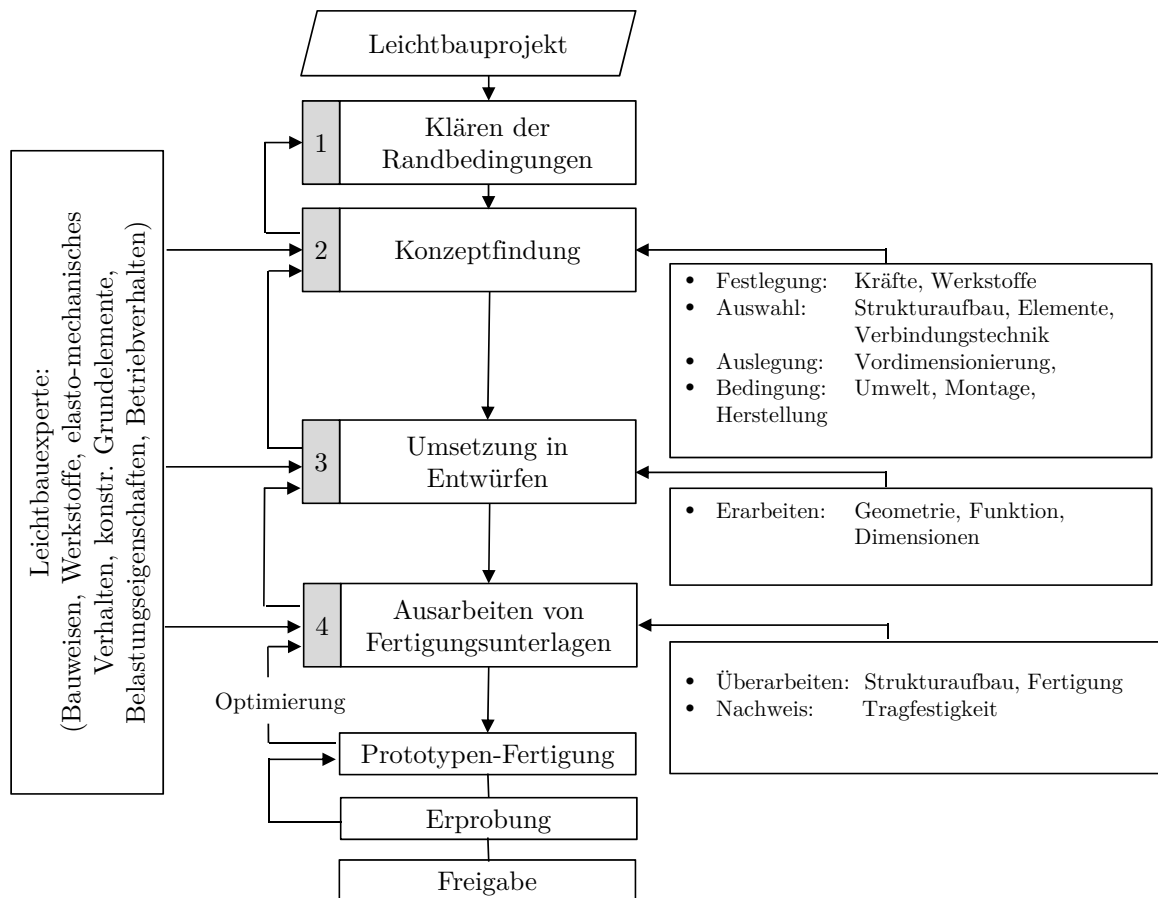


Abb. 2.1: Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach Klein (2013)

Die Entwicklung eines ersten Konzeptes bildet die Basis jeder Konstruktion. Von diesem Entwurf wird das komplette Design maßgeblich beeinflusst und er bestimmt zugleich die Leistungsfähigkeit des final optimierten Bauteiles. Meist wird diesem kreativen Arbeitsschritt mit Erfahrung begegnet. Ein Leichtbauexperte liefert hier den nötigen Prinzipien bzw. Ideen und entwickelt auf Basis seines Vorwissens ein Konzept. Diese Prinzipien finden sich u.a. in der Literatur (z. B. Wiedemann (2007, S. 5ff)) und können mit Erfahrungswissen von Ingenieuren ergänzt und zu Vorentwürfen umgesetzt werden. Da es sich hierbei um prinzipielle Konstruktionsmerkmale handelt, ist eine universelle Anwendbarkeit dieser für verschiedenste Problemstellungen möglich. Die Konstruktionsmerkmale beschreiben z. B. die gewichtsoptimale Auslegung von Zugstäben, Biegebalken, Flächenwerke und Kastenträgern. Neben Erfahrung ist es beim Übertrag der Prinzipien zu einem Vorentwurf hilfreich sich von vorhandenen Konstruktionen inspirieren zu lassen oder sich anderweitige Vorlagen zunutze zu machen.

Nach Klein (2013, S.11) ist ein weiterer kritischer Punkt bei der Konzeptfindung die zu frühe Einschränkung auf nur ein einziges Konzept. Würden mehrere Konzepte in der Konzeptfindungsphase parallel betrachtet werden, so könnten diese im weiteren Verlauf des Leichtbauprojektes miteinander verglichen und bewertet werden. Das potentiell beste Konzept könnte anschließend weiter ausgearbeitet werden, was schlussendlich zu einer besseren

Leichtbaulösung führen würde. Wird bei der Konzeptfindung lediglich auf Erfahrung und Expertenwissen gebaut, so gestaltet sich die Generierung multipler Konzepte als schwierig, da alle Lösungsansätze von der gleichen Ideenbasis stammen. Es wäre folglich zielführend einen Zugriff auf mehrere unterschiedliche Konstruktionsprinzipien zu haben, aus welchem eine Vielzahl an Konzepten abgeleitet werden könnten, welche den Randbedingungen genügen.

2.2 Bionische Konzepte und Entwürfe für leichtbaugerechtes Konstruieren

Wie in Kapitel 1 aufgezeigt, steht in der Natur ein großer Pool an vorhandenen Konstruktionsprinzipien und Bauweisen zur Verfügung. Für eine zielführende Inspiration ist es nötig im Rahmen der Forderung nach gesichertem Leichtbauwissen nur biologische Vorbilder zu wählen, welche in erster Linie dem evolutionären Selektionsdruck Leichtbau unterliegen. Eine korrekte Interpretation und eine geeignete Übertragung dieser Prinzipien könnten dem Leichtbauexperten eine nützliche Inspirationsquelle für innovative Konzepte sein und demnach den für ein Leichtbauprojekt sehr kritischen Arbeitsschritt des Konzipierens maßgeblich unterstützen.

Da die Natur ähnlichen physikalischen Randbedingungen unterliegt wie eine technische Struktur, ist eine Inspiration von den natürlichen Leichtbauprinzipien für die Konzeptfindung möglich und kann innovative Konstruktionen erzielen, welche sich von gängigen Bauwerken abheben. Natürliche Bauweisen müssen ebenfalls Randbedingungen wie z. B. Gravitationskraft, Ressourceneinsparung und mechanischen Belastungen genügen und können in ihrer Umsetzung somit dem Ingenieur als Ideengeber dienen. Natürliche Bauweisen unterliegen jedoch nie nur der Randbedingung des Leichtbaus, sondern müssen immer mehreren Funktionen genügen. Insbesondere höhere Lebewesen sind daher sehr komplexe multifunktionale Konstrukte, von denen nur bedingt reine Konstruktionsmerkmale des Leichtbaus abstrahiert werden können, da die reine Leichtbaufunktion überlagert ist von anderen nötigen Funktionen und folglich nur schwer zu extrahieren ist (Nachtigall, 2008). Der Übertrag von Leichtbauweisen von höheren Lebewesen ist folglich ein Prozess, welcher in speziellen Fällen funktioniert, sich jedoch nicht im Sinne von prinzipiellen Konstruktionsmerkmalen systematisch verallgemeinern lässt. Niedere Lebewesen ermöglichen eine einfachere Trennung der Funktionen, da sie meist weniger multifunktional aufgebaut sind. Insbesondere bei Einzellern, welche eine mechanisch belastete Struktur besitzen, ist folglich ein systematischer Übertrag möglich (Hamm u. Smetacek, 2007).

Das „Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur“ (Hamm, 2003a) beschreibt die Vorgehensweise wie mit einer Vorauswahl von Diatomeen oder Radiolarien Erstmodelle für z. B. eine Leichtbaufelge, einen Leichtbaustoff oder eine permeable Leichtbauschale hergestellt werden können. Umsetzungen dieses Verfahrens existieren derzeit in Form von Forschungsprojekten, bei denen jeweils durch ein innovatives Konstruktionskonzept eine signifikante Gewichtsersparnis erzielt werden konnte, die Umsetzung jedoch wenig systematisch und effizient erfolgte. Die grundsätzliche Fragestellung der Übertragbarkeit von mikroskopisch kleinen Bauweisen, welche aus einem komplexen

Verbundmaterial aus amorphem Silikat gefertigt sind (vgl. Kapitel 1), auf makroskopische technische Bauweisen aus unterschiedlichsten isotropen und anisotropen Materialien (wie beispielsweise Stahl, Kunststoff oder Verbundmaterialien), muss zudem sichergestellt werden.

Das Expertenwissen über die Eigenschaften von Planktonschalen als stabile Leichtbaukonstruktionen erfordert in aktuellen Projekten ein großes Team aus Biologen, Konstrukteuren und Berechnungsingenieuren zur Umsetzung einer technischen Leichtbaulösung (Hamm, 2010; Hamm u. a., 2007; Niebuhr, 2010). Der Umstand, dass sowohl Ingenieurs-, als auch Biologenwissen nötig ist, um das Verfahren hinreichend anwenden zu können, stellt eine hohe Anforderung an das jeweilige Entwicklungsteam. Die taxonomische Einordnung der Exoskelette erfolgt aus biologischer Sicht mit Hilfe von Klassen, Familien, Gattungen und Arten. Hier spielen die äußere Form, genetische Verwandtschaften, Lebensweise und Herkunft ausschlaggebende Rollen. Die biologische Datenbank des AWI dient als anschauliches Beispiel¹. Die für Ingenieure wichtigen Informationen wie mechanische Funktionalität, Leichtbauprinzip, digitale Geometrien, usw. sind Biologen unbekannt und finden folglich keinen Einzug in die biologischen Systeme.

Das von Hamm aufgezeigte Verfahren (siehe auch Abb. 1.10) zielt darauf ab, dass für ein Problem ein biologisches Vorbild gefunden werden kann, welches als Vorlage für die Gesamtgeometrie des technischen Bauteils dienen kann. Insbesondere bei den immer gleich aufgebauten Diatomeen, welche meist zylinderförmige Schachteln sind (vgl. Abb. 1.3) ist dies nicht immer möglich. Oft können nur Teilbereiche bzw. Detaillösungen als Vorlage für die technische Konstruktion verwendet werden, welche im beschriebenen Prozess als sog. „Feinstrukturen“ aufgeführt sind. Für diesen Fall zeigt der Prozess keine Vorgehensweise auf.

Das Auffinden eines passenden Vorbildes als Gesamtgeometrie für ein technisches Problem ist nicht gelöst, stellt jedoch den grundlegenden Arbeitsschritt im beschriebenen Prozess dar. Das Auffinden ist mit Hilfe von gemeinsam beschreibenden Eigenschaften der technischen Struktur und der Schalenarchitekturen vorgesehen. Beispiele hierfür können nach Hamm (2003a) der zur Verfügung stehende Bauraum, statische und dynamische Belastung, Gewichtsrelationen von Bauteilen oder ästhetische Gesichtspunkte sein. Eine systematische Umsetzung ist jedoch aktuell noch nicht realisiert. Hierbei besteht außerdem die grundsätzliche Problematik, dass Diatomeen eine begrenzte Anzahl als Außenformen haben (meist hohle Zylinder) und somit ein Auffinden eines Vorbildes über den Bauraum der technischen Struktur im Allgemeinen nicht zu einer Lösung führen kann, sondern nur in speziellen Einzelfällen. Die Realisierung des Auffindens erfolgt aktuell über eine händische Suche, meist anhand von offensichtlichen geometrischen Ähnlichkeiten. Je nachdem welche Arten der ausführenden Person bekannt sind, bzw. in gutem Bildmaterial vorliegen, erfolgt das Auffinden nicht nach objektiven Maßstäben. Für das Auffinden unter Berücksichtigung von statischer oder dynamischer Belastungen ist keine Umsetzungsmöglichkeit bekannt. Um die Belastungsfähigkeit der Schalenarchitekturen für das Auffinden von biologischen Vorbildern bestimmen zu können, ist eine Berechnung der natürlichen Strukturen mit allen potentiellen technischen Lastfällen inklusive deren

¹<https://web-apps.awi.de/Hustedt-Diatoms/Curator/>, Abruf 21.01.2013

Kombinationen notwendig. Aufgrund des enormen Aufwandes erscheint dieses Vorgehen jedoch nicht sinnvoll. Da meist die Leichtbaufunktion im Fokus steht, spielen ästhetische Gesichtspunkte meist eine untergeordnete Rolle. Folglich erscheint ein Auffinden hierüber nicht zielführend.

Die Skalierung der konstruktiven Daten auf die Grundparameter wird von Hamm als reine Größenskalierung des biologischen Vorbildes zum technischen Bauteil beschrieben. Dies setzt voraus, dass das technische Problem bzw. der technische Lastfall, sowie der Bauraum eine geometrische Ähnlichkeit mit dem natürlichen Vorbild aufweisen. Zusätzlich kommt bei einer größeren technischen Konstruktion ab einem gewissen Maß die Gravitationskraft als nicht zu vernachlässigender gerichteter Belastungszustand hinzu. Bei den biologischen Vorbildern hingegen sind bezüglich der Gravitationskraft keine speziellen konstruktiven Merkmale zu erwarten, da die Schalen aufgrund der freien Lage im Wasser hinsichtlich der Gravitation ungerichtet versteift sein müssen. Ebenfalls kann eine Geometrie nur bei rein elasto-statischer Belastung einfach skaliert werden, da die qualitative Spannungsverteilung in einem Bauteil hier nur geometrisch bedingt ist. Treten z. B. dynamische Lasten auf, ist eine einfache Skalierung nicht ohne weiteres möglich. Nach der Größenskalierung beschreibt Hamm den notwendigen Schritt der Abstrahierung der Konstruktionen nicht näher. Niebuhr (2010) führt einen manuellen Abstrahierungsschritt durch, indem die natürlichen Strukturen statisch belastet werden und unbelastete Bereiche entfernt werden. Ebenso wird versucht durch Erfahrung anhand der Ergebnisse der Belastungsrechnungen Prinzipien von der natürlichen Struktur abzuleiten, um so die Übertragung zu verbessern. Dieses Vorgehen erscheint zweckorientiert, ist jedoch aufgrund der stark subjektiven Komponente des manuellen Übertragens nicht reproduzierbar und liefert keine systematischen Ergebnisse.

Ein weiteres Problem bei der Übertragung von konstruktiven Merkmalen aus der Natur ist hinsichtlich der Materialien zu erkennen. Wie in Kapitel 1 gezeigt, besitzen die Diatomeen eine Art Verbundwerkstoff, welcher aus amorphem Silikat und organischen Gerüststrukturen besteht. Die Übertragbarkeit dieser Geometrien und Konstruktionsprinzipien auf technische Bauteile aus anderen Materialien wie z. B. Aluminium ist fraglich. Die Forderung nach einem gesicherten Leichtbauwissen, welche nach Klein nötig ist, erfordert folglich genaue Kenntnisse über die Materialzusammensetzung der Diatomeen oder über die Möglichkeiten der Abstrahierung und Übertragbarkeit der Bauweisen zu Konstruktionen aus anderen Werkstoffen und Hybridmaterialkonzepten.

2.3 Zusammenfassung der Probleme und abgeleitete Forderungen

Zusammenfassend lässt sich folglich festhalten, dass der in den Ingenieurwissenschaften etablierte Prozess des leichtbaugerechten Konstruierens einen potentiell kritischen Arbeitsschritt enthält (die Konzeptfindung), welcher in der Technik derzeit meist nur durch Erfahrung und mit Hilfe bestehender Konstruktionen gelöst wird. Hieraus entstehen potentiell kritische Punkte bei der Konzeptfindung, da weder mehrere Konzepte generiert werden können,

noch diese sich von bestehenden Konstruktionen abheben, um evtl. neue, bessere Leichtbaulösungen zu erzeugen. Dem entgegen existiert in der Biologie ein gesichertes Wissen über die Leichtbaupotentiale mariner Planktonschalen. Ergebnisse aus der Grundlagenforschung sowie Veröffentlichungen im Themenumfeld der Evolution sowie der Bionik versprechen eine mannigfaltige Inspirationsquelle für Leichtbaukonstruktionen. Das Wissen um das Leichtbaupotential mariner Planktonorganismen wird bereits in ersten Forschungsprojekten auf technische Fragestellungen bezüglich Leichtbau übertragen, ist jedoch noch nicht in einer systematischen Vorgehensweise für die Ingenieurwissenschaften etabliert.

Eine Erweiterung des in den Ingenieurwissenschaften etablierten Vorgehens für leichtbaugerechtes Konstruieren um das Wissen des Leichtbaupotentials von marinem Planktonorganismen könnte zu einer Vielzahl an innovativen Leichtbaulösungen führen, welche in der Technik angewandt werden könnten. Hierfür müsste der Prozess eines Leichtbauprojektes an mehreren Stellen ergänzt bzw. verändert werden, um die nötigen Schnittstellen für den Eintrag des Wissens der Natur zu ermöglichen. Ebenfalls müsste das Vorgehen nach Hamm an den etablierten Prozess in den Ingenieurwissenschaften angepasst werden, um eine zielführende Verbindung beider Vorgehensweisen gewährleisten zu können.

Im Detail bedeutet dies, dass der Prozess nach Klein (2013) an den für die Konzeptfindung relevanten Arbeitsschritten an den Eintrag des Wissens um die biologischen Leichtbauvorbilder angepasst werden muss. Wie in Abb. 2.2 verdeutlicht, wäre nach Arbeitsschritt eins (Klärung der Randbedingungen) die Identifizierung von geeigneten biologischen Vorbildern notwendig. Bauweisen, konstruktive Grundelemente und Belastungseigenschaften der biologischen Vorbilder müssten hierbei den Randbedingungen genügen, um in Arbeitsschritt zwei (Konzeptfindung) zu innovativen Konzepten mit Leichtbaupotential zu führen. Das Auffinden von geeigneten biologischen Vorbildern sowie die Bewertung deren Leichtbaupotentials stellen folglich den ersten problematischen Schritt einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau dar.

Neben dem Auffinden eines geeigneten biologischen Vorbildes stellt die Umsetzung zu Entwürfen (entsprechend Arbeitsschritt drei) ein Problem dar. Wie eingangs aufgezeigt bilden die biologischen Vorbilder meist generalistische, robuste Konstruktionen, da die Lastfälle in der Natur (z. B. Copepodenangriffe) in ihrer Richtung und Stärke nicht vorhergesehen werden können. Die in einem Leichtbauprojekt definierten Randbedingungen sind dem entgegen sehr genau bekannt und erfordern hierauf spezialisierte Bauweisen, um einen optimalen Leichtbau sicherstellen zu können. Eine geeignete Anpassung der bionischen Konzepte an die im Leichtbauprojekt definierten Randbedingungen stellt somit den zweiten problematischen Schritt einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau dar.

Nach erfolgter Anpassung stellen die Konzepte lediglich die konstruktiven Merkmale des bionischen Lösungsprinzips dar. Sie sind jedoch noch nicht ausreichend an die technischen Randbedingungen angepasst. Eine Spezialisierung bzw. Dimensionierung der bionischen Konzepte ist anschließend notwendig, um die Randbedingungen des Leichtbauprojektes wie beispielsweise Fertigungsrestriktionen berücksichtigen zu können. Dieser Schritt muss ebenfalls die

sinnvolle Spezialisierung der biologischen Geometrie entsprechend des technischen Werkstoffs leisten. Diese Spezialisierung stellt den dritten problematischen Schritt einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau dar.

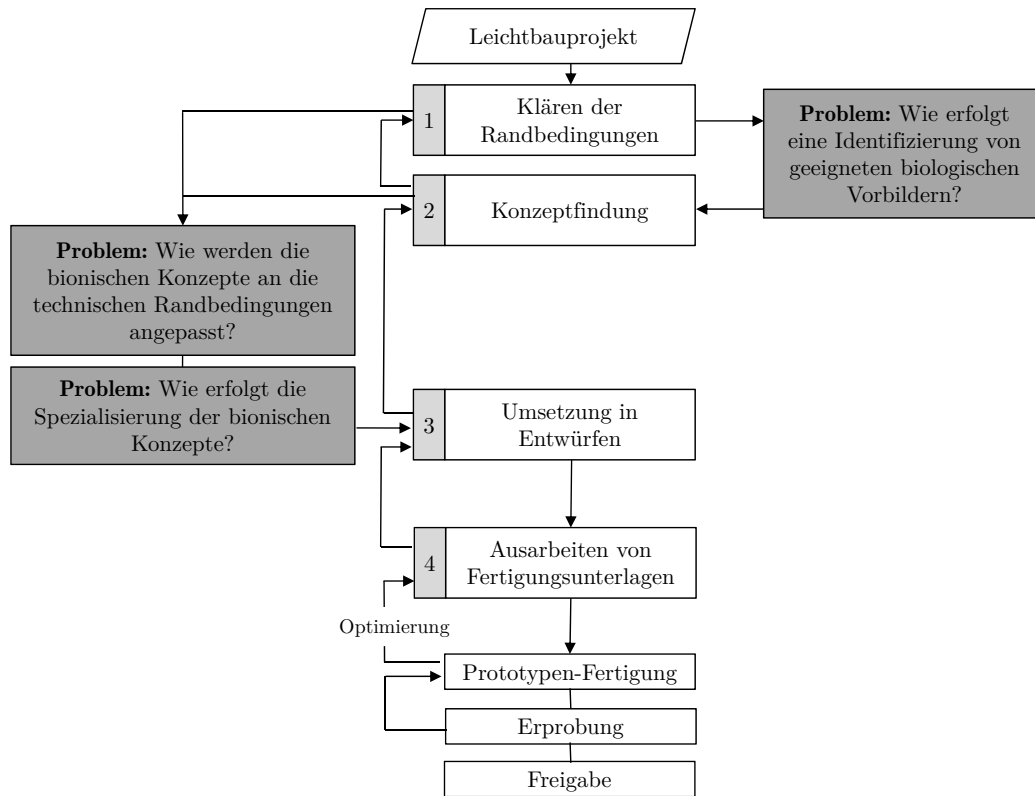


Abb. 2.2: Notwendige Anpassungen und Ergänzungen der systematischen Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach Klein (2013) für eine Berücksichtigung der Konstruktionsweisen biologischer Vorbilder. Die Expertise des Leichtbauexperten hinsichtlich Bauweisen, Werkstoffen, elasto-mechanisches Verhalten, etc. wird unverändert in den Arbeitsschritten 2 bis 4 benötigt (vgl. Abb. 2.1).

Die problematischen Schritte für eine Anpassung der systematischen Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach Klein (2013) für eine Berücksichtigung der Konstruktionsweisen biologischer Vorbilder können folglich mit

1. dem Auffinden von geeigneten biologischen Vorbildern,
2. der Anpassung biologischen Vorbilder an die technischen Randbedingungen und
3. der Spezialisierung der Konzepte

zusammengefasst werden. Lösungsansätze sollten dem Leichtbauexperten einen möglichst effizienten Wissenszugang zur Biologie ermöglichen und ihm auf Basis des in Arbeitsschritt eins (Klärung der Randbedingungen) zusammengefassten Wissens ein Auffinden von geeigneten biologischen Vorbildern ermöglichen. Die technischen Randbedingungen sollten hierbei möglichst ausreichen, um eine Auswahl an Vorbildern zu identifizieren. Des Weiteren sollte das elasto-mechanische Verhalten, die Belastungseigenschaften und das Betriebsverhalten der biologischen Vorbilder möglichst früh abgeschätzt werden können, um sinnvolle Konzepte

erzielen zu können. Hierfür ist es notwendig eine sehr allgemeine, erste Leistungsfähigkeit der biologischen Bauweisen aufzuzeigen, ohne dass zuvor eine zeitaufwendige Analyse der Vorbilder durchlaufen werden muss. Eine Anpassung des biologischen Vorbildes sollte die konstruktiven Grundelemente des biologischen Vorbildes nicht verändern. Es ist folglich notwendig das Grundkonzept bzw. die Konstruktionsweise der Natur zu erkennen, zu verstehen und anschließend, falls möglich ausschließlich auf Basis der in Arbeitsschritt 1 geklärten Randbedingungen, eine Abstrahierung und Spezialisierung durchzuführen.

3

Stand der Technik

Nachdem in Abschnitt 2.3 die drei grundlegenden Problematiken bei der Integration eines bionischen Leichtbauansatzes in die Entwicklungslogik der Ingenieurwissenschaften zusammengefasst wurden, wird in diesem Kapitel der Stand der Technik im Kontext dieser Arbeit diskutiert. Einleitend wird in Abschnitt 3.1 der Stand der Technik beim Konzeptentwurf einer Leichtbaustruktur betrachtet. Die Vorgehensweise und die zu beachtenden Randbedingungen können für das spätere Auffinden geeigneter biologischer Vorbilder wichtige Hinweise liefern.

Entsprechend der ersten Problemstellung wird die allgemeine Vorgehensweise des Auffindens und der Übertragung von Bauweisen aus der Natur zur Technik insbesondere mit Hinblick auf Leichtbau in Abschnitt 3.2 aufgezeigt. In Abschnitt 3.2.1 wird auf die in dieser Arbeit verwendeten Planktonorganismen als biologische Vorbilder fokussiert. Die zweite grundlegende Problematik der Anpassung von Bauweisen an technische Randbedingungen wird in Abschnitt 3.3 betrachtet. Topologieoptimierungsmethoden werden in diesem Zusammenhang im Detail betrachtet. Die geforderte Spezialisierung von Bauweisen wird entsprechend der dritten Problemstellung in Abschnitt 3.4 erläutert. Eine Diskussion und Fazit des Standes der Technik finden sich in Abschnitt 3.5.

3.1 Konzeptfindung einer Leichtbaustruktur

Während der Konzeptfindung einer Leichtbaustruktur lassen sich drei unterschiedliche Gebiete der Optimierung unterscheiden: Die Optimierung des Materials (Werkstoffleichtbau), die Integration mehrerer Funktionen in derselben Struktur (Funktionsleichtbau) und die Optimierung der Geometrie (Strukturleichtbau).

Beim Werkstoffleichtbau wird versucht den jeweils für die jeweilige Anwendung am leichtesten bauenden Werkstoff zu verwenden. Hierbei stehen neben hochlegierten Stählen, Leichtmetallen, Titan, Faserverbundwerkstoffen (Glasfaser (GFK), Kohlefaser (CFK)) u. a. auch Faserkeramiken oder auch Titanaluminide zur Verfügung. Forschungen im Bereich Nanomaterialien (z. B. Carbon Nanotubes (Iijima, 1991; O'Connell, 2006)) ergänzen diese Palette. Nach Drechsler (2006) sind für den Werkstoffleichtbau aktuell aufgrund ihrer Anisotropie besonders die Faserverbundwerkstoffe prädestiniert. Hierbei kann durch die richtige Wahl der Faserorientierung der Werkstoff sehr gut an die jeweilige Belastung angepasst werden, was einer optimalen Werkstoffausnutzung gleich kommt.

Beim Funktionsleichtbau kann zwischen dem passiven und dem aktiven Funktionsleichtbau unterschieden werden. Beim passiven Funktionsleichtbau werden Strukturelementen zusätzlich zu ihrer Tragefunktion weitere Funktionalitäten zugewiesen. Ein Beispiel aus dem Bereich des Flugzeugbaues ist der Integraltank. Die Struktur des Flügels dient hierbei gleichzeitig als Kraftstoffbehälter, was zusätzliche Forderungen nach Dichtigkeit und Kraftstoffverträglichkeit mit sich bringt. Aeroelastisches Tailoring (Anisotropischer Lagenaufbau bei der Verwendung von Faserverbundbauweisen) kann nach Drechsler (2006) zum passiven Abfedern von Böen bei Tragflügeln etc. verwendet werden und zählt folglich auch zum passiven Funktionsleichtbau. Aktiver Funktionsleichtbau wird im Gegensatz dazu beispielsweise durch die Integration von Piezofasern zur Schwingungsdämpfung oder adaptiven Formänderung erreicht.

Aufgabe des Strukturleichtbaus ist die optimale Formgebung einer Struktur bei gegebener Belastung. Hierbei sind Bauraumbeschränkungen, Fertigbarkeit und zusätzlich geforderte Funktionalitäten die beschränkenden Faktoren. Beim systematischen Strukturleichtbau muss im Gegensatz zu einer produktbezogenen Vorgehensweise eine methodenbezogene Technik zum Einsatz kommen, um möglichst viele Problemstellungen erfolgreich bearbeiten zu können (VDI 2221, 1993). Die Erstellung eines Erstmodells¹ für eine Leichtbaukonstruktion erfolgt größtenteils durch Erfahrung oder auf Basis vorheriger Entwürfe. Nach Jordan (1986) ist der Entwurf einer Leichtbaukonstruktion ein mehrstufiger Prozess, bei dem verschiedene Schleifen innerhalb der Konzipierung und Realisierung zu durchlaufen sind. Um den Aufwand an Mitteln und Zeit zu begrenzen, sollte vorhandenes Erfahrungswissen möglichst frühzeitig in die Entwürfe einfließen. Betrachtet man den Entwurf der Geometrie einer Leichtbauweise näher im Detail, so ist es nach Wiedemann (1984) nötig, möglichst belastungsoptimale Strukturmerkmale zu verwenden, um eine Konstruktion effizient und leicht auszuführen. So gilt es Bauteile möglichst auf Zug zu beanspruchen, da derartige Strukturen keine Biegesteifigkeit benötigen und keine Instabilitäten auftreten. Bei Druckbeanspruchung sollen geeignete Maßnahmen gegen Instabilitäten vorgesehen werden, wie z. B. Profilierung oder Segmentierung. Das Vermeiden von Biege- oder Torsionsbeanspruchung in massiven Querschnitten ist ebenso wichtig, da derartige Querschnitte nicht richtig ausgenutzt werden. Klein (2013, S. 67ff) führt bekannte Konstruktionsweisen an, welche als Gestaltungsprinzipien im Leichtbau angesehen werden können. Diese sieben Regeln sind:

¹Der erste Konzeptentwurf, welches beispielsweise in Form von Skizzen ausgeführt werden kann

1. Möglichst direkte Krafteinleitung und Kraftausgleich
2. Realisierung eines möglichst großen Flächenträgheits- bzw. Widerstandsmomentes
3. Feingliederung von Strukturen
4. Nutzung der natürlichen Stützwirkung durch Krümmung
5. Gezielte Versteifung von Konstruktionen in den Hauptbelastungsrichtungen
6. Bevorzugen des integrativen Prinzips
7. Absolute Ausschöpfung einer Konstruktion

Im Hinblick auf diese Arbeit bedeutet dies, dass die konstruktiven Prinzipien, welche für die bionischen Bauweisen verwendet werden sollen, den aufgeführten Regeln genügen müssen. Ebenfalls ist hierdurch eine Validierung der Konstruktionsprinzipien möglich, was der Forderung nach einem gesicherten Leichtbauwissen entgegen kommt.

Neben den konstruktiven Merkmalen, die in einem manuellen Konstruktionsprozess verwendet werden, liegt es im allgemeinen Entwicklungstrend automatisierte Entwurfsmöglichkeiten, die mit Hilfe von computergestützten Algorithmen Erstmodelle für Konstruktionen entwerfen können, zu nutzen (Grabowski u. Rude, 1990). Je nach Anwendungsgebiet existiert aktuell eine Vielzahl von Möglichkeiten einen funktionalen Vorentwurf zu generieren. Beispielhaft für die Architektur beschreibt Melaragno (1998) den Vorentwurf und die Auslegung von modernen Brücken. Wallace u. Jakiela (1993) beschreiben ein automatisiertes Produktdesign mit Hilfe eines computergestützten Tools unter Berücksichtigung von ästhetischen Merkmalen sowie auch produktionstechnischen Anforderungen. Roskam (2005) fasst die nötigen Schritte für eine Auslegung und den Vorentwurf eines Flugzeuges zusammen. Payne (2008) untersucht die Vorzüge eines Knowledge-Based Engineering Tools beim Entwurf einer Yachtstruktur aus Faserverbundkunststoffen. Hierbei kommen u. a. computergestützte Berechnungsmethoden zur Strukturauswertung zum Tragen (Payne u. Kelly, 2006). Bei diesen Möglichkeiten stellt der Leichtbau jedoch häufig nicht das primäre Entwurfsziel dar. Hauck (2006) untersucht die rechnergestützte Prinzipiellösungsmodellierung explizit für flächige Leichtbaukomponenten mittels Integration von Datenmanagementsystemen und wissensbasierter Synthese. Im Bereich des anwendungsunabhängigen konstruktiven Leichtbaus legt Zimmer (2000) beispielhaft das Vorgehen zur Konstruktion von mechanischen Teilen mit rechnerunterstützten Methoden dar. Die Verfahrensschritte umfassen hierbei eine gegenständliche Modellkonstruktion (Designraum), Beschreibung des Modells mit finiten Elementen und Erstellung eines Datenmodells.

Im speziellen Bereich des Leichtbaus mit Membranen bzw. flächigen Bauwerken finden sich eine Vielzahl mathematischer Formfindungstools, welche belastungsgerechte Tragwerke automatisiert entwerfen können (Bletzinger u. a., 2005; Linkwitz, 1999; Moncrieff, 2005; Wüchner u. Bletzinger, 2005). Insbesondere die Methode der Minimalflächen ist hierbei eine mathematische Grundlage, welche zu leichten, zeltförmigen Konstruktionen führt. Frei Otto experimentierte bereits 1957 mit Drahtmodellen, welche er in Seifenlauge tauchte, um so die Flächen zu ermitteln, welche den geringst möglichen Flächeninhalt aufweisen.

Gründig (1988) zeigte erste computergestützte Ansätze zur Nutzung von Minimalflächen als Konstruktionswerkzeug für leichte Flächentragwerke.

Wie in Abschnitt 2.3 erkannt, ist es notwendig das Leichtbauwissen in einer aufbereiteten Form bereitzustellen. Wissensspeicher für Leichtbau finden sich im Stand der Technik nur vereinzelt und für jeweils eine sehr spezielle Anforderung. Im Rahmen der Lehrtätigkeit des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren an der Universität Stuttgart wurde eine Architektur Leichtbau-Datenbank „Lightstructures.de“ entwickelt, deren Aufgabe es ist im Rahmen von studentischen Projekten den Einsatz von zukunftsorientierten Technologien zu erproben. Neben den Grundlagen des Leichtbaus finden sich hier Leichtbauprinzipien in der Architektur, Bauweisen und Literaturquellen. Ähnliche Datenbanken, welche insbesondere für Architekten Vorbilder für leichte Bauwerke beinhalten sind z. B. die lizenzpflichtigen Fachdatenbanken RSWB² oder Compendex³, daneben Projektdatenbanken wie Structurae⁴ oder die Knowledgebase von TensiNet⁵.

3.2 Auffinden biologischer Vorbilder für technische Lösungen

Die Verwendung von Vorbildern aus der Natur für die Lösung technischer Problemstellungen ist seit Langem bekannt. Die Natur hat im Laufe der Evolution durch natürliche Auslese extrem energiesparende Konstruktionen und Verfahren als Antwort auf die Frage nach der besten Strategie im dauernden Überlebenskampf der Arten hervorgebracht, die für viele technische Anwendungen geeignet erscheinen (Hamm, 2003a). Nachtigall (1997, S. 21ff) beschreibt die Grundprinzipien natürlicher Konstruktionen: „Die Natur konstruiert nicht additive, auf einzelne Haupteigenschaften maximierte Komponenten, sondern entwickelt integrierte, (...) optimierte Systeme.“ Für die technische Umsetzung solcher Analogien beschreibt Nachtigall die notwendige Modellbildung in dem Schritt „Prinzip - Nullmodell - Endausführung“ jedoch nicht näher (Nachtigall, 1997, S. 127-130).

Mittlerweile ist die Bionik eine etablierte Wissenschaftsdisziplin, die insbesondere in Deutschland in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an innovativen Prozessen und Verfahren zur Produktoptimierung hervorgebracht hat. Innovationen, die durch die Bionik entstehen, zeichnen sich durch eine große Innovationshöhe und Beiträge zur Nachhaltigkeit im Produktionsprozess und in der Anwendung aus. Ihnen ist in aller Regel ein interdisziplinärer Prozess der Zusammenarbeit von Akteuren verschiedener Wissenschaftsdisziplinen und Industriebereiche vorangegangen.

Beim Übertragen von Prinzipien aus der Natur zu technischen Lösungen gibt es zwei verschiedene systematische Ansätze (Knippers u. Speck, 2012; Speck u. Harder, 2006; Speck u. a., 2006): (1) Beim „Bottom-Up Ansatz“ wird durch Grundlagenforschung in der Biologie

²<http://www.irb.fraunhofer.de/rswb/login/RSWB/rswb-start-info.jsp>, Abruf 14.07.2013

³http://www.ei.org/sites/default/files/userfiles/ProductSheets/Compendex_EiBackfile_fact_sheet.pdf, Abruf 24.07.2013

⁴<http://de.structurae.de>, Abruf 24.07.2013

⁵<http://www.tensinet.com/database/projects/1.html>, Abruf 24.07.2013

ein Prozess, eine Struktur oder eine Funktionsweise entdeckt und analysiert. Anschließend versuchen Biologen und Ingenieure gemeinsam die Prinzipien in die Technik zu übertragen. Beispielhaft hierfür ist die Entwicklung des Lotuseffekt[®] (Barthlott, 1990), welcher selbstreinigende Oberflächen durch eine mikro-nanostrukturierte Oberfläche ermöglicht. (2) Beim „Top-Down Ansatz“ wird in der Technik ein Problem identifiziert und Ingenieure suchen mit der Hilfe von Biologen nach einer Lösung. Hierbei ist es nach Milwich u. a. (2006) sinnvoll, dass Biologen Wissen im Bereich Engineering besitzen und dass Ingenieure offen sind für unkonventionelle Lösungen. Nachdem eine vielversprechende Lösung identifiziert und ausreichend analysiert wurde, wird die Lösung abstrahiert und das Funktionsprinzip in die Technik übertragen. Anschließend erfolgt eine fertigungs- und materialgerechte Ausarbeitung. Ein Beispiel hierfür geben Lienhard u. a. (2011) mit einem gelenklosen Klappmechanismus, der u. a. für Verschattungssysteme verwendet wird.

Im Bereich Strukturleichtbau zeigen Milwich u. a. (2006) die Leichtbaukonstruktion eines Rohres mit Gradientenaufbau nach dem Vorbild von Pflanzen, welches mit Hilfe von technischen Textilien gefertigt wird. Untersuchungen an Bambusstielen und die Übertragung deren Konstruktionsprinzipien in die Technik ermöglichen eine um ca. 120% erhöhte Tragfähigkeit und verbesserte Knickstabilität (Ma u. a., 2008). Jiao u. a. (2010) untersuchen die bionische Optimierung eines Masts und erreichen eine Steifigkeitserhöhung von ca. 50% durch die Übertragung von Prinzipien aus Pflanzenhalmen. Zhao u. a. (2010) beschreiben die Auswahl und Adaption geeigneter biologischer Vorbilder für die Leichtbauauslegung einer Platte. Durch die Übertragung von natürlichen Blattstrukturen auf eine Arbeitsplatte wird eine Steifigkeitserhöhung um ca. 30% erzielt (Xing u. a., 2012).

Das Auffinden geeigneter Vorbilder für ein Leichtbauproblem wird im Stand der Technik nicht systematisch gelöst. Es hat sich der Begriff „Screening“ etabliert, welcher eine manuelle und meist intensive Vorbildrecherche einschließt. Hierbei werden u. a. Veröffentlichungen zu entsprechenden Forschungsergebnissen, biologische Datenbanken, Literaturwerke und Internetrecherchen genutzt.

Die VDI Richtlinie zur Bionik beschreibt diesen Screeningprozess als Ideenfindung und weist ihn als den „zentralen Schritt auf dem Weg zu einer Invention“ aus. Die „Ideenfindung wird beeinflusst von (Vor-) Wissen, flexibler Wissensverarbeitung und Motivation“ (VDI 6220 Blatt 1, 2012, S. 24). Im weiteren Verlauf der Richtlinie wird ebenfalls beschrieben, dass „die Qualität einer Idee in Bezug auf Originalität, Zweckmäßigkeit und Umsetzbarkeit schwer zu bestimmen ist“ (VDI 6220 Blatt 1, 2012, S. 25). Charakteristisch für dieses unsystematische Vorgehen ist, dass es besonders zeitintensiv und willkürlich durchgeführt wird und spezielles Expertenwissen erforderlich ist, welches meist nur begrenzt zugänglich ist und folglich die allgemeine Umsetzung bionischer Methoden erschwert. Der im Stand der Technik verwendete Screeningprozess kann in dieser Form folglich nicht für eine allgemeine Konzeptionierung für Leichtbauweisen im Sinne der identifizierten Problemstellung dieser Arbeit genutzt werden.

3.2.1 Planktonorganismen als Vorbilder für Strukturleichtbau

In einer mehr als 20-jährigen Kooperation analysierte das Stuttgarter Institut für leichte Flächentragwerke mit dem Berliner Biologen und Anthropologen Johann-Gerhard Helmcke die Konstruktionen der Kieselalgen und Strahlentierchen. Helmcke hatte die Hypothese aufgestellt, dass die Formen vieler Objekte der Natur nicht allein durch die Erbsubstanz bestimmt werden. Er vermutete, dass neben chemischen auch sehr wirkungsvolle physikalische Prozesse ablaufen, die Objekte wie die Diatomeenschalen entstehen lassen (Helmcke u. Krieger, 1964).

Grundlegende Untersuchungen zu fraktalen Schalenversteifungen von Planktonschalen mit Hilfe von FE-Analysen wurden bereits im Jahre 2007 im Projekt „Ammolight“⁶ durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass fraktale Schalenversteifungen die Außenhaut und Stützstrukturen zu einer mechanischen Einheit integrieren und somit eine sehr gute, homogene Spannungsverteilung gewährleisten. Da dieses Prinzip bei natürlichen Schalen in vielen unterschiedlichen Varianten verwirklicht ist, konnten auch produktionstechnisch realisierbare Lösungen für verschiedene technische Strukturen entwickelt werden (Hamm u. a., 2007). Hamm beschäftigt sich mit dem speziellen und vielfältigen konstruktiven Aufbau von Diatomeen (Hamm u. a., 2003). Insbesondere im Hinblick auf mechanisch beanspruchte Leichtbaustrukturen für technische Konstruktionen können die Schalen biomineralisierter Einzeller eine entscheidende Vorbildrolle spielen (Hamm, 2003a, 2005b). Als weitere Veröffentlichungen, die sich mit den Konstruktionsprinzipien von Kieselalgen beschäftigen, sind die Publikation „Wunderschöne Kieselalgen: Muster für stabile Konstruktionen“ (Hamm, 2003b) mit einigen technischen Daten zu Diatomeen und die Internet-Veröffentlichung „Jugendstil im Meer“ (Dillinger, 2003) mit Fotos zu der Standardtestmethode mit Glasnadeln zur mechanischen Festigkeit von biomineralisierten Einzellern zu nennen.

Aktuelle Crashtests mit Diatomeen lassen erkennen, dass die Tragfähigkeit der Planktonschalen für ihre filigrane Bauweise sehr gut ist (Flächendruck von über 800 t/m² möglich, vgl. (Hörnig, 2010)). Im virtuellen Helmholtz Institut „PlanktonTech“ untersuchen Wissenschaftler derzeit die Schalen von Kieselalgen und Radiolarien. Mittels moderner mikroskopischer Verfahren werden die Schalen analysiert, in 3D-Daten übertragen und mit verschiedenen Berechnungs- und Optimierungsverfahren bearbeitet (Friedrichs u. a., 2012).

Untersuchungen zur Materialzusammensetzung von Diatomeen finden sich im Stand der Forschung nur unzureichend. Sumper u. Kröger (2004) zeigen grundlegende Arbeiten zur Materialzusammensetzung, welche auf eine Verbundbauweise schließen lassen. Brunner u. a. (2009, S. 9906) nennen die Bauweise eine „auf Chitin basierendes Netzwerk, welches der Form und Größe der Zellwand gleicht und aus miteinander vernetzten Fasern mit einem durchschnittlichen Durchmesser von etwa 25 nm besteht. Diese Fasern enthalten außer Chitin noch andere, bisher unbekannte Biomoleküle.“ Die genaue Funktion dieser Fasern ist jedoch unbekannt. Kenntnisse hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, Faserorientierungen und

⁶Ammoniten basierte fraktale Schalenversteifungen zur mechanischen Verstärkung von technischen Außenhäuten an Leichtbaukonstruktionen, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen 0313770

Zusammensetzungen sind im Stand der Forschung nicht bekannt. Im Rahmen der in Kapitel 2 aufgeführten Fragwürdigkeit der Übertragbarkeit von Bauweisen aus einem bisher weitgehend unbekanntem Material zu technischen Bauweisen aus beispielsweise Metall, kann der Stand der Forschung hier keine zufriedenstellende Antwort geben.

3.3 Anpassung von Bauweisen an technische Randbedingungen

Eine Möglichkeit der optimalen Formfindung unter Berücksichtigung von mechanischen Randbedingungen stellt die sog. Topologieoptimierung dar, welche sich mit der optimalen Materialverteilung innerhalb eines Bauraumes befasst. Diese Methoden stellen im Stand der Technik vorbildliche Möglichkeiten dar, durch Anpassung eines Bauraumes und unter Berücksichtigung technischer Randbedingungen Leichtbauweisen zu generieren, ohne auf Expertenwissen oder sonstige Vorlagen zurückgreifen zu müssen. Diese Konzepte stellen somit rein mathematisch generierte Entwürfe dar, welche ausschließlich auf mechanischen Randbedingungen basieren. Erste Ansätze der Topologieoptimierung wurden bereits 1904 von Michell (1904) publiziert. Dessen Entwurfstheorie erzeugt eine mechanische Stabstruktur, die sich dadurch auszeichnet, dass sich alle Stäbe unter einem Winkel von 90° schneiden. Dadurch wird eine optimale Differenzierung zwischen reinen Zug- und Druckstäben erreicht (siehe Abb. 3.1).

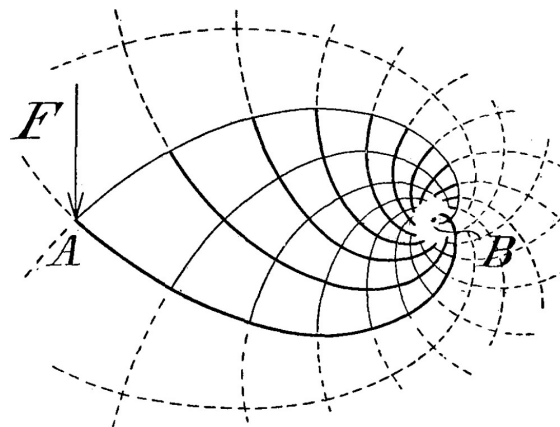


Abb. 3.1: Typische Michell-Struktur mit reinen Zug- und Druckstäben (Michell, 1904)

Allgemeinerer Natur ist die Lösung von Topologieoptimierungsproblemen diskreter Rahmenstrukturen basierend auf analytischen Optimalitätsverfahren nach Prager (1974). Kirsch (1990) zeigt erstmals einen Optimierungsweg für komplexe Stabwerke auf, welcher die optimale Struktur aus einer definierten Grundstruktur ermittelt. Insbesondere für die relativ einfach zu berechnenden Tragwerke aus Stäben werden Verfahren der Integer-Programmierung (Padula u. Sandridge, 1993), der „Branch and Bound“-Methoden (Ringertz, 1986) und der regelbasierten Optimierung (Koumoussis, 1993) eingesetzt. Hörnlein (1994) berücksichtigt erstmals auch Stabilitätsprobleme wie Knickversagen.

Meist wird Topologieoptimierung auf Basis bereits bestehender Bauteile genutzt um diese hinsichtlich ihres Gewichtes zu verbessern (Sauter u. a., 2000; Spath u. a., 2002). Die Rippenstruktur des Vorflügels des Airbus A380 wurde mit Hilfe von Topologieoptimierung hinsichtlich der Steifigkeit optimiert. Mittels mathematischer Variation von Wandstärken und Steghöhen wurde anschließend die Geometrie hinsichtlich Beugeverhalten und Lebensdauer optimiert und somit eine Gewichtsersparnis von etwa einer halben Tonne realisiert (Ponn u. Lindemann, 2011, S. 223).

Als Zielfunktionen werden bei Topologieoptimierungen meist ein minimales Gewicht oder eine minimale mittlere Nachgiebigkeit⁷ berücksichtigt. Die mit Hilfe von Topologieoptimierung gewonnenen Designvorschläge müssen anschließend in eine Konstruktion umgesetzt werden und können weiter optimiert werden. Nach Schumacher (2005, S. 207-208) lassen sich die heute eingesetzten Verfahren zur Topologieoptimierung hinsichtlich folgender Merkmalen unterscheiden (siehe auch Abb. 3.2):

- Definition des Topologiebauraumes: Hierbei wird zwischen diskreten Strukturen (wie beispielsweise Stabwerken) und kontinuierlichen Strukturen, welche zum Lösen mit finiten Elementen ausgefüllt werden, unterschieden.
- Art der Ziel- und Restriktionsfunktion: Es wird unterschieden zwischen Nachgiebigkeit, Gewicht, Eigenfrequenz, usw. als Zielfunktion.
- Definition der Entwurfsvariablen: Der Bauraum wird entweder durch eine Vielzahl von kleinen Strukturbereichen, sog. Finite-Elemente (FE) oder durch parametrisierte Randdefinitionen beschrieben.
- Verwendeter Lösungsalgorithmus: Zur Lösung des Optimierungsproblems können unterschiedlichste Algorithmen angewandt werden. Es werden sowohl Mathematischen Programmierung (MP), sowie auch Optimalitätskriterien (OC) und Evolutionsstrategien (ES) eingesetzt.

⁷gemittelte Verschiebung aller Knotenpunkte eines FE-Netzes

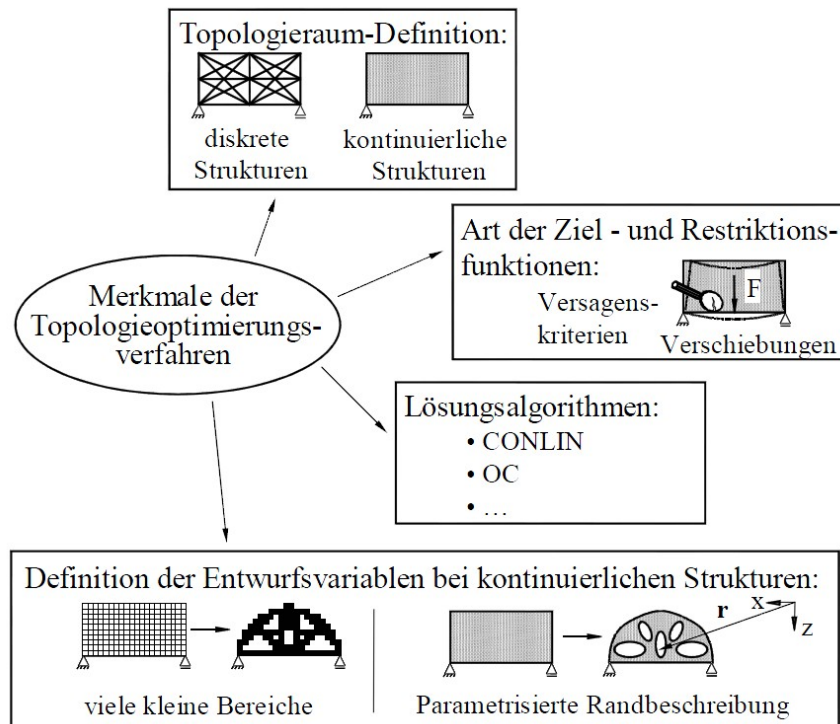


Abb. 3.2: Merkmale der Topologieoptimierungsverfahren nach Schumacher (2005)

Die Topologieoptimierungsmethoden basieren auf der Grundidee, dass eine Struktur dann optimal ausgelegt ist, wenn jeder Bereich der Struktur zur Tragfähigkeit beisteuert und genau so dimensioniert ist, dass kein unnötiges Material verbaut ist. Dies hat eine homogene Spannungsverteilung zur Folge und gilt als Qualitätsmerkmal einer Leichtbaustruktur. Mattheck leitet diese Grundidee von den Prinzipien biologischer Wachstumsgesetze ab und formuliert dieses Merkmal als „Axiom konstanter Spannung“ (VDI 6224 Blatt 2, 2012). Das grundlegende Vorgehen bei den beiden Methoden ist in Abb. 3.3 dargestellt. Ausgehend von einem vernetzten Bauraum wird eine FE-Analyse durchgeführt. Die berechneten von Mises Spannungen dieser Analyse bilden die Grundlage für eine Variation der Elementeigenschaften. Bereiche mit hoher Spannung werden (durch eine Modifikation des E-Moduls) verstärkt, Bereiche mit weniger Spannung werden geschwächt. Die anschließende Neuberechnung des Modells zeigt den Verbesserungsgrad und das Annähern an die gewünschte Zielfunktion. Diese Schleife wird so lange wiederholt bis die definierten Konvergenzkriterien erfüllt sind und das Endergebnis aufbereitet werden kann.

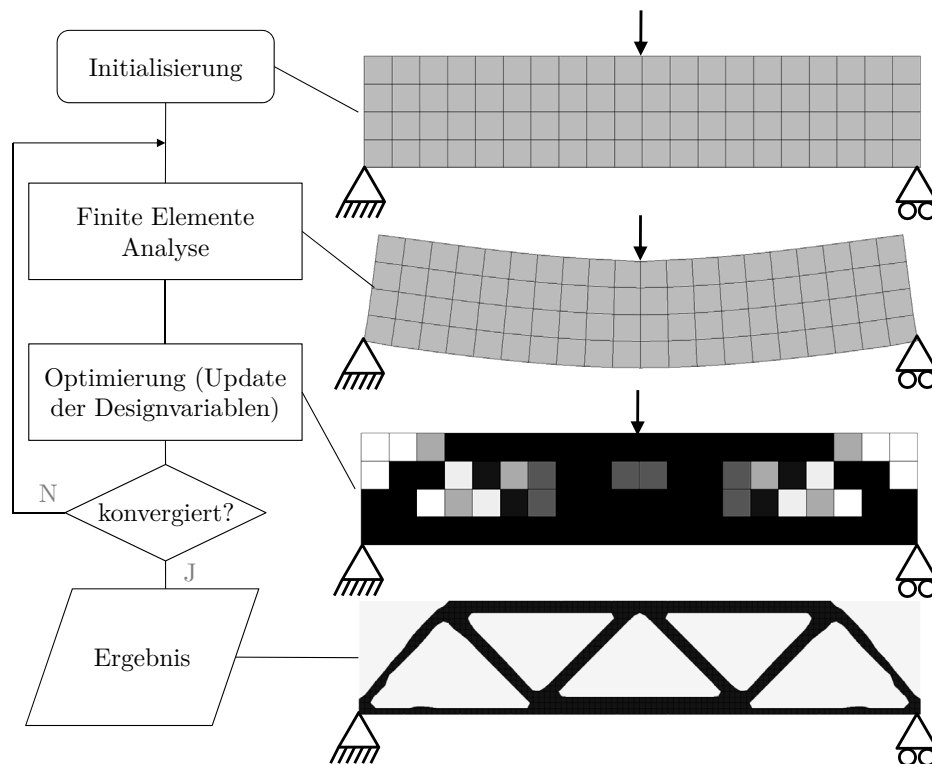


Abb. 3.3: Ablauf einer Topologieoptimierung Bendsøe u. Sigmund (2003, S. 14)

Eine der derzeit gebräuchlichsten Methoden zur Topologieoptimierung ist der SIMP Ansatz (Bendsøe u. Kikuchi, 1988; Bendsøe u. Mota, 1993; Bendsøe u. Sigmund, 2003; Hassani u. Hinton, 1998). Eine sehr einfach zu verstehende Topologieoptimierungsmethode ist die Soft-Kill-Option (SKO) (Baumgartner, 1992; Mattheck, 1997). Die SIMP Methode wird aktuell z. B. im kommerziellen Programm OptiStruct[®] umgesetzt. Die SKO Methode ist im FormUp[®] Modul in Marc/Mentat[®] implementiert. Während die SIMP-Methode in vielen weiteren kommerziellen Programmen Anwendung findet und eine Vielzahl an weiteren Entwicklungen dazu existiert, stellt die SKO Methode eine sehr anschauliche Topologieoptimierungsmethode dar. Im Folgenden werden daher diese Vertreter näher betrachtet.

3.3.1 Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)

Nach Bendsøe u. Sigmund (2003) steht SIMP für „Solid Isotropic Material with Penalization“. Bei diesem Topologieoptimierungsverfahren wird als Designvariable ein dimensionsloser Dichtefaktor $0 < \rho \leq 1$ eingeführt, welcher jeweils mit dem Elastizitätstensor eines jeden finiten Elementes multipliziert wird. Besitzt folglich ein Element einen geringen Dichtefaktor wie beispielsweise $\rho = 0,01$, so hat es auch eine geringe Steifigkeit. Bei einem Dichtefaktor von 1 hat das Element seine ursprünglichen Steifigkeitseigenschaften. Ein Optimierungsalgorithmus kann nun jedem Element der Gesamtstruktur einen Dichtefaktor zuweisen und so seinen Einfluss auf die Gesamtstruktur verändern. Elemente mit einer hohen Steifigkeit (entspricht

einem hohen Dichtefaktor) sind somit wichtig für das Gesamttragwerk und müssen erhalten werden, wohingegen Elemente mit niedriger Steifigkeit entfernt werden können.

Um die kontinuierliche Verteilung des Dichtefaktors zwischen 0 und 1 möglichst in eine eindeutige Zuweisung eines Elements zu 0 oder zu 1 zu bewegen, wird beim SIMP Ansatz ein Bestrafungsexponent $p \geq 1$ eingeführt, welcher Dichtefaktoren, die sich in der Grauzone zwischen 0 und 1 bewegen zu „bestrafen“ (siehe Abb. 3.4). Der Elastizitätstensor eines Elements ergibt sich folglich zu

$$E = \rho^p E^0, \quad (3.1)$$

mit E^0 als Bezeichnung für den normalen Elastizitätstensor des finiten Elements. Als Bestandteil einer Optimierungsschleife führt dieser Ansatz dazu, dass der Einsatz von Elementen mit Zwischendichten bestraft wird, da das E-Modul über den Potenzsatz überproportional vermindert wird. Für die Optimierung werden demnach Zwischenzuständen unökonomisch, sodass ein klareres 0-1 Design entsteht. Im Regelfall wird über die Optimierung hinweg der Bestrafungsexponent schrittweise von 1 bis zu 5 erhöht. Der größte Vorteil der SIMP-Methode ist die geringe Anzahl an Designvariablen, da jeweils pro Element nur eine Variable verwendet werden muss um den Dichtefaktor zu beschreiben.

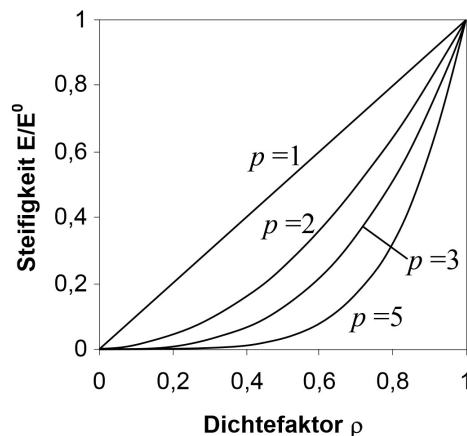


Abb. 3.4: Einfluss der Bestrafungsexponenten p auf die Elementsteifigkeit in Abhängigkeit des Dichtefaktors ρ (nach Kober (2011))

Einen Schritt weiter Richtung Erstmodellerstellung und funktionales Produktdesign geht das konzeptionelle Designtool solidThinking Inspire[®]. Dieses baut ebenfalls auf der SIMP-Methode zur Generierung von belastungsgerechten Designmodellen innerhalb eines vorgegebenen Designraumes auf (SolidThinking inc., 2012):



Abb. 3.5: Produktdesign mit solidThinking Inspire® (Quelle: www.solidThinking.com)

3.3.2 Soft-Kill-Option (SKO)

Knochen sind optimierte Lastträger, welche über ihre Lebenszeit vielfältige Lastzyklen überdauern müssen. Verändert sich die natürliche Belastung ist ein Knochen in der Lage darauf zu reagieren, indem er seine Form u.a. mittels adaptiver Mineralisierung verändert (Huber-Betzer, 1990). Dies bedeutet, dass an Stellen höherer Belastung Material angereichert werden kann und an Stellen, welche weniger belastet sind Material entfernt wird (siehe Abb. 3.6).

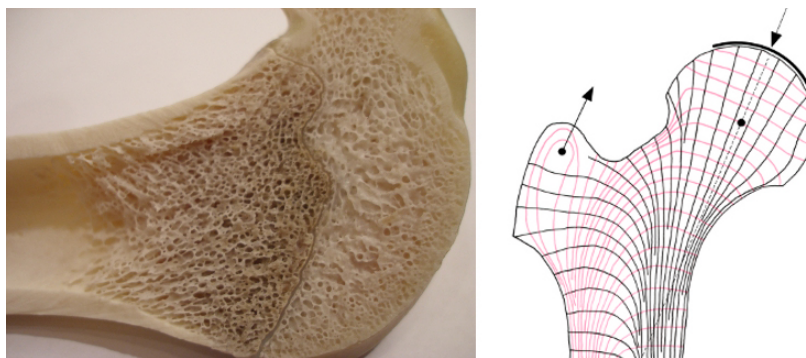


Abb. 3.6: Feines Netz von Knochenbälkchen, welche entlang der Kraftlinien ausgerichtet sind. Unbelastete Stellen besitzen keine Materialanhäufung. Quelle: www.bionik-vitrine.de, Abruf 07.11.2013

Eine technische Umsetzung dieses Mechanismus erfolgt über eine Variation des E-Moduls. Dies wird bei der SKO Methode gedanklich als eine Funktion der Temperatur realisiert. Die Beziehung zwischen E-Modul und Temperatur kann als offenes Polygon definiert werden, bei dem den Temperaturen bestimmte E-Module zugewiesen werden. Hierbei erfolgt eine Zuweisung des maximalen E-Moduls E_{max} zu der Temperatur $T = 100$, und die Zuweisung des minimalen E-Moduls E_{min} zu $T = 0$.

Der Ablauf der Topologieoptimierung mit SKO erfolgt in drei Schritten:

1. Als erstes werden die Spannungen für einen definierten Lastfall im Designraum berechnet. Der Designraum muss die optimierte Struktur umschließen und besitzt zu Beginn ein konstantes E-Modul.
2. Das E-Modul wird als Funktion der Spannung variiert.
3. Im nächsten Schritt wird eine neue Spannungsverteilung mit demselben Lastfall und den neuen E-Modulen berechnet.

Die Schritte 2 und 3 werden so lange wiederholt, bis eine klare Trennung zwischen Regionen hohen E-Modules und niedrigen E-Modules erkennbar sind. Teilregionen mit geringer Belastung werden so schrittweise geschwächt und können schlussendlich entfernt werden.

Für die Variation des E-Modules gibt Baumgartner (1992) drei verschiedene Möglichkeiten an, wobei jeweils $n + 1$ den aktuellen Iterationsschritt und n den vorherigen Iterationsschritt bezeichnen. Die einfachste Beziehung zwischen Spannung und E-Modul ist das E-Modul direkt aufgrund der berechneten Spannung zu variieren („Stress relationship“).

$$E_{n+1} = \sigma_n \quad (3.2)$$

Die „Stress increment relation“ verbessert den Effekt von Änderungen in der Spannungsverteilung, indem die E-Module aufgrund der Spannungsänderung vom vorherigen zum aktuellen Iterationsschritt variiert werden. Hierbei stellt k einen Faktor größer 1 dar.

$$E_{n+1} = E_n + k(\sigma_n - \sigma_{n-1}) \quad (3.3)$$

Die dritte Gleichung („Reference stress relationship“) beschreibt den Mineralisierungsprozess und weist die beste Konvergenz auf. Die Referenzspannung σ_{ref} kann hierbei frei gewählt werden und kontrolliert die Variation des E-Moduls.

$$E_{n+1} = E_n + k(\sigma_n - \sigma_{ref}) \quad (3.4)$$

3.4 Spezialisierung von Konstruktionsentwürfen

Nachdem ein Erstmodell durch einen kreativen Prozess, eine Vorbildkonstruktion oder automatisierte Verfahren wie der Topologieoptimierung erstellt wurde, ist es notwendig dieses Konzept zu einem Entwurf auszuarbeiten. Ohne die zu Grunde liegenden Prinzipien zu verändern, müssen die Erstmodelle dimensioniert und an die mechanischen Randbedingungen angepasst werden. Im Stand der Technik erfolgt die Übertragung der Ergebnisse aus z. B. der Topologieoptimierung mit sog. Reverse Engineering Tools wie beispielsweise HyperWorks®. Diese können die aus der Topologieoptimierung in Form von ISO-Flächen⁸ resultierenden Geometrien für ein CAD Programm aufbereiten. Aktuelle CAD-Tools wie beispielsweise CATIA® ermöglichen eine automatisierte Flächenrückführung und Vereinfachung und damit den Übertrag der Ergebnisse zu vereinfachte CAD Konstruktionen.

Um im darauffolgenden Arbeitsschritt die Erstmodelle verändern zu können, ohne das zu Grunde liegende Konstruktionsprinzip zu verändern, muss das Erstmodell manipulierbar sein. Details einer Konstruktion können beispielsweise mit der Computer-Aided-Optimisation Methode (CAO) durch weiteres Schrumpfen und Verändern der Konstruktion nachbehandelt werden, sodass durch einen iterativen Optimierungsprozess schließlich die zu erstellende Konstruktion mit einer dauerfesten Leichtbaustruktur entsteht (Mattheck, 1997, S. 63, 64).

⁸z. B. Flächen mit gleicher Elementdichte bei dem Ergebnis der SIMP-Methode

Mit Hilfe der Computer Aided Internal Optimization (CAIO) können Faserverläufe nach dem Vorbild von Bäumen optimiert werden. Diese Softwaretools konnten bereits in die Praxis umgesetzt werden. Häufig erfolgt deren Einsatz in der Automobilindustrie, in der damit Bauteile vom Motorhalter bis zur tragenden Karosserie (Konzeptfahrzeug Mercedes-Benz bionic car (Speck u. a., 2012, S. 88-89)) optimiert wurden. Nach den komplexeren, auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basierenden Verfahren wurden am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zusätzlich niederschwellige Optimierungsmethoden, sogenannte „Denkwerkzeuge“⁹ (Mattheck, 2006, 2010), entwickelt, die einfache, für bestimmte Fälle sogar rein graphische Optimierungen, ermöglichen. Zu den Denkwerkzeugen gehört die Methode der Zugdreiecke, die bereits zur Kerbspannungsreduktion genutzt wird, aber auch Potenzial für eine lokale Faserrichtungsoptimierung an „Störstellen“ in Faserverbunden hat. Diese Werkstoffklasse erfährt im Leichtbau immer weitere Verbreitung, weshalb auch die Faserverbundoptimierung zunehmend größere Bedeutung erlangt, um die spezifischen Eigenschaften des relativ teuren Materials besser ausnutzen zu können und Gewicht sowie Kosten zu senken. Aktuelle Softwareprodukte, die in der Industrie Anwendung finden, wie beispielsweise TOSCA.shape¹⁰ oder Altair OptiStruct¹¹ realisieren ähnliche Vorgehensweisen in kommerzieller Software. Eine Zusammenfassung der bionischen Optimierungswerkzeuge (CAO, SKO, CAIO und Methode der Zugdreiecke) mit Anwendungsbeispielen gibt die VDI Richtlinie 6224 VDI 6224 Blatt 2 (2012).

3.4.1 Parameteroptimierung

Mit Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit ist es jedoch nicht nur nötig einzelne Details eines Erstmodells anzupassen, es muss vielmehr die globale Geometrie des Erstmodells verändert werden können, um eine Anpassung der biologisch inspirierten Konstruktionsentwürfe an die mechanischen Randbedingungen des technischen Problems zu ermöglichen. Ohne dabei das grundlegende Konstruktionsprinzip des Erstmodells zu verändern, ermöglicht diese Anpassung eine im Stand der Technik bekannte parametrische CAD Konstruktion. Im Gegensatz zu klassische CAD Konstruktionen wird bei einer parametrischen Konstruktion Wert auf variable Maße gelegt, welche in Form einer Konstruktionstabelle im CAD Programm hinterlegt sind. Diese veränderlichen Parameter können beispielsweise Längen, Winkel, Anzahlen oder auch komplexe Bedingungen sein. Durch eine Veränderung der Konstruktionstabelle wird das parametrische Bauteil automatisch neu aufgebaut und kann so seine komplette Geometrie ändern.

Nachdem eine parametrische CAD Konstruktion erstellt wurde, können innerhalb einer Optimierungsschleife durch Variation der Parameter neue Designs automatisiert erstellt werden und bezüglich der definierten Zielfunktionen und Einschränkungen bewertet werden. Hierbei bleibt das zu Grunde liegende Konstruktionsprinzip, welches von dem biologischen Vorbild

⁹Mattheck nennt die Methode auch „Volksmechanik“, da sie einen pädagogischen Nutzen besitzen und Anwenden mit einfachsten Mitteln die Formsprache der Natur näher bringen sollen.

¹⁰<http://www.fe-design.de/produkte/tosca-structure/shape/> (Abruf 10.09.2012)

¹¹http://www.altairhyperworks.de/pdfs/product_brochures/HW_OptiStruct_Web.pdf (Abruf 10.09.2012)

abgeleitet wurde, erhalten (Lindby u. Santos, 1999). Die sog. Form- und die Dimensionsoptimierung sind zwei der gängigsten Optimierungsvarianten. Bei der Formoptimierung wird die Geometrie des Bauteils durch beispielsweise die Anzahl von Rippen, Durchmesser von Löchern, etc. verändert, wohingegen bei der Dimensionsoptimierung insbesondere Dicken betrachtet werden. Eine Kombination dieser beiden Varianten verspricht eine bestmögliche Anpassung einer parametrischen Konstruktion an ein Lastkollektiv. Die möglichst optimale Parameterkonfiguration, welche das am leichtest bauende Konzept verspricht, kann mit im Stand der Technik vorhandenen mathematischen Optimierungsverfahren gefunden werden.

Alle gängigen Optimierungsverfahren basieren auf einer iterativen Annäherung an das Optimum der Zielfunktion. Der Ablauf ist hierbei immer derselbe: Von einem Startentwurf ausgehend wird der Entwurf nach bestimmten Kriterien geändert. Anschließend wird überprüft, ob das Abbruchkriterium erfüllt ist. Ist dies nicht der Fall, wird erneut der Entwurf geändert. Dies wird solange wiederholt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist und die optimale Lösung gefunden wurde.

Die für die Optimierung mechanischer Strukturen zur Verfügung stehenden Algorithmen lassen sich nach Schumacher (2005, S. 51) in restringierte Probleme mit Nebenbedingungen und nicht-restringierte Optimierungsprobleme, bei denen nur die Zielfunktion betrachtet werden muss, unterteilen. Da für die Optimierung der bionischen Entwürfe immer Restriktionen wie maximale Verschiebung, maximale Spannungen, etc. betrachtet werden müssen, wird an dieser Stelle der Schwerpunkt auf die restringierten Probleme gelegt. Im Gegensatz zur Topologieoptimierung, bei welcher eine Vielzahl von Entwurfsvariablen betrachtet werden müssen, ist bei einer Size- und Shape-Optimierung meist eine geringe Anzahl an Entwurfsvariablen vorhanden. Da die Interaktion der verschiedenen Entwurfsvariablen untereinander in den seltensten Fällen ein konvexes Problem¹² darstellt, ist es notwendig einen Optimierungsalgorithmus zu verwenden, der das globale Optimum zuverlässig findet. Nach Schumacher (2005, S. 96) eignen sich für nicht-konvexe Probleme die stochastischen Verfahren. Die Evolutionsstrategie nach Rechenberg (1973) basiert auf dem Darwin'schen Modell der biologischen Evolution und findet Anwendung bei der Optimierung komplexer Prozesse und technischer Objekte wie z. B. Tragflügel, Rohrkrümmer und Leichtbaukonstruktionen. Mit diesem Verfahren kann die Optimierung abhängig von der Komplexität und der Qualität der Bewertungskriterien durch mathematisches Rechnen, durch subjektive Selektion oder durch experimentelles Optimieren erfolgen. Ist beispielsweise zu Beginn einer Optimierung mit Evolutionsstrategien das Optimum gefunden, kann mit Hilfe von Sequentieller Quadratischer Programmierung¹³ die Feinabstimmung effizient durchgeführt werden. Bei einer geringen Anzahl von Entwurfsvariablen kann die Erstellung einer nicht-linearen Response Surface sinnvoll sein. Für die Optimierung der bionischen Entwürfe ist eine Kombination aus einer Response Surface mit einer stochastischen Methode am sinnvollsten. Im Folgenden sollen

¹²Die Zielfunktion besitzt in dem betrachteten Intervall nur eine Minimalstelle

¹³Weiterführende Informationen siehe Schumacher (2005, S. 86)

daher die Response Surface, sowie die Evolutionsstrategie als Vertreter der stochastischen Optimierungsalgorithmen näher betrachtet werden.

3.4.2 Response Surface

Die Response Surface (RS) ist eine mathematisch geschlossen erfassbare Approximationsfunktion, die den Versuchsraum des komplexen Optimierungsproblems vereinfacht nachbildet (sog. „Optimierungsgebirge“). Für die Erstellung einer RS ist es nötig den gesamten Versuchsraum mit Hilfe eines Versuchsplan (engl. „Design of Experiments“ (DoE)) zunächst abzutasten, um so die Koeffizienten der RS zu bestimmen. Im einfachsten Fall ist die RS eine Polynomfunktion. Nach Schumacher (2005) eignet sich folgende Definition der Polynome wegen ihrer normierten Entwurfsvariablen zwischen -1 bis +1 sehr gut:

$$g(x) = c_1 + c_2 \frac{x_1 - x'_1}{x''_1} + c_3 \frac{x_2 - x'_2}{x''_2} + c_4 \left(\frac{x_1 - x'_1}{x''_1} \right)^2 + c_5 \left(\frac{x_2 - x'_2}{x''_2} \right)^2 + c_6 \left(\frac{x_1 - x'_1}{x''_1} \right) \left(\frac{x_2 - x'_2}{x''_2} \right) + \dots \quad (3.5)$$


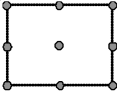
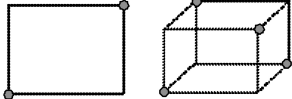
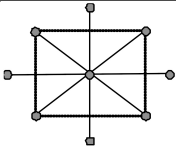
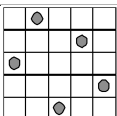
mit $x'_i = \frac{x_{i,min} + x_{i,max}}{2}$ und $x''_i = \frac{x_{i,max} - x_{i,min}}{2}$.

Nachdem die Art der Approximationsfunktion definiert wurde, gilt es mit Hilfe einer DoE den Versuchsraum möglichst geschickt abzutasten. Hierbei gibt es verschiedene Vorgehensweisen wie beispielsweise der „Full Factorial“-Plan, die jeweils eine unterschiedliche Anzahl an Stützstellen (und damit Rechenzeit) benötigen und dementsprechend unterschiedliche Genauigkeit der Approximation liefern. Es gilt hierbei eine ausreichende Genauigkeit der RS zu erzielen bei angemessener Rechenzeit. Bei einfach zu bestimmenden Stützstellen bieten sich insbesondere die „Adjustable Full Factorial“ Pläne an, bei denen man eine beliebig genaue Rasterung des Entwurfsraumes durchführt (vgl. Tab. 3.1). Für den vorliegenden Fall, dass man nur sehr wenige Informationen über das Modell hat, bieten sich insbesondere sog. „Space Filling“-Pläne an, die mit Hilfe eines Zufallsgenerators die Stützstellen platzieren. Der vielfach eingesetzte „Latin Hypercube“-Plan teilt den Entwurfsraum in Zeilen und Spalten auf und kanalisiert die Stützstellen so, dass in jeder Zeile und in jeder Spalte jeweils nur eine Stützstelle positioniert wird. Nachdem die RS mit Hilfe der Stützstellen aus der DoE erstellt wurde, kann auf ihr die eigentliche Optimierung stattfinden. Für weiterführende Details zur RS siehe Schumacher (2005, S. 72ff).

3.4.3 Evolutionsstrategien

In der Natur erfolgt die Anpassung bzw. Optimierung eines Systems nach den Regeln der Evolution (Darwin, 1859). Veränderungen (Mutationen), Auswahlmechanismen (Selektion) und Nachfahren (Rekombination) bilden die Grundprinzipien der biologischen Evolution und werden in den Evolutionsstrategien (ES) sowie in den Genetischen Algorithmen (GA)

Tab. 3.1: Klassische Versuchspläne (DoE) mit der jeweiligen Anzahl der Stützstellen nach Schumacher (2005)

Bezeichnung	Beschreibung	Stützstellenanzahl
Full Factorial		2^n
3-level Full Factorial		3^n
Fractional Full Factorial		2^{n-p} z. B. halb belegt: $p = 1$
Adjustable Full Factorial	selbst definiertes Raster	beliebig
Central Composite Design		$2^n + 2n + 1$
Box-Behnken-Design	mittig auf allen Würfelkanten + zentraler Punkt	$3^n - 2^n - 2n$
Monte Carlo Verfahren, Random Design	Zufallsgenerator	beliebig
Latin Hypercube		beliebig

nachgebildet. Da die Vorgehensweise bei beiden Algorithmen ähnlich ist, die ES jedoch mit realen Werten im Versuchsraum arbeitet, wird dieses Verfahren für die Optimierung bzw. Anpassung der biologischen Designvorschläge verwendet. Nach Schumacher (2005) folgt die einfachste Form einer ES folgendem Ablauf:

1. Festlegung von μ Elternentwürfen
2. Berechnung dieser Entwürfe
3. Generierung von λ Nachkommen pro Elternentwurf durch Mutation
4. Berechnung dieser Entwürfe
5. Übernahme von μ besten Entwürfen (Selektion und Rekombination)
6. Überprüfung der Abbruchkriterien: wenn nicht erfüllt, gehe zu 3
7. Optimale Lösung

Rechenberg (1994) führt für die ES die folgende Nomenklatur ein, welche die Varianten der ES beschreibt:

$$(\mu, \lambda) - \text{ES} \tag{3.6}$$

wobei μ die Anzahl der Eltern und λ die Anzahl der Nachkommen beschreibt. Das Komma zwischen μ und λ gibt an, dass ausschließlich die Nachkommen und nicht die Eltern in die Bewertung (Arbeitsschritt 5) und somit in die Selektion einbezogen werden. Der Kern des Algorithmus ist die Mutation und damit die zufällige Veränderung der Designs. Hierbei sollten häufig kleine Änderungen geschehen und selten auch große, weshalb dieser Vorgang meist mit der Gauss'schen Normalverteilung realisiert wird (Schumacher, 2005). Die einzelnen Parameter der ES, wie beispielsweise die Anzahl der Generationen, Anzahl der Eltern, etc. müssen je nach Problemstellung sinnvoll gewählt werden. Um die Rechenzeit zu optimieren, wird eine adaptive Schrittweitensteuerung, welche das schnelle oder das genaue Auffinden des Optimums steuert, verwendet. Die Anzahl der Eltern μ sollte zwischen 0,5 und 2-mal der Anzahl der Entwurfsvariablen liegen. Ebenso sollte die Anzahl der Nachkommen λ zwischen 4 und 5-mal der Anzahl der Entwurfsvariablen liegen. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 3.7 der Aufbau einer (1, 5) – ES dargestellt.

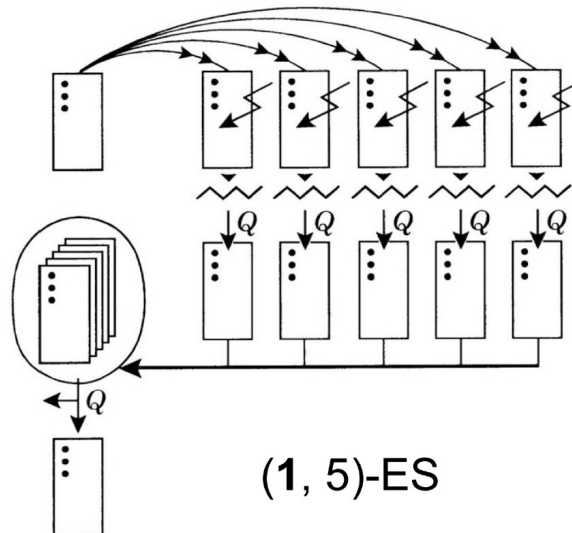


Abb. 3.7: Veranschaulichung einer (1,5) – ES nach Rechenberg (1994, S. 85). Die Karte mit drei Punkten symbolisiert dabei jeweils ein Individuum mit vollständigem Satz an Entwurfsvariablen. Der Blitz steht für die Mutation und die gezackte horizontale Linie für die Realisation. Die Bewertung wird durch das Q dargestellt.

Jedes Individuum, ob Elter oder Nachkomme, besitzt einen vollständigen Satz an Entwurfsvariablen \vec{x}_μ bzw. \vec{x}_λ . Der initiale Vektor \vec{x}_0 beinhaltet die Startwerte $(x_1, x_2 \dots x_n)$ der Entwurfsvariablen. Mit Hilfe der Gauss'schen Normalverteilung erfolgt die Mutation zufällig zu $\vec{x}_\mu = \vec{x}_\lambda + \Delta x$. Die zugehörige Dichtefunktion W für den Erwartungswert Δx kann definiert werden zu:

$$W(\Delta x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\sqrt{\frac{(\Delta x_i)^2}{2\sigma^2}}\right) \quad (3.7)$$

wobei σ die Standardabweichung ist. Nach erfolgreicher Mutation wird mit Hilfe der Qualitätsfunktion $Q(\vec{x})$ die besten Nachkommen ausgewählt und als Eltern der nächsten Generation eingesetzt. Die Qualitätsfunktion beinhaltet häufig eine Bewertung der Masse, der Verschiebung oder der Spannung des Bauteils. Als Abbruchkriterium eignet sich bei ES die Bewertung der Änderung der Entwurfsvariablen am besten.

3.5 Diskussion und Fazit des Standes der Technik

Die im Stand der Technik verwendeten Methoden zur Generierung von Konzepten basieren größtenteils auf Erfahrung, Expertenwissen, Verbesserung bestehender Konzepte oder automatisierter Topologieoptimierung. Es zeigt sich, dass besonders die ausgereiften Methoden, welche auf bekannte Konstruktionsweisen, Erfahrung und Prinzipien zurückgreifen eine universelle Anwendbarkeit im Leichtbau ermöglichen. Im gleichen Maße ist jedoch die Innovationshöhe einer Konstruktion, die mit Hilfe der ausgereiften Methoden entstanden ist als eher gering einzustufen, da die bekannten Konstruktionen meist mit denselben Methoden entstanden sind. Mathematische Modellierungen sind insbesondere in Spezialfällen anzutreffen, z. B. bei Flächentragwerken oder in Form der Topologieoptimierung bei Gussbauteilen. Da die mathematischen Methoden auf geschlossenen Gleichungen basieren, ist eine Innovation nur dann möglich, falls die Eingangsparameter (z. B. Belastungen und Lager) in die Gleichungen nicht identisch mit denjenigen der bisherigen Designs sind. Eine systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau ist im Stand der Technik nicht zu finden. Die bekannten Regeln für leichtbaugerechtes Konstruieren können jedoch für die Bewertung von biologischen Konstruktionsprinzipien verwendet werden. Die bekannten Screeningmethoden, um geeignete biologische Vorbilder für technische Lösungen zu finden, sind, wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, nicht geeignet, um die Problemstellung dieser Arbeit zu lösen. Es muss folglich eine Lösung für die Speicherung von Wissen über die biologischen Konstruktionsprinzipien, sowie deren Auffinden anhand mechanischer Randbedingungen entwickelt werden. Ebenfalls ist eine Bewertung unterschiedlicher Konzepte zu einem frühen Stadium im Entwurfsprozess notwendig.

Eine weitere identifizierte Problemstellung ist die Abstrahierung und Spezialisierung von biologischen Konstruktionsprinzipien hinsichtlich gegebener mechanischer Randbedingungen. Hier zeigt der Stand der Technik zwar ausreichende Vorgehensweisen zur Manipulation und Optimierung von Erstmodellen und damit Potential zur Optimierung der biologischen Prinzipien, als wichtiger vorausgehender Schritt muss allerdings zunächst das biologische Vorbild hinsichtlich der mechanischen Randbedingungen der Technik abstrahiert werden. Hierfür müssen diejenigen konstruktiven Details einer Lösung gefunden werden, welche bezüglich eines Lastfalles wichtig sind. Ebenso müssen Merkmale der biologischen Vorbilder identifiziert werden, welche keinen positiven Einfluss auf die technische Leichtbaukonstruktion haben und folglich zusätzliches Gewicht darstellen. Diese Aufgabenstellung ist im Stand der Technik in abgewandelter Weise in Form der Topologieoptimierung zu finden. Hierbei müssen ebenfalls Details eines Bauraumes identifiziert werden, welche nicht belastet sind. Es liegt daher nahe, die Topologieoptimierung für die Lösung dieser Problemstellung abzuleiten.

Abb. 3.8 fasst die Erkenntnisse der Diskussion des Standes der Technik zusammen und zeigt deren Einfluss auf die in Abschnitt 2.3 identifizierten Probleme.

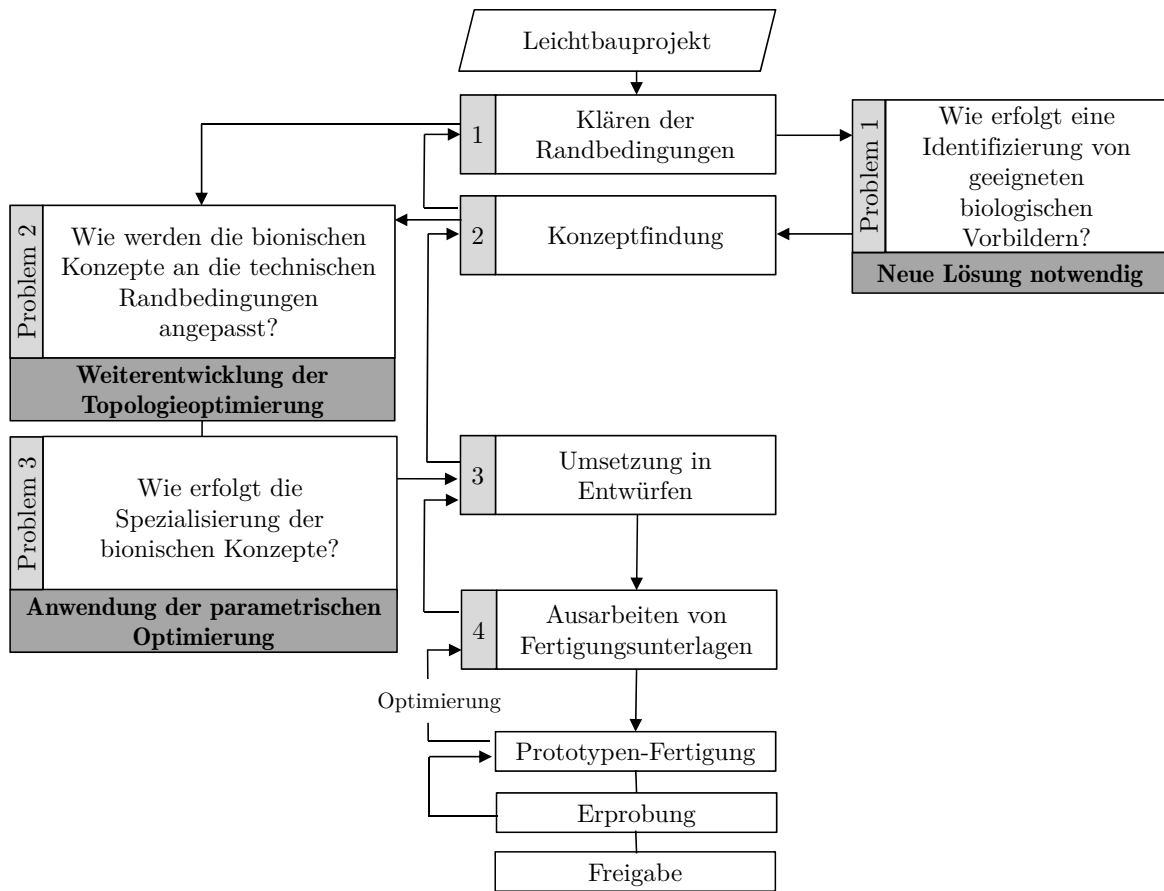


Abb. 3.8: Fazit des Standes der Technik für die Problemstellung dieser Arbeit

4

Konzeptbildung

Im folgenden Kapitel soll vor dem Hintergrund der Problemstellung und den Erkenntnissen aus dem Stand der Technik das Konzept für den in dieser Arbeit realisierten Lösungsvorschlag entwickelt werden. Wie in Kapitel 2 dargestellt, sind Anpassungen und Ergänzungen der systematischen Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach Klein (2013) für eine Berücksichtigung der Konstruktionsweisen biologischer Vorbilder notwendig (vgl. Abb. 2.2). Im Detail fehlt es an

1. Lösungen für ein Auffinden geeigneter biologischer Vorbilder und deren Bewertung hinsichtlich ihres Leichtbaupotentials,
2. einer systematischen Anpassung der Vorbilder an die technischen Randbedingungen und
3. einer Spezialisierung der Konzepte.

Um das Wissen der Konstruktionsprinzipien der Diatomeen möglichst gesammelt und schnell verfügbar zu machen, soll in dieser Arbeit ein Wissensspeicher in Form einer Datenbank entworfen werden. Inhalt des Wissensspeichers sollen neben beschreibenden Merkmalen der biologischen Vorbilder auch Leistungskennzahlen bezüglich des Leichtbaupotentials der Strukturen sein. Hierdurch soll eine Bewertung einzelner Strukturen untereinander ermöglicht werden. Für das Auffinden geeigneter Vorbilder soll innerhalb des Wissensspeichers eine Suchfunktion geschaffen werden, welche ausschließlich auf den mechanischen Randbedingungen der technischen Problemstellung basiert und damit das Screening systematisch leisten kann.

Um den Transferschritt zu leisten, wird im Rahmen dieser Arbeit die Anpassung der biologischen Konstruktionsprinzipien an die technischen Randbedingungen mit Hilfe der Topologieoptimierung umgesetzt. Es wird versucht diese Methode und die biologischen Bauprinzipien zu vereinen, um sowohl die natürlichen Vorbilder, als auch die mathematische

Strukturoptimierung gleichzeitig zu nutzen. Das Ergebnis dieser Kombination soll ein belastungsgerechtes Konstruktionsprinzip nach dem Vorbild mariner Planktonorganismen sein, welches anschließend für den Lastfall weiter spezialisiert bzw. optimiert werden kann. Hierbei muss das biologische Konstruktionsprinzip erhalten bleiben, weshalb an dieser Stelle die parametrische Geometrieoptimierungen angewendet werden soll.

Wie in Abschnitt 3.2.1 im Detail betrachtet, gibt der Stand der Technik wenig Aufschluss über die Materialzusammensetzung und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs der Diatomeen. Dieses Forschungsgebiet gliedert sich im Bereich der biologischen Grundlagenforschung ein und soll daher nicht Fokus dieser Arbeit sein. Zunächst soll das Material der Diatomeen als isotropes Material angenommen werden, um anschließend im Rahmen der Spezialisierung und der Optimierung der technischen Lösung an den jeweiligen Werkstoff angepasst werden zu können. Um die Übertragbarkeit der Bauweisen der Planktonorganismen trotzdem zu gewährleisten, soll im Rahmen dieser Arbeit ein nachgeschalteter Validierungsschritt erfolgen. Hierfür soll exemplarisch das für bionischen Leichtbau abgeleitete systematische Vorgehen des leichtbaugerechten Konstruierens durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden anschließend mit der Lösung des Stands der Technik verglichen, um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der Vorgehensweise treffen zu können und die Annahme des isotropen Materials zu bewerten.

4.1 Arbeitsthesen und Vorgehen

Ziel dieser Arbeit ist, eine systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau zu entwickeln, welche das Leichtbaupotential von Diatomeen unter Berücksichtigung des Verfahrens von Hamm nutzt und mit einer etablierten Entwicklungslogik der Ingenieurwissenschaften umgesetzt werden kann. Aus den im vorigen Abschnitt hergeleiteten Konzepten und der in Abb. 4.1 aufgezeigten abgewandelten Vorgehensweise nach Klein lassen sich für die Lösung der in Kapitel 2 beschriebenen Problemstellung drei Arbeitsthesen ableiten, welche im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden müssen:

1. Das Auffinden geeigneter Planktonorganismen als Vorbilder für eine Leichtbaukonstruktion und deren Bewertung ist mit Hilfe einer Suchfunktion innerhalb eines datenbankbasierten Wissensspeichers möglich und löst die Problemstellung des systematischen Screenings (siehe Kapitel 5).
2. Mit Hilfe einer abgewandelten Topologieoptimierung ist der Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien zu technischen Leichtbaulösungen möglich. Eine anschließende Spezialisierung hinsichtlich der mechanischen Randbedingungen kann mit parametrischer Geometrieoptimierung erfolgen (siehe Kapitel 6).
3. Die Übertragung von Bauweisen aus der Biologie zu technischen Konstruktionen führt zu leistungsfähigen Leichtbaukonstruktionen und kann in der angepassten Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens umgesetzt werden (siehe Kapitel 7).

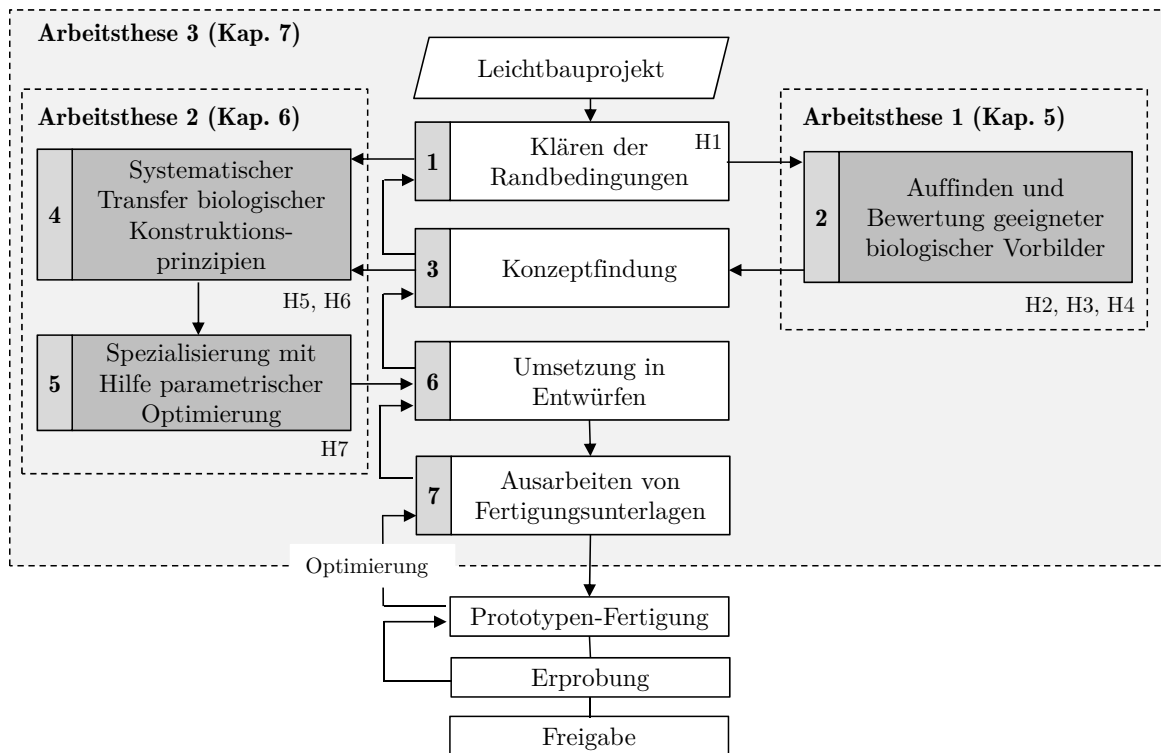


Abb. 4.1: Konzept der für bionischen Leichtbau angepassten Vorgehensweise des Konstruierens nach Klein (2013). Der Bezug zum Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodelldaten für eine technische Leichtbaustruktur nach Hamm (2003a) (vgl. Abb. 1.10) ist mittels Kennzeichnung der entsprechenden Arbeitsschritte H1 bis H7 verdeutlicht.

4.2 Gliederung

Nach der Einleitung, Problemstellung und Betrachtung des Standes der Technik, folgt im Anschluss an die Konzeptbildung eine grundlegende Untersuchung zu den Anforderungen und Inhalten des Wissensspeichers in Kapitel 5. Die inhaltlichen Schwerpunkte werden hier festgelegt und bilden zusammen mit den Anforderungen an die Struktur die Grundlage für die Realisierung eines Datenbanksystems in Abschnitt 5.1.

Für das Auffinden von geeigneten Leichtbauvorbildern innerhalb des Wissensspeichers wird in Abschnitt 5.2 eine Ähnlichkeitssuche basierend auf funktionalen Merkmalen (z. B. Lager, Kräfte) von technischen Problemstellungen und Designräumen untersucht, welche neben einer Verschlagwortung einen effizienten Abgleich zwischen technischem Problem und biologischer Lösung ermöglicht. Ist ein geeignetes Vorbild für ein technisches Problem gefunden, so soll sichergestellt werden, dass es sich um das am besten geeignete Vorbild handelt. Dies ist mit Hilfe von dimensionslosen Leichtbaukennwerten möglich und wird in Abschnitt 5.3 behandelt. Die Realisierung der Datenbankumgebung und die Einbettung der angesprochenen Suchen und Vergleichsmöglichkeiten wird in Abschnitt 5.4 beschrieben.

Kapitel 6 beginnt mit einer Einleitung zur Übertragung von Konstruktionsprinzipien aus der Natur zu technischen Leichtbaulösungen. Die im Stand der Technik bekannten Topologieoptimierungsmethoden werden in Abschnitt 6.1 mit Hinblick auf die Erweiterungs- und Kombinationsmöglichkeiten mit Hilfe der Lösungen der Natur untersucht. Nachdem die Konstruktionsprinzipien der Natur abstrahiert werden konnten, wird die parametrische Optimierung als Werkzeug für eine weitere Spezialisierung der Konstruktionsprinzipien an den technischen Lastfall betrachtet. In Abschnitt 6.2 werden anschließend die Ergebnisse und die Umsetzung der theoretisch hergeleiteten Methoden erläutert. Hierzu wird ein Flächentragwerk nach dem Vorbild einer Diatomeenvalve entworfen.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse aus Kapitel 5 und 6 in dem in Abb. 4.1 dargestellten Prozess kombiniert und so die Anwendbarkeit der in dieser Arbeit entwickelten Methoden unter der Berücksichtigung der Übertragbarkeit der Bauweisen untersucht. Das Anwendungsbeispiel ist eine Gründungsstruktur für eine Offshore-Windenergieanlage. Ausgehend von den Inhalten des Wissensspeichers werden in Abschnitt 7.1 geeignete biologische Vorbilder mit Hilfe der Ähnlichkeitssuche identifiziert. Die Strukturen werden anschließend mit Hilfe der Topologieoptimierung in einem speziellen Bauraum in Abschnitt 7.2 hinsichtlich des Lastfalles der Gründungsstruktur abstrahiert und anschließend mit Hilfe der parametrischen Optimierung weiter angepasst. Abschnitt 7.4 beschreibt die entwickelte optimale bionische Gründungsstruktur.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Methoden und Ergebnisse werden in Kapitel 8 diskutiert und beurteilt. In Anlehnung an die Arbeitsthese und den Aufbau dieser Arbeit betrachtet Abschnitt 8.1 zunächst den Screeningprozess innerhalb des Wissensspeichers und sein Potential zur Unterstützung bei der leichtbaugerechten Konstruktion. Die Möglichkeiten und Grenzen des systematischen Transfers der Leichtbauprinzipien werden in Bezug auf die zweite Arbeitsthese anschließend in Abschnitt 8.2 diskutiert. Darauf folgend wird in Abschnitt 8.3 in Bezug zur dritten Arbeitsthese die praktische Anwendbarkeit der Methoden evaluiert.

Eine Gesamtzusammenfassung dieser Arbeit sowie auch einen Ausblick über mögliche zukünftige Forschungsarbeiten und eine Übertragbarkeit der Vorgehensweise auf Basis weiterer biologischer Vorbilder findet sich schließlich in Kapitel 9.

5

Auffinden und Bewertung geeigneter biologischer Vorbilder zu einer technischen Leichtbauproblemstellung

Ausgehend von der in Abb. 4.1 aufgezeigten angepassten Vorgehensweise des Konstruierens für bionischen Leichtbau wird in diesem Kapitel die Problemstellung des Auffindens von biologischen Konstruktionsprinzipien anhand mechanischer Randbedingungen betrachtet. Die Basis für das Auffinden von Leichtbaustrukturen nach dem Vorbild von konkreten Strukturen aus der Natur soll, wie in Kapitel 4 beschrieben, ein Wissensspeicher sein, der die natürlichen Vorbilder und deren Konstruktionsprinzipien in aufbereiteter Form bereithält. Der Wissensspeicher soll genutzt werden, um neue Konzepte zu erstellen sowie zur Archivierung und zum Recycling bereits erzeugter Konzepte. Ziel des Wissensspeichers muss es sein, das Vorgehen beim leichtbaugerechten Konstruieren systematisch zu unterstützen, indem es dem Leichtbauexperten biologische Lösungsansätze in möglichst umfangreicher Beschreibung anwendungsgerecht und im Sinne des Arbeitsschrittes 2 in Abb. 4.1 liefert. Zusätzlich zu einer geeigneten Form des Wissensspeichers muss der Inhalt auf das Vorgehen beim Konstruieren einer Leichtbaustruktur abgestimmt sein.

Im folgenden Kapitel wird zur Untersuchung der ersten Arbeitsthese (vgl. Abschnitt 4.1) geprüft, ob das Auffinden geeigneter Planktonorganismen als Vorbilder für eine Leichtbaukonstruktion und deren Bewertung mit Hilfe einer Suchfunktion innerhalb eines datenbankbasierten Wissensspeichers möglich ist und die Problemstellung des systematischen Screenings löst. Hierzu wird in Abschnitt 5.1 zunächst ein passendes Basissystem¹ und der Inhalt des

¹Art der Datenbank, auf Basis welcher der Wissensspeicher realisiert wird

Wissensspeichers identifiziert. Nach einer Bewertung und abschließenden Auswahl des Systems werden zusätzlich notwendige Funktionen des Wissensspeichers betrachtet. Hierzu gehört eine automatisierte Suche, welche das Auffinden eines passenden, biologischen Vorbilds zu technischen Fragestellungen effizient ermöglicht (Abschnitt 5.2). Des Weiteren beinhaltet der Wissensspeicher eine Möglichkeit die verschiedenen Leichtbauprinzipien untereinander zu werten, um herauszufinden welches Prinzip für die jeweilige Fragestellung zur leichtesten Konstruktion führt (Abschnitt 5.3). Die Umsetzung der Konzepte wird in Abschnitt 5.4 beschrieben. Ein zusammenfassender Überblick über die datenbankgestützte Leichtbauentwicklung wurde während der Entstehung dieser Arbeit im Rahmen der „International Conference on Engineering Design“ veröffentlicht (Maier u. Hamm, 2011).

5.1 Anforderungen und Inhalt eines Wissensspeichers

Das Basissystem des Wissensspeichers stellt die Grundlage dar, um aus einem bestehenden Pool von Informationen geeignete Geometrien und Konstruktionsweisen auswählen zu können. Neben einer reinen Datenbank, welche Informationen speichern kann und über Abfragen wieder von sich geben kann, muss das Basissystem weiteren Anforderungen genügen.

Die Anforderungen an den Wissensspeicher lassen sich in verschiedene Gebiete unterteilen. Zunächst sollte der Wissensspeicher für diese Arbeit einen offenen Quellcode für Erweiterungen und Anpassungen haben, um eine spezifische Auslegung des Wissensspeichers an die Bedürfnisse des angepassten Prozesses für leichtbaugerechtes Konstruieren zu ermöglichen. Es liegt daher nahe ein offenes, sog. „open source“ System zu verwenden, um eine Integration von eigenem Programmcode zu ermöglichen. Diese Systeme sind meist nach „GPL“, „MPL“ oder „BSD“ Lizenzmodellen verfügbar, welche eine freie Verwendung ermöglichen². Konstrukteure und Designer arbeiten oft mit sehr unterschiedlichen Plattformen wie PC, Solaris, Unix oder Macintosh, wobei ebenfalls unterschiedliche Betriebssysteme zum Einsatz kommen. Um einen universellen und permanenten Zugriff auf die Daten zu ermöglichen, ist es sinnvoll, eine webbasierte Lösung für den Benutzer anzustreben. Hierbei ist es möglich alle Daten über einen Webbrowser abrufbar zu halten, was eine größtmögliche Flexibilität erlaubt. Der Wissensspeicher sollte außerdem die verschiedenen Datenformate, welche in der Datenbank abgelegt werden sollen, unterstützen. Hierbei zählen neben gängigen CAD Formaten auch FEA Dateien, Bilder, PDF und weitere beschreibende Multimedia Dateien. Um die hinterlegten Daten wieder auffindbar zu machen und so eine möglichst effiziente Strukturierung des Wissensspeichers zu ermöglichen, ist es wichtig frei definierbare beschreibende Stichwörter, sog. Metadaten, einpflegen zu können. Die Suchfunktion innerhalb des Wissensspeichers sollte nach Möglichkeit frei gestaltbar sein, um spätere Erweiterungen reibungslos in die Suche einbauen zu können.

²Detaillierte Informationen siehe <http://www.heise.de/open/artikel/Open-Source-Lizenzen-221957.html> (Abruf 04.09.2012)

Wie in Abschnitt 3.1 aufgezeigt, ist das Expertenwissen nicht einfach zu ersetzen. Ein Leichtbauprojekt ist meist sehr komplex und bedarf einer sehr guten Abstimmung hinsichtlich der Schnittstellen zu weiteren Themen. Der Wissensspeicher soll folglich eine unterstützende Rolle im systematischen Vorgehen des leichtbaugerechten Konstruierens darstellen und den Ingenieur bei der Konzeptfindung und der Umsetzung der Entwürfe unterstützen, indem er die Lücke zwischen dem Klären der Randbedingungen und der Konzeptbildung schließt. Hierfür werden neben den beschriebenen Anforderungen bezüglich des Basissystems auch inhaltliche Anforderungen an den Wissensspeicher gestellt, die es zu erfüllen gilt. Nach Drechsler (2006, Kap. 4, S. 2) ist es möglich „jede Leichtbaustruktur (...) aus verschiedenen Einzelementen aufzubauen“. Unterschieden wird hierbei zwischen Zugelementen, (ebenen und gekrümmten) Biegeelementen, Druckelementen (wie Stäbe, Profile und Platten), Torsionselementen und Sandwichstrukturen. Neben ganzheitlichen biologischen Vorbildern sollten folglich auch diese Teilstrukturen im Wissensspeicher hinterlegt sein, um möglichst viele Anwendungsfälle durch eine Kombination der Einzelemente abzudecken. Um die Konstruktionsprinzipien der Natur möglichst effizient zu dokumentieren, müssen verschiedene Voraussetzungen innerhalb des Wissensspeichers erfüllt sein:

- Die Konstruktionsvorschläge müssen geometrisch diskretisiert und beschrieben sein und müssen möglichst leicht an die genauen Bedürfnisse des Konstrukteurs angepasst werden können.
- Die Konstruktionsvorschläge müssen auf die typischen Problemstellungen der Technik abgestimmt sein. Eine Standardisierung sollte falls möglich erfolgen.
- Da meist nicht die optimale Endgeometrie des jeweiligen Problems bereitgestellt werden kann, müssen die Konstruktionsvorschläge möglichst umfangreich beschrieben und verständlich gemacht werden.
- Die Konstruktionsvorschläge müssen für den jeweiligen Anwendungsfall zu leichten Bauweisen führen. Dies macht einen Vergleich von Konstruktionsvorschlägen innerhalb des Wissensspeichers notwendig.

Diese inhaltlichen Anforderungen werden im Folgenden näher spezifiziert und mit Lösungsansätzen ergänzt. Die Diskretisierung einer Geometrie erfolgt mit Hilfe von CAD. Um eine adaptive Geometrie zu erzeugen, bedarf es parametrischer CAD Modelle, die mit Hilfe von mathematischen Definitionen sehr einfach in ihren geometrischen Ausdehnungen und Formen verändert werden können. Hierzu bieten CAD Programme wie beispielsweise CATIA V5 oder SolidWorks ausgezeichnete Werkzeuge. Die im Wissensspeicher hinterlegten Geometrien sollen nach Möglichkeit vom CAD System unabhängig sein, um möglichst von vielen Programmen gelesen werden zu können. Die Vielzahl an CAD Programmen, die sich derzeit auf dem Markt befinden, macht es unmöglich Geometrien bereitzustellen, die von jedem System lesbar sind und zugleich parametrisch aufgebaut sind. Die klassischen Austauschformate STEP und IGES

bieten keine Möglichkeit parametrische Modelle auszutauschen. Mit Hilfe von sog. Multi-CAD Lösungen ist es möglich Geometrien im XML Format mathematisch aufzubauen, um sie bei Bedarf von einem Skriptprogramm im jeweiligen CAD-Programm neu aufzubauen. Hierbei ist ebenso eine quasi Parametrisierung möglich, indem vor jedem Aufbau eine Interaktion mit dem Benutzer stattfindet, der die gewünschten Dimensionen eingibt. Für den Wissensspeicher ist es zusätzlich wichtig, diese Geometrien visuell darzustellen, ohne einen Import in ein CAD Programm tätigen zu müssen. Somit ist ein schneller Strukturvergleich und -auswahl möglich. Hierfür bietet sich die Virtual Reality Modeling Language (VRML) an. Die Beschreibungssprache für 3D-Szenen wurde ursprünglich für das Internet entwickelt und ist als ACSII Text lesbar (ISO/IEC 14772, 1997). Die Dateierweiterung „.wrl“ ist als Austauschformat von 3D-Modellen etabliert. Eine VRML-Darstellung (zum Beispiel innerhalb eines Web-Browsers) wird vom Computer des Betrachters in Echtzeit generiert.

Die Konstruktionsvorschläge sollten hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen, untersuchten Lastfällen, Materialien und möglichen Fertigungsverfahren standardisiert werden. Hinsichtlich einer späteren Bewertung und eines Vergleichs mehrerer Strukturen untereinander, ist es sinnvoll die Lastfälle bei Standardtragwerken wie Balken und Flächen zu vereinheitlichen. Strukturen, die als Balkentragwerke oder Flächentragwerke auffassbar sind, sollten mit verschiedenen Standardlastfällen belastet werden, mit deren Hilfe es möglich sein muss, eine grundlegende Aussage über das Verhalten der einzelnen Strukturen treffen zu können.

Im Anwendungsfall wird das Bauteil, welches der Ingenieur für seine Konstruktion benötigt, nicht exakt mit dem im Wissensspeicher hinterlegten Vorbild übereinstimmen. Es wird daher notwendig sein, das Bauteil entweder durch Parameterveränderung oder durch eine (in Anlehnung an das Konstruktionsprinzip) Neukonstruktion an die jeweiligen speziellen Bedürfnisse anzupassen. Hierfür ist ein Verständnis des Konstruktionsprinzips der Natur essentiell. Das Verständnis einer technischen Struktur kann durch beschreibende Informationen (sog. Meta-Daten) erreicht werden. Dies kann entweder durch einen Freitext erfolgen (was erweiterte Anforderungen an die Suchfunktion des Wissensspeichers stellt) oder durch vordefinierte Merkmale. Ebenfalls ist eine FE-Analyse, anhand derer die Kraft- bzw. Spannungsverläufe im jeweiligen Lastfall sichtbar werden, sehr aufschlussreich.

Unter der Voraussetzung gleicher Lastfälle ist eine Bewertung der Konstruktionsprinzipien notwendig, um eine Aussage hinsichtlich ihres Leichtbaupotentials treffen zu können. Hierbei sollte möglichst eine Material- und Dimensionsunabhängigkeit erreicht werden. Diese sehr allgemeine Aussage (Konstruktionsprinzip A führt für das aktuelle Problem zu einer leichteren Bauweise als Konstruktionsprinzip B) ist mit der Komplexität eines technischen Leichtbauproblems im Allgemeinen nicht vereinbar. Die jeweilige Geometrie hängt vom Material und von (mehreren) Funktionen ab, Hybridbauweisen und inhomogene Materialien/Bauweisen (z.B. Sandwich) sind meist sehr effizient, Fertigungsrestriktionen müssen berücksichtigt werden, usw. Hierin liegt deshalb immer eine gewisse Unschärfe, die aufgrund der Komplexität des Leichtbaus nicht umgangen werden kann. Eine Strukturbewertung sollte dennoch (soweit möglich) für eine erste Abschätzung in den Wissensspeicher integriert werden.

5.2 Funktionale Ähnlichkeitssuche

Im vorherigen Abschnitt wurden das Basissystem des Wissensspeichers, sowie die inhaltlichen Anforderungen, festgelegt. Wie in Abschnitt 4.1 ausgeführt, ist eine frei definierbare, evtl. geometrische Suche, eine wichtige Anforderung an den Wissensspeicher, um möglichst einfach passende biologische Vorbilder zu einer technischen Problemstellung zu finden. Diese Suchmöglichkeit soll daher im folgenden Abschnitt im Detail betrachtet werden. Das Vorgehen und die Ergebnisse wurden im Rahmen dieser Arbeit auch im Datenbank Spektrum (Maier u. a., 2012) publiziert.

Um für ein technisches Problem das jeweils beste biologische Vorbild herauszufinden, ist eine Suchmöglichkeit nötig, welche aufgrund der technischen Problemstellung (Lager, Kräfte, geometrische Ausdehnung, etc.) automatisch ein passendes biologisches Vorbild auffinden kann. Das Auffinden von Strukturen innerhalb des Wissensspeichers kann durch eine Vielzahl von Möglichkeiten realisiert werden. Allen gemein ist das Ziel mit möglichst wenigen, jedoch aussagekräftigen Informationen eine Struktur zu beschreiben und dadurch auffindbar zu machen. Die einfachste Möglichkeit ist die manuelle Suche anhand von Bildern der Strukturen. Je größer die Anzahl der hinterlegten Strukturen ist, desto mühsamer und schwieriger ist das Suchen. Eine weitaus komfortablere Möglichkeit bietet die Suche durch Metainformationen, welche beim Einstellen einer Struktur hinterlegt werden. Anhand von Schlagwörtern, Beschreibungen und Kennwerten können Strukturen relativ leicht gefunden werden.

Eine Möglichkeit Strukturen anhand technischer Fragestellungen zu finden bietet eine geometrische Ähnlichkeitssuche. Diese bezieht sich nicht auf Metainformationen, sondern auf die Daten selbst. Inhaltsbasierte Suchsysteme wurden hauptsächlich für Bilder (Malik u. a., 1999; Ravela u. Manmatha, 1998) sowie Audio- und Videodaten (Ohm u. a., 1999) entwickelt, jedoch fehlt es nach Heczko (Heczko u. a., 2002) an inhaltsbasierten 3D-Modell Suchsystemen. Ein Ansatz zur Ähnlichkeitssuche auf 3D-Objekten ist, möglichst aussagekräftige Merkmale einer Struktur zu definieren, welche anschließend verglichen werden.

Im Gegensatz zu traditionellen Ähnlichkeitssuchen, bei denen geometrisch ähnliche Daten aufgefunden werden können, liegt der Fokus in diesem Abschnitt nicht auf der Identifikation ähnlicher Formen zweier Objekte, sondern vielmehr auf einer ähnlichen technisch/mechanischen Funktion. Dies hat den Hintergrund, dass ein biologisches Vorbild nicht zwangsweise in seiner geometrischen Form der technischen Problemstellung ähnlich sein muss, sondern vielmehr dieselbe Funktion erfüllen muss. Bei einem Bauteilvergleich hinsichtlich der mechanischen Funktion sind die aufzufindenden Formen daher nicht unbedingt geometrisch ähnlich. Ziel muss es daher sein, anhand technischer Fragestellungen bezüglich einer Struktur, eine funktional ähnliche Struktur zu finden. Das schematische Vorgehen der funktionalen Ähnlichkeitssuche, wie es im Folgenden näher beschrieben ist, ist in Abb. 5.1 in seinen einzelnen Schritten dargestellt. Hierbei handelt es sich um ein mögliches Bauprinzip für eine funktionale Ähnlichkeitssuche. Ausgehend von der Definition von Merkmalsätzen werden die einzelnen Strukturen zunächst mit Hilfe einer Hauptachsentransformation hinsichtlich

ihrer geometrischen Orientierung und Größe normiert. Um die Lage im Raum anschließend mit Hilfe des Schwerpunktes normieren zu können, wird eine Clusteranalyse zur einheitlichen Gewichtung aller Merkmale durchgeführt. Nachdem alle Merkmale normiert sind, ermöglicht eine „Nächste-Nachbarn-Suche“ eine Berechnung der Ähnlichkeit zweier Strukturen. Mit Hilfe einer multidimensionalen Skalierung wird schlussendlich eine visuelle, schnell erfassbare Ergebnisrepräsentation erzeugt.

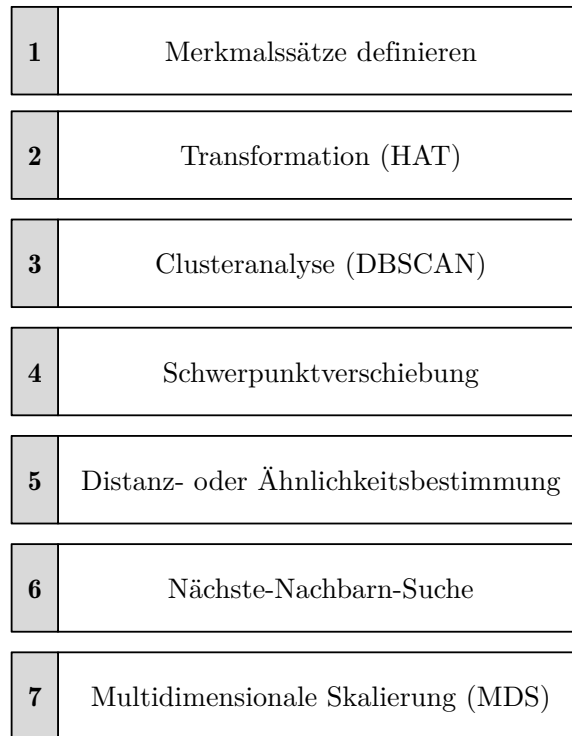


Abb. 5.1: Schematisches Vorgehen der funktionalen Ähnlichkeitssuche in sieben Schritten

5.2.1 Merkmalssätze definieren

Da ein technisches Tragwerk durch seine Kraftaufnahme- und Kraftabgabepunkte definiert werden kann, ist es sinnvoll das Tragwerk zunächst abstrakt zu betrachten. Wird angenommen, dass ein technisches Bauteil eine Blackbox ist, so dient es der Kraftumleitung von (mehreren) Punkten oder Flächen A zu anderen Punkten oder Flächen B unter bestimmten Restriktionen. Matthiesen beschreibt diesen Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme mit Hilfe von Wirkflächen und Tragstrukturen:

„Wirkflächen sind feste Oberflächen von Körpern [...] die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind“ (Matthiesen, 2002, S. 49).

„Leitstützstrukturen sind Volumina von Körpern [...], die genau zwei Wirkflächenpaare verbin-

den und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers [...] ermöglichen. Die Tragstruktur ist die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen“ (Matthiesen, 2002, S. 51).

Die Fragestellung der Ausgestaltung einer statischen Tragstruktur kann demnach vereinfacht durch eine räumliche Diskretisierung der Punkte der Kraftein- und -ausgänge (Wirkflächen) formuliert werden. Die Merkmale der geometrischen Ähnlichkeitssuche für Leichtbaudatenbanken sind daher nicht Geometriedaten selbst, sondern vielmehr die funktionalen Ein- und Ausgänge (Wirkflächen) der Struktur (vgl. Abb. 5.2). Bei einer Ähnlichkeit der Wirkflächen von technischen Tragstrukturen kann somit von einer ähnlichen Funktion beider Strukturen ausgegangen werden.

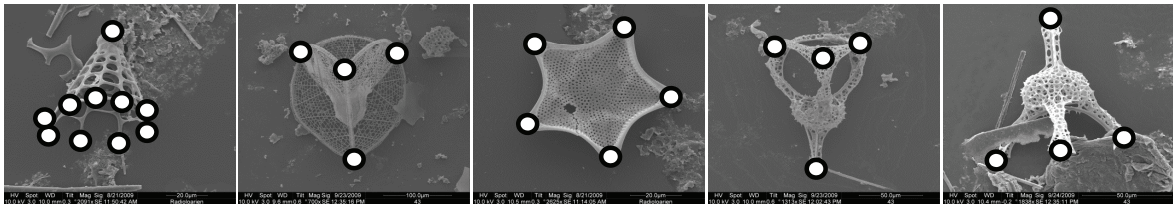


Abb. 5.2: Wirkpunkte und Wirkflächen innerhalb mariner Planktonstrukturen für die Übertragung auf technische Strukturen

Die Merkmale können folglich als Punkte im Raum angesehen werden, welche in einem kartesischen Koordinatensystem, als x , y und z Koordinaten, sehr einfach aus jedem CAD System auszulesen sind. Die Extraktion der Merkmale der einzelnen Strukturen erfolgt hierbei zunächst von Hand. Flächen können mit Hilfe von Punkten und Elementen diskretisiert werden, was gängige Praxis bei der Methode der finiten Elemente (FE) ist. Folglich können die Merkmale einer Struktur durch einfaches Vernetzen der Wirkflächen und/oder Punkte erfolgen und beispielsweise als NASTRAN Deck³ abgespeichert werden. Hierbei sind ausschließlich die GRID⁴ Einträge nötig.

In diesem Kapitel werden exemplarisch 12 Strukturen miteinander verglichen. Hierbei handelt es sich um eine Auswahl typischer Formen von Diatomeen- und Radiolarienschalen, die wichtige und häufig wiederkehrende funktionale Elemente aufweisen. Um das Funktionsprinzip der Ähnlichkeitssuche aussagekräftig aufzuzeigen, werden jeweils zwei ähnliche Strukturen ausgewählt, welche sich von den anderen Gruppen bezüglich ihrer Funktionsflächen und -punkte unterscheiden. In Abb. 5.3 sind diese dargestellt, wobei jeweils die dunklen Flächen die mit finiten Elementen diskretisierten Wirkflächen darstellen. Struktur B1 (*Stephanodiscus sp.*) und B2 (*Actinopterychus senarius*) sind jeweils runde Mantelflächen einer Diatomeenschale, bei Struktur B3 (*Callimitra sp.*) handelt es sich um eine Radiolarienstruktur mit vier Wirkflächen an den äußersten Streben (durch Kreise angedeutet). Struktur B4 (parametrisierte *Actinopterychus*

³Spezifische Eingabedatei des Nasa Structural Analysis System, einem gängiger Finite-Elemente (FE) Solver

⁴Knotenpunkte der einzelnen finiten Elemente

senarius) und B5 (*Actinoptychus senarius*) stellen eine voll vernetzte Diatomeenschale dar. Struktur B6 (*Navicula praetenita*) und B7 (*Fragilariopsis kerguelensis*) sind unterschiedliche Halbschalen länglicher Diatomeen, wobei hier ebenfalls nur die Mantelflächen als Wirkflächen vernetzt sind. B8 (*Actinoptychus senarius*) und B9 (parametrisierte *Actinoptychus senarius*) stellen zusammen die vernetzten Valven⁵ einer Diatomeenschale dar. Bei Struktur B10 (*Asterolampra sp.*) handelt es sich um eine einzelne Valvenhälfte. Die beiden Strukturen B11 (*Asterolampra sp.*) und B12 (*Stephanodiscus sp.*) stellen Valvenhälften dar, wobei hier lediglich die spitzen Extremitäten am Rand der Valven zu Wirkpunkten diskretisiert sind. Sie stellen zwei weitere ähnliche Strukturen dar, die sich von den übrigen Strukturen stark unterscheiden.

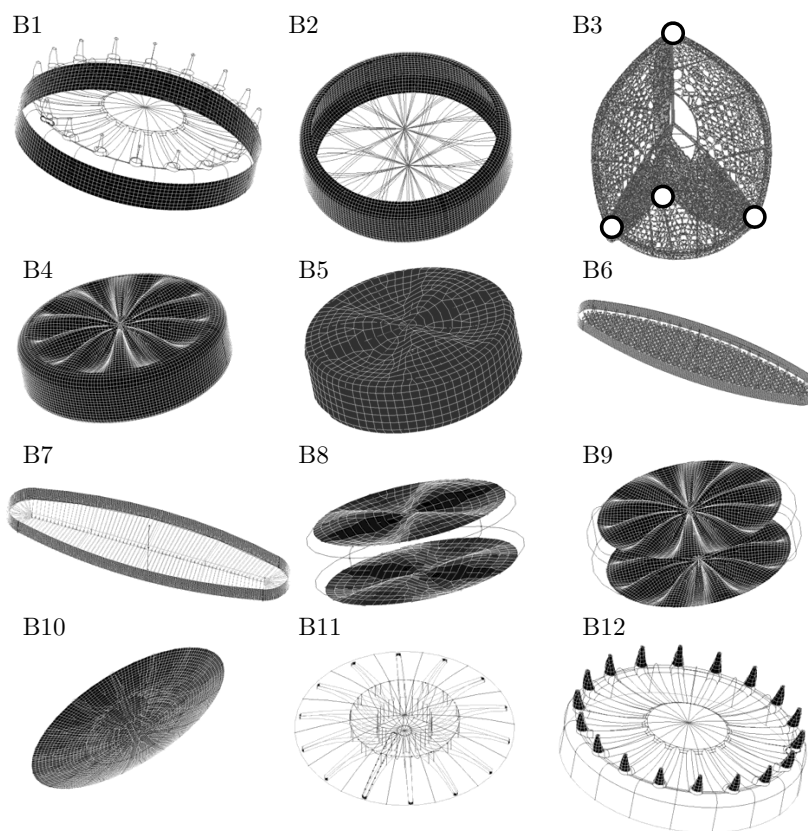


Abb. 5.3: Beispielhafte Strukturen mit vernetzten Wirkflächen und -punkten: B1 und B12 (*Stephanodiscus sp.*); B3 (*Callimitra sp.*); B2, B4, B5, B8 und B9 (*Actinoptychus senarius*); B6 (*Navicula praetenita*); B7 (*Fragilariopsis kerguelensis*); B10 und B11 (*Asterolampra sp.*)

5.2.2 Merkmalstransformation

Es muss sichergestellt werden, dass Strukturgröße und Ausrichtung keinen Einfluss auf die Ähnlichkeitssuche haben. Es ist daher nötig, die Merkmale zu normieren.

Zu den folgenden Überlegungen siehe auch Heczko et al. (Heczko u. a., 2002). Um die Invarianz bezüglich Translation, Rotation und Spiegelung zu erlangen, wird eine modifizierte

⁵„Deckel“ der Diatomeenschale

Karhunen-Loeve-Transformation (KLT) durchgeführt. Diese Transformation ist auch bekannt unter dem Namen Hauptachsentransformation (HAT) und stellt eines der einfachsten Verfahren der echten eigenvektorbasierten PCA⁶, auf Grundlage einer Kovarianzmatrix, über die vermessenen Parameter (hier Koordinaten) dar. Die Menge aller Wirkpunkte und Wirkflächenpunkte $P = \{\vec{p}_1, \dots, \vec{p}_N\}$ eines Modells gehen als Eingabe in die KLT ein, die eine affine Transformation τ ergibt, welche, angewendet auf alle Punkte des Modells, die transformierte Punktmenge $P' = \{\vec{p}'_1, \dots, \vec{p}'_N\}$ produziert. Die Transformation τ muss so konstruiert sein, dass für eine beliebige Verknüpfung σ von Rotation, Translation und Spiegelung die Gleichung:

$$P' = \tau(P) = \tau(\sigma(P)) \quad (5.1)$$

erfüllt und somit die gewünschte Invarianz bezüglich aller Transformationen vom Typ σ gegeben ist.

Somit ergibt sich der Massenschwerpunkt aller Wirkpunkte \vec{c} zu:

$$\vec{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i \quad (5.2)$$

Die Kovarianzmatrix K für die Punktmenge P wird unter Berücksichtigung des Massenschwerpunktes berechnet:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\vec{p}_i - \vec{c}) \cdot (\vec{p}_i - \vec{c})^T \quad (5.3)$$

Nach der Berechnung der (im 3D-Raum) 3×3 Kovarianzmatrix werden deren Eigenwerte und normalisierte Eigenvektoren bestimmt. Die modifizierte KLT, angewendet auf die Punkte des Modells, ergibt sich zu:

$$\vec{p}'_i = E \cdot (\vec{p}_i - \vec{c}), i = 1, \dots, N \quad (5.4)$$

wobei Matrix E die Eigenvektoren beinhaltet, die gemäß der absteigenden Beträge der Eigenwerte sortiert sind. Diese Transformation ist eindeutig bis auf das Vorzeichen der Eigenvektoren. Um diese Ambiguität zu entfernen, setzt man die Vorzeichen der Eigenvektoren $\vec{P}_j = 1, 2, 3$ so, dass:

$$\sum_{i=1}^N \text{sign}(\vec{p}'_{ij}) \cdot (\vec{p}'_{ij})^2 \geq 0, \quad (5.5)$$

wobei die Notation $\vec{p}'_i = (\vec{p}'_{i1}, \vec{p}'_{i2}, \vec{p}'_{i3})$ mit $i = 1, \dots, N$ benutzt wurde. Durch diese Manipulation wird auch erreicht, dass die KLT und die dann daraus abgeleiteten Vektoren invariant bezüglich Spiegelung sind. Eine Normierung der Vektoren \vec{p}'_i erzeugt eine Invarianz bezüglich Skalierung der Daten.

Bei dieser Herangehensweise ergibt sich jedoch das Problem, dass der Schwerpunkt einer Struktur abhängig von der Größe und der Vernetzungsfeinheit der Wirkflächen ist. Für den

⁶Principal Component Analysis, bzw. Hauptkomponentenanalyse

Fall, dass sowohl Wirkpunkte als auch Wirkflächen in derselben Struktur vorhanden sind, werden die einzelnen Wirkpunkte zu wenig gegenüber den Flächen (welche aus vielen Punkten bestehen) gewichtet. Dies hat Einfluss auf die spätere Nächste-Nachbarn-Suche und führt zu Problemen bei der Ähnlichkeitssuche.

Wird eine Struktur untersucht, welche Flächen als Kraftein- und -ausgänge besitzt, diese jedoch ausreichend klein gegenüber der Gesamtstruktur sind, ist es von Vorteil diese Flächen hinsichtlich der Schwerpunktberechnung mit jeweils nur einem Punkt zu diskretisieren. Durch die Verwendung von Punkten als Kraftübergänge in den Eingangsdaten der KLT wird sichergestellt, dass die Schwerpunktsberechnung optimal erfolgen kann und jede Wirkfläche bzw. jeder Wirkpunkt gleichermaßen gewichtet wird. Exemplarisch wird in Abb. 5.4 das Prinzip der Lösung des Gewichtungsproblems anhand eines eindimensionalen Beispiels verdeutlicht. Hierbei sei eine Wirkfläche mit fünf Punkten bei $x = 0$ und ein Wirkpunkt mit nur einem Punkt bei $x = 10$. Würde nun der Schwerpunkt aller Punkte berechnet werden, so würde dieser bei SP1 liegen. Da die Funktion der Tragstruktur jedoch eine Weiterleitung der Kraft von $x = 0$ zu $x = 10$ darstellt, sollte der Schwerpunkt bei $x = 5$ (SP2) sein. Dies wird durch eine Ersetzung der fünf Punkte der Wirkfläche durch einen Wirkpunkt in dessen Schwerpunkt erreicht.

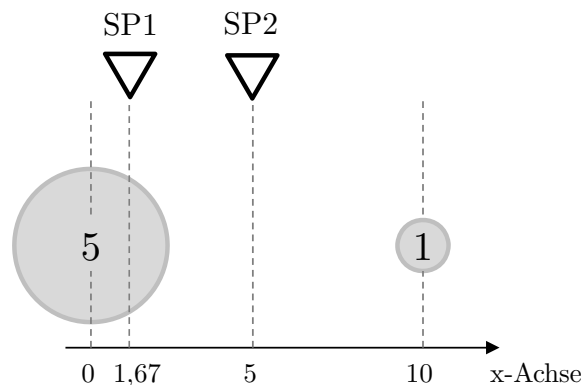


Abb. 5.4: Eindimensionales Prinzip der Lösung des Gewichtungsproblems zwischen Wirkpunkten und -flächen

5.2.3 Clusteranalyse

Für die Reduktion von kleinen Flächen zu einem Punkt bietet sich eine Clusteranalyse an, welche Punkthäufungen erkennen und die jeweiligen Clusterschwerpunkte berechnen kann. Somit kann eine Punkthäufung (wenn ausreichend kompakt gegenüber der Gesamtstruktur) durch den Flächenschwerpunkt ersetzt werden.

Ester, Kriegel, Sander und Xu (Ester u. a., 1996) entwickelten den am häufigsten zitierten Algorithmus in diesem Bereich, den „Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN)“. Dieser ermöglicht die nötige Manipulation der Daten. Der Begriff der „Dichteverbundenheit“ bildet hierbei die Grundidee des Algorithmus. Gibt es Punkte, die eng

beieinander liegen und somit eine Kette von dichten Objekten bilden, so bilden diese einen Cluster. Punkte, die nicht Teil einer Kette sind, werden als „Rauschen“ (Noise) bezeichnet.

Es gibt drei Arten von Punkten in DBSCAN:

- Kernobjekte, welche selbst dicht sind.
- Dichte-erreichbare Objekte. Dies sind Objekte, die zwar von einem Kernobjekt des Clusters erreicht werden können, selbst aber nicht dicht sind. Anschaulich bilden diese den Rand eines Clusters.
- Rauschpunkte, die weder dicht, noch dichte-erreichbar sind.

Im Gegensatz zu anderen Clusteralgorithmen wie beispielsweise dem „K-Means-Algorithmus“ (Lloyd, 1982), muss bei DBSCAN nicht von vornherein bekannt sein wie viele Cluster existieren. Dies prädestiniert DBSCAN für die Implementierung in die funktionale geometrische Ähnlichkeitssuche.

Angewendet auf eine Punktwolke können mit Hilfe des DBSCAN-Algorithmus die Cluster und deren Schwerpunkte bestimmt werden. Wie in Abb. 5.5 dargestellt, wird am Beispiel der Struktur B2 die Mantelfläche als eine zusammenhängende Wirkfläche erkannt. Da es folglich nur einen Clusterschwerpunkt gibt, wird die Struktur nicht verschoben. Bei der Beispielstruktur B3 (rechts) sind die Wirkflächen sehr klein gegenüber der Gesamtstruktur und mit unterschiedlich vielen Punkten diskretisiert. DBSCAN erkennt hier vier Cluster (als Kreise dargestellt). Ist jede der vier Wirkflächen gleichermaßen durch lediglich einen Punkt definiert, kann von diesen Punkten ein neuer Schwerpunkt SP_C bestimmt werden. Der Verschiebungsvektor vom Schwerpunkt SP_{HAT} aus der HAT zum Schwerpunkt aus der Clusteranalyse kann ebenso bestimmt werden. Im Beispiel in Abb. 5.5 (B3) wurde die Wirkfläche ursprünglich aufgrund der unterschiedlichen Punktanzahl auch unterschiedlich gewichtet. Nun wird bei gleicher Gewichtung der vier Wirkflächen das normierte Gebilde (Kreuze) verschoben dargestellt.

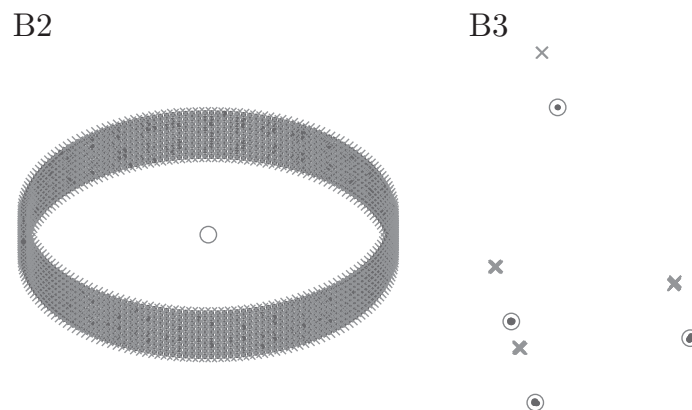


Abb. 5.5: DBSCAN Algorithmus angewendet auf Beispielstruktur B2 (links) und B3 (rechts)

Eine Verschiebung der Punkte aus der HAT um den berechneten Verschiebungsvektor ergibt die gewünschte Normierung der Wirkflächen und Wirkpunkte, welche invariant bezüglich

- Skalierung
- Translation
- Rotation
- Spiegelung
- Vernetzungseinheit von Wirkflächen
- Kombination von Wirkflächen und Wirkpunkten

ist. Mit diesen Daten als Eingangsgrößen kann im Anschluss die eigentliche Ähnlichkeitssuche erfolgen.

5.2.4 Distanz, Similarität und Nächste-Nachbarn

Sind alle Punkte invariant bezüglich Skalierung, Translation, Rotation, Spiegelung, Vernetzungseinheit und Kombination von Wirkflächen und Wirkpunkten, so können verschiedene Strukturen miteinander verglichen werden. Die Grundidee ist hierbei, dass zu jedem Punkt einer ersten Struktur A der jeweils nächste Punkt einer zweiten Struktur B gesucht wird. Berechnet man so die minimalen Abstände eines jeden Punktes aus A zu allen anderen aus B , kann aus den gewonnenen Daten eine Aussage über die funktionale Ähnlichkeit zweier Strukturen abgeleitet werden.

Zur Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Punkte im n -dimensionalen Raum existieren verschiedene Distanz- und Similaritätsmaße. Die einzelnen Verfahren besitzen charakteristische Eigenschaften bezüglich der Abstandsbewertung entlang der Dimensionsachsen und der Metrik. Die Anwendung der Distanzmaße auf alle Punktombinationen zweier Objekte A und B führt zu einer Matrix, welche die Abstände aller Punkte untereinander tabelliert. Diese Matrix dient als Ausgang, um im folgenden Schritt die nächstliegenden Nachbarnpunkte innerhalb der zwei zu vergleichenden Strukturen zu finden. In dieser Arbeit sind vier Maße untersucht worden, die gemeinsame Charakteristiken der Vektorkomponenten unterschiedlich betonen. Im Folgenden gibt d das jeweilige Distanz- oder Ähnlichkeitsmaß an, a ein Element der Punktmenge A und b ein Element der Punktmenge B . Die Indizes i und j referenzieren jeweils einen Punkt aus A/B . Die Dimensionskomponente k (im einfachsten Fall x , y oder z) und n als Anzahl der Dimensionen wurden mit parametrisiert. Dies ermöglicht es, gegebenenfalls Bewertungsparameter mit in die Funktion einfließen zu lassen.

Bray-Curtis-Distanz

$$d_{i,j}^{BCD} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} |a_{i,k} - b_{j,k}|}{\sum_{k=0}^{n-1} (a_{i,k} + b_{j,k})} \quad (5.6)$$

Die nichtmetrische Bray-Curtis-Distanz liefert robuste und zuverlässige Unähnlichkeitsmaße für einen breiten Anwendungsbereich (Bray u. Curtis, 1957). Sie ist eine der am häufigsten

verwendeten Maßeinheiten um Zusammenhänge in Ökologie, Umwelt und den dazugehörigen Themengebieten auszudrücken. Gemeinsame hohe Werte auf einzelnen Achsen haben einen größeren Einfluss auf das Ergebnis als niedrigere und implizieren, dass diese besser zwischen den Objekten unterscheiden.

Canberra-Distanz

$$d_{i,j}^{CAD} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{|a_{i,k} - b_{j,k}|}{|a_{i,k}| + |b_{j,k}|} \quad (5.7)$$

Die metrische Canberra-Distanz wird leicht beeinflusst von Werten rund um den Ursprung und ist besonders sensitiv für Änderungen nahe des Ursprungs, wobei verhältnismäßige Unterschiede stärker gewichtet werden als absolute (Lance u. Williams, 1967). Dies ist besonders mit steigender Dimensionenzahl auffällig. Im Gegenzug ist die Canberra-Distanz unanfälliger als die Manhattan-Distanz für Variablen mit gemeinsamen hohen Werten (Krebs, 1989).

Minkowski-Distanz

$$d_{i,j}^{MKD} = \left(\sum_{k=0}^{n-1} |a_{i,k} - b_{j,k}|^\lambda \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (5.8)$$

Die Minkowski-Distanz (z.B. (Kruskal, 1964)) ist eine generalisierte, metrische Distanzfunktion, die andere Distanzfunktionen als Spezialfälle einschließt. Charakteristisch ist die Repräsentation der absoluten Distanz zwischen Objekten, unabhängig von ihrem Abstand zum Ursprung. Obgleich in der Theorie unendlich viele Minkowski Maße existieren (über den Parameter λ), sind in der Praxis nur wenige von Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit wurden die zwei wichtigsten Maße $\lambda = 1$ bzw. $\lambda = 2$ verwendet.

- Für den Fall $\lambda = 1$ wird die Minkowski-Distanz als Manhattan-Distanz bezeichnet. Alternative Namen sind $L1$ -Norm oder City-Block-Distanz. Die Manhattan-Distanz summiert die absoluten Differenzen der Variablen entlang der einzelnen Raumachsen.
- Für den Fall $\lambda = 2$ wird die entsprechende Distanzfunktion als Euklidische Distanz bezeichnet. Alternative Bezeichnungen sind $L2$ -Norm oder Ruler-Distanz. Die Euklidische Distanz misst den direkten und kürzesten Abstand zwischen zwei Punkten (z.B. Flächen- oder Raundiagonalen).

Skalarproduktwinkel

$$d_{i,j}^{SKA} = \arccos \left(\frac{\sum_{k=0}^{n-1} a_{i,k} \cdot b_{j,k}}{\sqrt{\sum_{k=0}^{n-1} a_{i,k}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{n-1} b_{j,k}^2}} \right) \quad (5.9)$$

Beim Skalarproduktwinkel werden die Koordinaten eines Punktes als Vektor vom Ursprung aus aufgefasst, bzw. nach Translation als Vektor vom Schwerpunkt. Der Winkel zwischen zwei Punkten lässt sich aus dem Skalarprodukt herleiten. Auf diese Weise werden alle Punkte mit einem geringen Winkelunterschied als ähnlich angesehen. Der Betrag des Vektors spielt keine Rolle.

Nächste-Nachbarn

Bei einem Vergleich zweier Punktemengen A und B wird im Allgemeinen eine der Mengen mehr Punkte beinhalten als die andere. Es stellt sich die Frage welche Suchrichtung sinnvoll ist. Angenommen Menge A beinhaltet fünf Punkte und Menge B beinhaltet zehn Punkte. Nimmt man nun die Punkte von A als Referenzpunkte und berechnet pro Punkt aus A den Punkt aus B mit dem jeweils geringsten Abstand (Suchrichtung $A \rightarrow B$), so erhält man fünf minimale Abstände. Wählt man die andere Suchrichtung $B \rightarrow A$, so erhält man dementsprechend zehn minimale Abstände. Es ist ersichtlich, dass die Suchrichtung, ausgehend von der Menge mit vielen Punkten, hin zu der Menge mit weniger Punkten die geeignetere ist. Dies lässt sich erklären, indem man ein Extrembeispiel betrachtet:

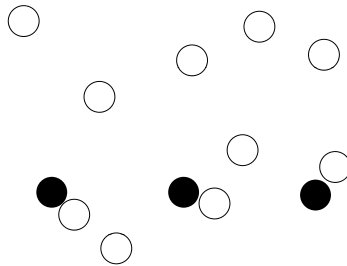


Abb. 5.6: Beispiel zweier Punktemengen C (schwarz) und D (weiß)

Hätte man, wie in Abb. 5.6, eine Punktemenge C , welche aus einer kleinen Anzahl an Punkten besteht und eine Menge D , welche aus einer Vielzahl an Punkten besteht und derart räumlich angeordnet ist, dass einige Punkte gleich lokalisiert sind, wie die Punkte der Menge C , so können bei einer Suchrichtung $C \rightarrow D$ drei minimale Abstände berechnet werden, welche sehr klein sind. Es würde den Schluss zulassen, dass die Menge C der Menge D sehr ähnlich ist, was jedoch aufgrund der vielen Punkte der Menge D , welche nicht in der Nähe von Punkten aus C sind, nicht der Fall sein sollte. Eine Suchrichtung $D \rightarrow C$ ergibt ebenfalls drei sehr geringe Distanzen, jedoch auch sieben größere. Im Mittel errechnet sich eine erwartungsgemäß geringe Übereinstimmung (große Distanzen).

Um eine Ähnlichkeit zweier Punktmengen zu definieren, wird anschließend zur Nächste-Nachbarn-Suche der Mittelwert aller minimalen Abstände gebildet, um einen skalaren Wert zu erhalten. Die Ergebnisse werden in einer diagonalsymmetrischen Ähnlichkeitsmatrix aufgetragen. In Abb. 5.7 ist dies für die Beispielstrukturen B1 bis B12 mit dem euklidischen Distanzmaß dargestellt. Die farbliche Codierung ist vom ähnlichsten (weiß) zum unähnlichsten (dunkelgrau) zu verstehen. Betrachtet man die Struktur B4, so erkennt man, dass ihr Struktur

B5 am funktional ähnlichsten und Struktur B11 am unähnlichsten ist. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist die funktionale Unähnlichkeit der Struktur B3 gegenüber allen anderen Strukturen. Die Ergebnisse, die durch das hier beschriebene Verfahren gewonnen werden, entsprechen den Erwartungen, die ein Entwicklungsingenieur an eine Ähnlichkeitssuche stellt.

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
B2	0,059										
B3	0,408	0,389									
B4	0,235	0,143	0,348								
B5	0,047	0,023	0,355	0,031							
B6	0,221	0,242	0,354	0,199	0,142						
B7	0,208	0,186	0,362	0,195	0,140	0,029					
B8	0,158	0,094	0,343	0,059	0,064	0,192	0,192				
B9	0,318	0,201	0,335	0,045	0,034	0,189	0,192	0,035			
B10	0,198	0,100	0,320	0,141	0,097	0,078	0,073	0,155	0,175		
B11	0,091	0,147	0,439	0,311	0,274	0,259	0,247	0,351	0,390	0,253	
B12	0,043	0,081	0,401	0,233	0,198	0,199	0,185	0,271	0,307	0,174	0,089

Abb. 5.7: Diagonalsymmetrischen Ähnlichkeitsmatrix mit euklidischen Distanzmaß der 12 Beispielstrukturen als Eingangsdaten für eine MDS. Je heller ein Eintrag hinterlegt ist, desto funktional ähnlicher sind die jeweiligen Strukturen

5.2.5 Multidimensionale Skalierung

Die Ergebnisse der Berechnungen der Nächste-Nachbarn-Suchen können visuell mit Hilfe einer Multidimensionalen Skalierung (MDS) aufbereitet werden. MDS ist ein multivariates Verfahren zur Datenordination. Durch Iteration wird aus einer initialen Startkonfiguration versucht, die absoluten oder relativen Lagebeziehungen zwischen den einzelnen Objekten auf Basis ihrer Distanz- oder Ähnlichkeitswerte anzuordnen, ohne dass Vorkenntnisse bezüglich der relativen Lagebeziehung nötig sind. Hierdurch wird ein höherdimensionaler Datenraum möglichst wirklichkeitsgetreu in einem niederdimensionalen abgebildet (Gauch, 1982). Im vorliegenden Fall wird mit der MDS eine zweidimensionale Karte erzeugt⁷. Die Verortung der einzelnen Objekte innerhalb der Karte entspricht dann ihrer gemessenen Ähnlichkeit im höherdimensionalen Raum. Funktional ähnliche Strukturen werden näher beieinander gruppiert und besitzen einen größeren Abstand zu funktional unähnlichen (vgl. dazu Abb. 5.8). Obgleich diese Verfahren stets eine Restfehlerrate durch die Dimensionsreduktion besitzen, zeigen sich im Anwendungsfall plausible und belastbare Ergebnisse. Diese Aufbereitung ermöglicht es Benutzern sehr anschaulich die funktionale Ähnlichkeitssuche zu nutzen. Ein besonderer Vorteil dieser Darstellung ist, dass nicht nur die funktionale Ähnlichkeit von einer Struktur zu anderen dargestellt wird, sondern vielmehr die Ähnlichkeit zwischen allen Strukturen. Somit können Zusammenhänge, Abstammungen und Gruppierungen erkannt werden und sehr effizient biologische Vorbilder zu einer technischen Fragestellung aufgefunden werden.

⁷Umsetzung mittels einer klassischen Multidimensionalen Skalierung in MatLab (CMDSCALE)



Abb. 5.8: Mit Hilfe einer MDS visuell aufbereitete Landkarte funktional ähnlich gruppierter Strukturen, welche mit Hilfe des euklidischen Distanzmaßes berechnet wurden

Wie aus Abb. 5.8 ersichtlich, stellt sich die Radiolarienstruktur B3 (im linken unteren Eck) als funktional unähnlichst gegenüber allen anderen Strukturen dar. Es zeigt sich, dass große inter-gruppenspezifische Unterschiede die Sichtbarkeit von intra-gruppenspezifischen reduzieren, da ähnliche Strukturen auf der Landkarte stärker zusammen rücken. Durch die einfache, visuelle Identifizierung ist es aber möglich, gezielt einzelne Objekte oder Gruppen aus der Analyse auszuschließen. Dies ist in Abb. 5.9 exemplarisch gezeigt, wo die Struktur B3 jeweils aus der Analyse entfernt wurde. Hierdurch erlangen intra-gruppenspezifische Unterschiede eine stärkere Gewichtung und treten deutlicher hervor.

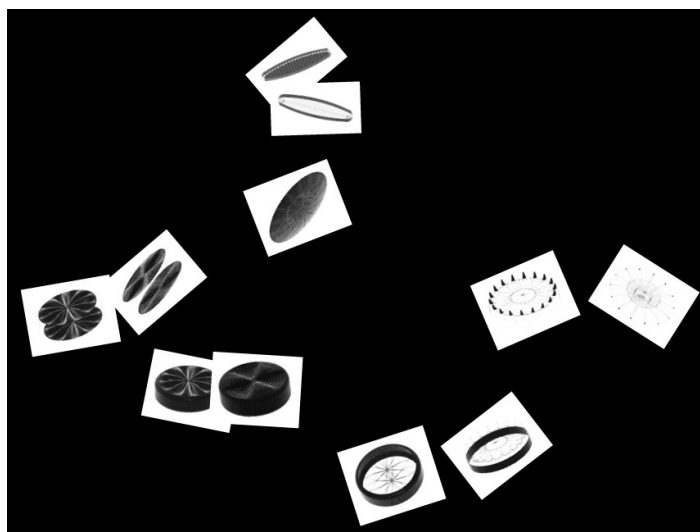


Abb. 5.9: Verbesserte Darstellung der Landkarte mit euklidischem Distanzmaß ohne die Abhängigkeit zu Struktur B3

5.2.6 Diskussion der funktionalen Ähnlichkeitssuche

Im Zuge dieser Arbeit hat sich herausgestellt, dass die Minkowski-Distanz (vgl. Gl. 5.8) mit $\lambda = 1$ (Manhattan-Distanz) und $\lambda = 2$ (Euklidische Distanz) für die funktionale Ähnlichkeitssuche die aussagekräftigsten Ergebnisse liefert. In Abb. 5.10 werden die verbleibenden untersuchten Distanzmaße einander gegenübergestellt. Da der Nenner der Bray-Curtis-Distanz (Gl. 5.6), Canberra-Distanz (Gl. 5.7) und des Skalarproduktwinkels (Gl. 5.9) unter bestimmten Koordinatenkombinationen 0 werden kann, erfordert die Anwendung programmiertechnische Beschränkungen. Neben den hier verwendeten drei Elementen, die die Lage eines Punktes im Koordinatensystem durch die x , y und z Koordinate beschreiben, ist es auch denkbar, weitere Bewertungskriterien und Penalties in den Lagevektor mit hineinzukodieren. Die verwendeten Distanzmaße lassen eine einfache Verlagerung in höherdimensionale Räume zu. Eine mögliche Erweiterung der funktionalen Ähnlichkeitssuche könnte dabei auch applikationsspezifische Distanz- und Ähnlichkeitsmaße einschließen.

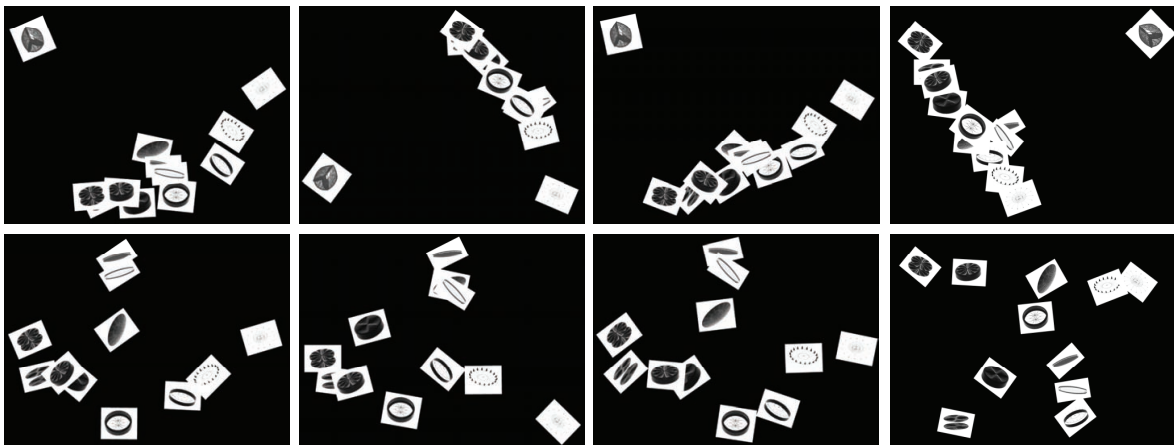


Abb. 5.10: Vergleich der unterschiedlichen Distanzmaße. Erste Zeile mit B3, zweite ohne B3. Von links nach rechts: Bray-Curtis-Distanz, Canberra-Distanz, Manhattan-Distanz, Skalarproduktwinkel

Die Summe der minimalen Abstände aller Punkte wurde in dieser Arbeit durch die Anzahl der Punkte geteilt und somit das arithmetische Mittel aller minimalen Abstände für das Ähnlichkeitsmaß gewählt. Auch hier sind weiterführende statistische Kennwerte denkbar.

5.3 Einfache Strukturbewertung

Im vorherigen Abschnitt wurde das automatische Auffinden eines biologischen Vorbildes passend zu einer technischen Problemstellung ausgeführt. In der Praxis finden sich meist mehrere Strukturen, welche als Vorbild in Frage kommen und die sich folglich in der Landkartendarstellung ähnlich weit entfernt zeigen. Es ist daher notwendig die geeigneten Vorbilder zu bewerten. Für die allgemeine Aussage, ob sich eine Struktur für eine Leichtbaukonstruktion besser eignet als eine andere, sind sehr viele Aspekte zu berücksichtigen. Hierzu gehören u.a.

die Materialwahl, Fertigungsverfahren, Lastfall, Lebensdauer, usw. Eine erste Abschätzung des Leichtbaupotentials einer geometrischen Form für einen technischen Lastfall, kann jedoch mittels dimensionslosen Kennwerten erfolgen. Da die Geometrien der natürlichen Vorbilder meist nicht geschlossen mathematisch beschrieben werden können, werden diese mittels FE hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Für das Verständnis der in diesem Abschnitt folgenden Kennwerte ist es notwendig zunächst verschiedene Versagenshypothesen zu betrachten, die die maximale Belastung eines Bauteils beschreiben.

5.3.1 Versagenshypothesen

Bei der Auslegung eines Bauteils im statischen Fall müssen insbesondere die Sicherheitsnachweise (Sicherheitsfaktoren S) gegen Fließen, Bruch oder Instabilität geführt werden. Diese berechnen sich als notwendige Bedingungen zu

$$\frac{R_{p0,2}}{\sigma_{\text{Berechnet}}} \geq S_{\text{Fließen}} \quad (5.10)$$

$$\frac{R_m}{\sigma_{\text{Berechnet}}} \geq S_{\text{Bruch}} \quad (5.11)$$

$$\frac{\sigma_{\text{Knicken/Beulen}}}{\sigma_{\text{Berechnet}}} \geq S_{\text{Instabilität}} \quad (5.12)$$

Die maximale Zugfestigkeit R_m , welche die maximal aufnehmbare Spannung bezogen auf den Ausgangsquerschnitt darstellt, ist größer als die 0,2% Dehngrenze $R_{p0,2}$, da sie u.a. Verfestigungsmechanismen berücksichtigt. Für linear-elastische FE-Rechnungen reicht es folglich aus ein Bauteil hinsichtlich Fließen und Instabilität auszulegen. Je nach Werkstoff und Lastfall lassen sich verschiedenste Versagenshypothesen aufstellen. Da in dieser Arbeit vorrangig homogene Materialien wie Stahl und Kunststoffe untersucht werden, wird auf die Nennung der vielschichtigen Versagenshypothesen aus dem Faserverbundbereich (wie z.B. Delamination, Faserbruch, usw.) verzichtet. Identische Lastfälle sind notwendige Voraussetzung für einen Strukturvergleich. Wie in Abschnitt 5.1 angedeutet, macht diese Standardisierung nur bei Stab- bzw. Balkenelementen, sowie bei Flächenelementen Sinn. Im Folgenden werden daher neben dem Materialversagen durch Fließen die typischen Versagenshypothesen für Instabilitäten dieser beiden Strukturtypen betrachtet.

Fließen

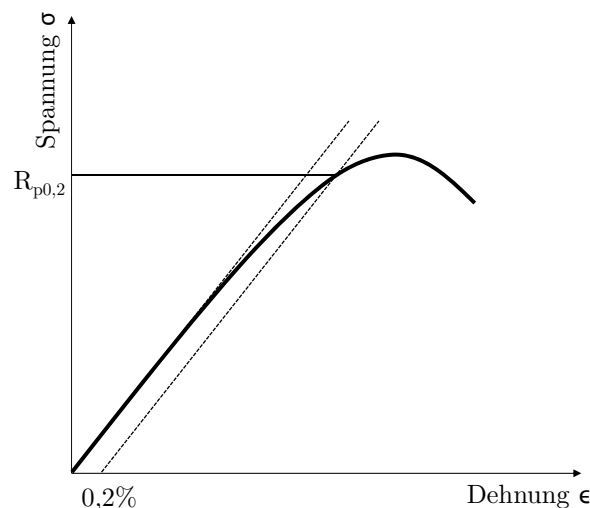
Im linear elastischen Bereich finden die meisten Bauteilauslegungen statt. Innerhalb dieses Bereiches kann das Spannungs-Dehnungsdiagramm mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes durch eine Gerade mit der Steigung E (Elastizitätsmodul) angenähert werden. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung ist folglich reversibel elastisch ($\sigma \propto \epsilon$) und kann mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes beschrieben werden:

Tab. 5.1: Beispielhafte Werte der Fließgrenze verschiedener Werkstoffe

Werkstoff	Fließgrenze $R_{p0,2}$ [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]
1.5714 legierter Stahl	295,59
3.0205 Aluminium	200,00
PA Typ 6	103,65

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (5.13)$$

Ab einer Dehngrenze von 0,2% Referenzdehnung⁸ ($R_{p0,2}$) fängt ein Werkstoff an überproportional zu fließen. Ab diesem Zeitpunkt ist Verformung irreversibel und führt zu einer Schädigung des Bauteils. Wie in Abb. 5.11 erkennbar, ist die Fließgrenze eine bestimmte, werkstoffabhängige Spannung, die zu einer plastischen Verformung von 0,2% führt. Sie wird auch als technische Elastizitätsgrenze bezeichnet. Die Tabelle 5.1 zeigt beispielhafte Werte der Fließgrenze verschiedener Werkstoffe.

**Abb. 5.11:** Spannungs-Dehnungs Diagramm mit $R_{p0,2}$ -Grenze

Das Werkstoffverhalten wird bis unterhalb der Fließgrenze nach dem Hook'schen Gesetz durch einen streng linearen Zusammenhang zwischen wirkender Kraft und resultierender Verformung beschrieben. Die maximale Kraft, mit der ein Bauteil bis zur Fließgrenze belastet werden kann, kann folglich linear berechnet werden. Hierzu wird das Bauteil nach den Vorgaben eingespannt und mit einer Kraft von 1 N belastet. Mittels FEA kann nun die resultierende Vergleichsspannung σ_{1N} berechnet werden.

Mit Hilfe der Materialkennwerte (siehe z.B. Tab. 5.1) kann anschließend die maximale Gesamtlast zu

⁸bzw. genauer ab der Streckgrenze R_{eL}

$$F_G = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{1N}} \cdot 1 \text{ N} \quad (5.14)$$

berechnet werden.

Knicken und Beulen

Bauteile können neben dem Materialversagen (vgl. Abschnitt 5.3.1) bereits früher durch den Verlust der Stabilität bis hin zum schlagartigen und gewaltsamen Versagen ihre Funktion verlieren. Diese Knickversagen treten in erster Linie bei auf Druck beanspruchten Stäben oder Balken auf. Beulen kann bei scheibenförmigen Tragelementen unter Druckbeanspruchung als Instabilität auftreten. Geschlossene mathematische Berechnungen der Knickkraft, wie z.B. beim Eulerknicken, sind bei den komplexen biologischen Modellen nicht möglich. Gleiches gilt für die Beulkraft. Die Berechnung der Knick-/Beulkraft erfolgt daher mithilfe einer sog. Buckling Analyse in einem FE-Programm. Hierzu wird das Tragwerk eingespannt und mit einer Einheitskraft von 1 N belastet. Das Ergebnis der Berechnung sind Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Instabilität}}$ gegen Knicken- und Beulen in den verschiedenen Modi. Der kleinste Faktor ist ausschlaggebend, da er die geringste Knickkraft widerspiegelt. Die maximale Gesamtlast, mit der das Tragwerk belastet werden kann ohne zu knicken/beulen ergibt sich folglich zu

$$F_G = 1 \text{ N} \cdot S_{\text{Instabilität}} \quad (5.15)$$

5.3.2 Kennwerte

Mit Hilfe der in Abschnitt 5.3.1 aufgezeigten Versagenshypothesen und der daraus resultierenden maximalen Spannung bzw. Kraft können verschiedene Theorien zur Bauteilbewertung bezüglich des Leichtbaupotentials betrachtet werden.

Leichtbaukennzahl nach Klein

Eine wichtige Rolle beim Vergleich von Bauteilen spielt der sog. *Leichtbaukennwert (LBK)*. Dieser von Klein definierte Kennwert stellt das Verhältnis zwischen der Gesamtlast F_G (*Ultimate Load*), die eine Konstruktion aufnehmen kann, zur *Eigenlast* F_E der unbelasteten Konstruktion dar (Klein, 2013, S.32ff). Somit ist

$$LBK = \frac{F_G}{F_E} \quad (5.16)$$

Zur Bestimmung der *Ultimate Load* wird bei Biegebeanspruchung das Bauteil pro Lastfall mit einer linear ansteigenden Kraft belastet, bis sich im Tragwerk plastische Verformung einstellt. Dieses Kriterium kann als Versagenskriterium verwendet werden um die maximal aufnehmbare Kraft zu berechnen. Bei Knick- oder Beulproblemen wird dieses Kriterium als Versagenskriterium verwendet. Die Eigenlast berechnet sich aus der Materialdichte, dem

Tab. 5.2: Beispielhafte LBK Zahlenwerte für ein Bauteil unter Zugbeanspruchung nach Klein (2013, S.33)

Werkstoff	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$]	Fließgrenze $R_{p0,2}$ [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	LBK für $L = 1000$ mm
St 52-3 (S 355 JO)	7,85	355	4.609,88
AlCuMg 1 F 38	2,70	240	9.061,05
MgAl 6 Zn	1,74	220	12.888,56
Q StE 460 (S 460 NL)	7,85	460	5.973,37
TiCr 5 Al 3	4,50	700	15.856,84

Bauteilvolumen und der Erdbeschleunigung. Je größer der Zahlenwert des LBK ist, desto besser ist die Struktur (und der Werkstoff) für den Lastfall als Leichtbaukonstruktion geeignet.

Für den Fall, dass eine einfache, geschlossen mathematische Beschreibung eines Tragwerks möglich ist (vgl. Abb. 5.12), kann der LBK direkt berechnet werden. Bei einem reinen Zug-Lastfall ergibt sich dieser aus der Festigkeitsbedingung (plastische Verformung)

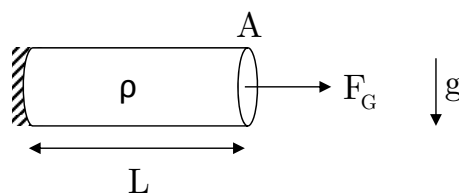
$$\sigma = \frac{F_G}{A} \leq R_{p0,2} \quad (5.17)$$

und der Eigenlast des Zugstabes

$$F_E = \rho \cdot A \cdot L \cdot g. \quad (5.18)$$

Nach Gl. 5.16 folgt daraus

$$LBK = \frac{F_G}{F_E} = \frac{R_{p0,2} \cdot A}{\rho \cdot g \cdot A \cdot L} = \frac{R_{p0,2}}{\rho \cdot g \cdot L} \quad (5.19)$$

**Abb. 5.12:** Einfacher Zug-Lastfall für die geschlossen beschreibbare LBK-Berechnung nach Klein

Typische Werte für einen LBK unter reiner Zugbelastung unter Eigengewicht sind in Tab. 5.2 dargestellt.

Strukturkennwert nach Wiedemann

Wiedemann (2007) beschreibt in seinem Werk „Leichtbau - Elemente und Konstruktion“ eine Vorgehensweise der Bauteiloptimierung über den sog. Strukturkennwert K (auch Beanspruchungsdichte). Der Strukturkennwert definiert sich nach der Aufgabe des Tragwerks; er enthält dessen äußere Belastung und eine für das Tragverhalten maßgebende Länge als vorgegebene

Größen (Wiedemann, 2007, S. 521ff). Demnach dominieren bei einer Leichtbaustruktur mit niedrigem Kennwert eher die Probleme der Steifigkeit, während bei einem hohen Wert vornehmlich Festigkeitsprobleme auftreten. Der für Einzelzweckstrukturen brauchbare Kennwert nutzt Grenzbedingungen, die bauwesenspezifisch zu definieren sind. Wiedemann zeigt, dass Steifigkeits- und Festigkeitsprobleme so umformuliert werden können, dass ein direkter Bezug zwischen dem Gewicht und der Steifigkeit bzw. der Tragfähigkeit hergestellt werden kann. Bei reinen Steifigkeitsproblemen kann somit eine bezogene Gewichtsfunktion (Klein, 2013) angesetzt werden zu

$$f_{G_S} = \frac{G_S}{\rho \cdot g \cdot L^3} = \psi \cdot \left(\frac{K}{E} \right)^n \quad (5.20)$$

bzw. bei reinen Tragfähigkeitsproblemen zu

$$f_{G_T} = \frac{G_T}{\rho \cdot g \cdot L^3} = \psi \cdot \left(\frac{K}{R_e} \right)^n. \quad (5.21)$$

Die Kennwertsdefinition K hängt je nach Bauteil von dessen geometrischen Eigenschaften ab. So kann er beispielsweise für einen Stab mit $K = F/l^2$ definiert werden. Flächige Bauteile unter Druck erhalten nach Wiedemann eine Kennwertsdefinition mit Hilfe Flächendrucks p zu $K = p$. Der Exponent n wird in der Praxis in den Grenzen $1/3 < n < 1$ gewählt. ψ definiert einen Wirk- bzw. Proportionalitätsfaktor (weiterführende Informationen siehe Wiedemann (2007, S. 530)). Geometrisch ähnliche Tragwerke haben bei gleichen Materialkenngrößen einen ähnlichen Strukturkennwert. Diese Ähnlichkeit betrifft die gesamte Bauweise. Mit Hilfe dieses Strukturkennwertes ist es möglich Bauteile zu optimieren und untereinander zu vergleichen.

Der Strukturkennwert eignet sich um Bauteile, welche mathematisch geschlossen beschreibbar sind, zu optimieren und zu vergleichen. Es sind Aussagen über Leichtbaupotential einer Struktur möglich. Bei feststehenden Geometrien, welche nicht geschlossen mathematisch beschrieben werden können, präzisiert sich der Ansatz nach Wiedemann auf einen Maximalspannungsvergleich im elastischen Bereich unter Berücksichtigung des Gewichts der (optimalen) Konstruktion. Er lässt sich folglich für den speziellen Einsatz innerhalb des Wissensspeichers auf den Ansatz von Klein zurückführen.

Effizienztheorie nach Minke

Gernot Minke beschreibt während seiner Mitarbeit im Wirkungsbereich Frei Ottos die Effizienztheorie zum Vergleich verschiedener Tragwerksformen in Bezug auf ihre Tragfähigkeit (Minke, 1970): Bezieht man die maximale Nutzlast P auf das Eigengewicht G des Tragwerks, so erhält man den für eine Wertung gebräuchlichen Quotienten.

$$Q = \frac{P}{G}$$

Q gibt das Vielfache an, das ein Tragwerk im Verhältnis zu seinem Eigengewicht an Nutzlast übertragen kann. Um verschiedene Tragwerksformen und -systeme vergleichen zu können, ist es weiter nötig die „Tragwirkung T “ einzuführen.

$$T = P \cdot w \quad (5.22)$$

Der Faktor w stellt hierbei eine Funktion von der Spannweite L bzw. der Stützweite L dar ($w = f(L)$) und lässt sich als Produkt aus L und der „Kraft“-Konstante „ k “ schreiben. Somit ergibt sich:

$$T = P \cdot k \cdot L \quad (5.23)$$

Der Quotient aus der Tragwirkung T und dem Gewichtsaufwand G gibt die größtmögliche Ausnutzung eines Tragwerks an. Er stellt die auf das Gewicht bezogene Tragwirkung dar und wird als konstruktive Effizienz bzw. als Effizienz t des Tragwerks bezeichnet.

$$t = \frac{T}{G} = \frac{P \cdot k \cdot L}{G} \quad (5.24)$$

Um weiterhin alternative Lösungen von Tragwerksausführungen untereinander vergleichen zu können, ohne dass vorher verschiedene Tragwerke dimensioniert werden müssen, führt Minke die Bruchlast P_B ein. Die maximale Nutzlast P lässt sich aus der Differenz von der Bruchlast P_B und dem Eigengewicht G ausdrücken:

$$P = P_B - G \quad (5.25)$$

Nach Gl. 5.24 und 5.25 folgt für die Effizienz t :

$$t = \frac{(P_B - G) \cdot k \cdot L}{G} \quad (5.26)$$

$$t = \frac{P_B \cdot k \cdot L}{G} - k \cdot L \quad (5.27)$$

Da der Faktor w eine Funktion der Länge L ist, ist es folglich möglich für einen Strukturvergleich verschiedener Bauweisen derselben Länge $L = \text{konst.}$ innerhalb einer bestimmten konstruktiven Aufgabenstellung (Kraftkonstante $k = \text{konst.}$) die Gleichung 5.27 zu verallgemeinern zu:

$$t = \frac{P_B}{G} \quad (5.28)$$

Die Effizienz-Theorie nach Minke lässt sich folglich mit dem Leichtbaukennwert nach Klein (vgl. Abschnitt 5.3.2) vereinbaren. Die Effizienzbetrachtung ermöglicht folglich innerhalb gleicher Randbedingungen (wie der Spannweite L und der Lager- und Kraftbedingungen) einen Strukturvergleich nach der Gleichung 5.28.

Der Bic nach Schaur

Eda Schaur definiert das Verhältnis von Masse zum Produkt aus Bruchkraft und Übertragungstrecke als „Bic“ (Schaur, 1979). Hierzu wird zunächst der sog. „Tra“ (T) definiert, welcher die Fähigkeit eines Objektes zur Übertragung von Kräften beschreibt. Das Produkt Kraft mal Übertragungstrecke, Kraftweg T_V genannt, ist nach Schaur der Maßstab der absoluten Größe einer vorhandenen oder vorgesehenen Kraftübertragung. Für ein Bauteil, welches die Kraft F über die Strecke s überträgt und den Eigengewichtskraftweg T_G besitzt, ist der Tra folglich:

$$T = F \cdot s + T_G \quad (5.29)$$

Der Tra ist folglich die Fähigkeit, bei einer bestimmten Belastungsart die maximale Kraft über die kurz vor dem Bruch gemessene Strecke unter Berücksichtigung der Eigenlast zu übertragen. Der Begriff „leicht“ bezieht sich im technischen Leichtbau auf das Verhältnis von der Masse m des Objektes zu dessen Fähigkeit zur Übertragung von Kräften, also von Masse zum Tra. Dieses Verhältnis nennt Schaur „Bic“.

$$Bic = \frac{m}{T} \quad (5.30)$$

Die Bezeichnung Bic wurde 1964 am Institut für leichte Flächentragwerke (IL) der Universität Stuttgart unter Frei Otto eingeführt. Bei Leichtbaukonstruktionen ist die Masse der Konstruktion im Verhältnis zum Tra klein, folglich ist auch der Bic klein. Der Bic wird ausschließlich auf die Grenzlast (Bruchlast) bezogen, bei der das Objekt zerstört oder plastisch verformt wird. Der Kehrwert des Bic, auch als die Effektivität eff bezeichnet, stellt eine Möglichkeit der Bewertung von Leichtbaukonstruktionen dar:

$$eff = \frac{1}{Bic} = \frac{T}{m} \quad (5.31)$$

Wie zu erkennen ist, stellt die Effektivität eff , ähnlich der Effizienz-Theorie nach Minke und dem Leichtbaukennwert nach Klein einen Kennwert dar, der die Bruchlast in das Verhältnis zum Eigengewicht einer Konstruktion setzt (vgl. dazu Abschnitt 5.3.2). Unter der Voraussetzung gleicher charakteristischer Bauteillängen (s) lässt er sich als Vergleichskennwert zur Bewertung unterschiedlicher Leichtbaukonstruktionen verwenden.

5.4 Umsetzung des Auffindens und Bewertens geeigneter biologischer Vorbilder im Umfeld eines Wissensspeichers

In den vorherigen Abschnitten wurden die Anforderungen und notwendigen Erweiterungen bezüglich des Wissensspeichers festgelegt. Die Umsetzung des Wissensspeichers soll auf Basis eines vorhandenen Datenbanksystems erfolgen, welches für den in Abschnitt 4.1 aufgezeigten Prozess angepasst werden soll. Zur Auswahl eines geeigneten Basissystems werden im Rahmen

dieser Arbeit gängige Datenbanksysteme zur Verwaltung von Informationen aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften untersucht. Hierzu werden CAD Bauteilbibliotheken, Content Management Systeme (CMS), Digital Asset Management Systeme (DAM), Engineering Data Management (EDM), Produktdatenmanagement (PDM), Product Lifecycle Management (PLM) und Produktinformationsmanagement (PIM) Systeme näher betrachtet.

5.4.1 Untersuchungen zum Basissystem

Einsatzgebiet von CAD Bauteilbibliotheken ist das Verbreiten von CAD-Modellen von Kaufteilen von den Herstellern an Kunden. Kunden können so die CAD-Modelle aus einem elektronischen Produktkatalog herunterladen, in ihre Konstruktion einbauen und somit das Kaufteil auf Passgenauigkeit und Einsatzfähigkeit virtuell testen. Anschließend wird das Kaufteil beim Hersteller bestellt. Diese Systeme sind somit in erster Linie Vertriebsmittel für die Bauteilhersteller. Ein Anbieter von Bauteildatenbanken, die CADENAS GmbH, ermöglicht mit ihrer Software PARTsolutions⁹ in Verbindung mit eCATALOGsolutions¹⁰ eine effiziente Lösung in den Bereichen intelligentes Teilemanagement, Teilereduzierung und elektronische Produktkataloge. Diese Software ist speziell auf das Management von CAD Daten ausgelegt und wird mit einem nativen CAD Format ergänzt. Dieses native Format erlaubt es, Bauteile, welche in einem bestimmten Modeller aufgebaut wurden, in ein beliebiges CAD Format umwandeln zu können, ohne dabei Abstriche bei der Parametrisierung machen zu müssen. Das native Format ist aufgebaut in einer Makrodatei, welche beim Exportieren in ein CAD System das Bauteil nach den Vorgaben des CAD Systems neu aufbaut. Weitere Vertreter dieser Gattung von Bauteilbibliotheken sind u.a. Traceparts¹¹ und ClickCAD¹². Um das Potential von CAD Bauteilbibliotheken testen zu können, wird ein Benchmarkmodell einer der Schalenarchitektur der Diatomee *Asterolampra* als parametrisches Modell der Firma CADENAS zugestellt. CADENAS untersucht hierbei die Realisierbarkeit der nativen Modellierung des Modells durch ihren firmeninternen Modeller. Ergebnis dieses Tests ist, dass sich die Geometrie des Benchmarkmodells nicht im nativen Modeller abbilden lässt, da Freiflächen, wie sie in den meisten Diatomeenstrukturen zu finden sind, schlecht bis gar nicht konstruiert werden können. Somit ist der Vorteil dieser Softwaregattung - das native CAD Format - für die Anforderung dieser Arbeit nicht geeignet. Ein Kompromiss könnte die Verwendung von nicht nativen CAD Formaten sein, welche beispielsweise von Traceparts importiert werden können. Dies hätte jedoch die Folge, dass das eigentliche Einsatzgebiet der Softwaregattung gänzlich außer Acht gelassen wird und nur die Katalogfunktion genutzt werden würde.

Mit Hilfe eines CMS werden Inhalte von beispielsweise Webseiten gemeinschaftlich erstellt und bearbeitet. Ebenso ist es aber möglich Multimediadateien und Dokumente zu organisieren und webbasiert zugänglich zu machen. Erweiternde Module zu einem CMS können beispielswei-

⁹<http://partsolutions.com> (Abruf 11.08.2014)

¹⁰<http://www.cadenas.de/elektronischer-produktkatalog/motivation> (Abruf 11.08.2014)

¹¹<http://www.traceparts.com/de> (Abruf 11.08.2014)

¹²<http://www.cadclick.com> (Abruf 11.08.2014)

se Shopsysteme sein, welche Produkte eines Benutzers in einem Onlineshop verfügbar machen. Ein derartiges System ist beispielsweise Typo3¹³. Weitere Vertreter dieser Gattung sind u.a. das CMS Joomla¹⁴ in Verbindung mit dem Shopmodul VirtueMart und das eigenständige Shopsystem osCommerce. Im Rahmen dieser Arbeit wird das CMS Joomla in Verbindung mit VirtueMart, sowie Typo3 und osCommerce aufgesetzt und unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Abschnitt 5.1 getestet. CMS Systeme haben generell den Vorteil, dass sie weitestgehend als „open source“ Lizenzen vorliegen und folglich sehr einfach meist mittels PHP Programmierung angepasst werden können. Ein Nachteil ist jedoch, dass sie nicht für CAD und FEA Dokumente ausgelegt sind und somit nur mit aufwändiger Änderung des Quellcodes eine Implementierung von CAD und FEA möglich ist. Auch die Verbindung einzelner Dokumente untereinander ist eingeschränkt. So können Ähnlichkeitseigenschaften, Berechnungen usw. nur unsauber abgebildet werden.

Einsatzgebiete von DAM Systemen sind hauptsächlich große Mediadatenbanken, welche Import und Exportfunktionen, Konvertierungen, Anzeigen und Sichten von Bildern, Dokumenten und Videodateien ermöglichen. Um eine effiziente Recherche zu ermöglichen, wird auf die Verwendung von beschreibenden Metadaten, Versionshinweisen und Archivfunktionen Wert gelegt. Bei DAM Systemen gibt es zwei unterschiedliche Arten der Strukturierung der Assets¹⁵. Entweder werden hierarchische Baumstrukturen verwendet oder es werden freie Verknüpfungen über beschreibende Eigenschaften der Assets angestrebt. Eine Baumstruktur, wie sie auch bei den meisten Bauteilbibliotheken zum Einsatz kommt, ermöglicht eine sehr übersichtliche Struktur der einzelnen Assets. Ein Asset, welchem beispielsweise die Eigenschaften „eckig“ und zugleich „flächig“ zugewiesen werden können, müsste bei einer Baumstruktur doppelt verknüpft oder dupliziert werden. Dem gegenüber erlaubt eine freie Strukturierung der Assets über die Metadaten eine flexiblere Struktur und ist bei Assets mit sehr unterschiedlichem Inhalt effizienter, da mehrere Metadaten zu einem Asset automatisch eine logische Struktur ergeben. Vertreter dieser Gattung von Software ist u.a. das DAM ResourceSpace¹⁶ und das DAM Razuna¹⁷, welche beide mit einer „open source“ Lizenz verfügbar sind. Als kommerzieller Vertreter von DAM Systemen ist beispielsweise Cumulus der Firma Canto GmbH¹⁸ zu nennen.

Engineering Data Management (EDM) bezeichnet die Erstellung, Organisation und Kontrolle von Informationen, die nötig sind, um ein Produkt zu entwerfen, zu verkaufen, herzustellen und zu pflegen während des gesamten Produktlebenszyklus. Hierzu gehören u.a. Stücklisten, CAD-Modell, Bilddaten, Projekt- und Arbeitspläne. Eine ähnliche Begrifflichkeit ist das sog. Produktdatenmanagement (PDM). Für Software, welche insbesondere den Lebenszyklus eines Produktes unterstützt hat sich der Begriff Product Lifecycle Management (PLM) eingebürgert, wobei die Übergänge von einem System zum nächsten aufgrund der hohen Anpassbarkeit der

¹³<http://www.typo3.org> (Abruf 11.08.2014)

¹⁴<http://www.joomla.org> (Abruf 11.08.2014)

¹⁵Ein Objekt, welches in einem DAM System abgelegt ist, z.B. bestehend aus Dateien und beschreibenden Metadaten

¹⁶<http://www.resourcespace.org> (Abruf 11.08.2014)

¹⁷<http://www.razuna.org> (Abruf 11.08.2014)

¹⁸<http://www.canto.com> (Abruf 11.08.2014)

Produkte fließend sind. Die PLM Lösung Teamcenter¹⁹ von Siemens ist hierbei das weltweit am häufigsten eingesetzte System. Dieses System stellt ein höchst umfangreiches und universelles Wissens- und Datenmanagementsystem dar. Teamcenter eignet sich insbesondere für CAD Bauteilverwaltung, Versionskontrolle und -historie, Zusammenbauten mit dazugehörigen Anleitungen, Workflowprozesse mit mehreren Personen und Baugruppenanalysen. Ein ähnlicher Ansatz wie Teamcenter bietet die kostenlose²⁰ und webbasierte PLM Lösung Aras Innovator²¹. Der open source Vertreter der PLM Systeme Aras Innovator lässt im Gegensatz zum kommerziellen Teamcenter eine sehr einfache Anpassung an benutzerspezifische Prozesse zu, wobei von Haus aus weniger Funktionen implementiert sind. Der Schwerpunkt des PLM Systems liegt im Bereich Projektmanagement, Arbeitsablauf und Prozessoptimierung von Produktlebenszyklen und weniger im Bereich Bauteilvisualisierung und Beschreibung. PDM Systeme sind meist nur als kommerzielle Produkte verfügbar, wohingegen PIM Systeme (wie beispielsweise PIMCore) auch in frei verfügbaren Lizenzen auf dem Markt erhältlich sind, jedoch dann in ihrem Funktionsumfang sehr eingeschränkt sind. EDM, PLM, PDM und PIM sind als webbasierte Lösungen zu finden und folglich in dieser Kategorie gleichermaßen geeignet.

Ziel von Produktinformationsmanagement (PIM) Systemen ist es eine zentrale Verwaltung und Pflege von Produktinformationen für den Einsatz in verschiedenen Ausgabemedien. Beispielhaft ist die gemeinsame Verwaltung von Produktbeschreibung, Preisangabe, Größe und Gewicht. Eine Spezialform eines PIM Systems ist das Media Asset Management (MAM) System, welches in erster Linie multimediale Objekte wie Bilder, Grafiken und Präsentationen verwaltet. Exemplarischer Vertreter von PIM Systemen ist Hybris²². Innerhalb von Hybris wird die Medienverwaltung (PDF-Dateien, Bilder, etc.) wiederum in einem DAM-Modul abgebildet.

Die verschiedenen Gattungen von Software können anhand der Anforderungen aus Abschnitt 5.1 verglichen und bewertet werden. Bei der folgenden Bewertung werden die sechs Softwaregattungen in jeder Kategorie miteinander verglichen. Ist eine Umsetzung nicht oder nur mit großem Aufwand möglich, so ergibt dies eine Wertung von „-1“ in der jeweiligen Kategorie. Ist eine Umsetzung prinzipiell und mit adäquatem Aufwand möglich, so ergibt sich eine Wertung von „0“. Ist eine Umsetzung im System bereits integriert oder sehr leicht zu realisieren, so wird eine Wertung von „+1“ vergeben. Die einzelnen Kategorien werden als gleichermaßen wichtig angenommen, weshalb die Punkte pro Kategorie zu einer Gesamtwertung addiert werden können. Die Systeme PDM PLM wurden aufgrund ihrer Verwandtschaft unter EDM zusammengefasst.

Die CAD Integration besticht bei EDM und CAD Bibliotheken, da diese Systeme weitestgehend auf diesen Einsatz hin entwickelt sind. Bei DAM, CMS sowie bei PIM Systemen ist eine

¹⁹http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/teamcenter/?stc=deiaa400107 (Abruf 11.08.2014)

²⁰Open source Basissystem mit kostenpflichtiger Wartung, Updates und benutzerspezifischen Anpassungen

²¹<http://www.aras.com/de> (Abruf 11.08.2014)

²²<http://www.hybris.com/de> (Abruf 11.08.2014), weitere Vertreter siehe <http://www.pim-verzeichnis.de> (Abruf 11.08.2014)

Integration von nicht nativen Formaten wie beispielsweise IGES oder STEP mit wenig Aufwand möglich. Die Integration von FEA ist bei keinem der Systeme von Haus aus vorgesehen, jedoch mit etwas Aufwand realisierbar. Die Verwendung von Metadaten ist bei allen Systemen vorgesehen. Da CMS Systeme in Verbindung mit Shopmodulen eigentlich für den Verkauf von Produkten ausgelegt sind, ist die Realisierung von frei definierten Suchen nur aufwändig umsetzbar. Das Augenmerk wird hierbei eher auf Preissuchen und Produkttitelsuchen gelegt.

Tab. 5.3: Vergleich der Softwaregattungen zur Umsetzung des Basissystems

	CAD Bib.	CMS	DAM	EDM	PIM
Open Source	-1	+1	+1	0	0
Webbasiert	+1	+1	+1	+1	+1
CAD Integration	+1	0	0	+1	-1
FEA Integration	-1	0	0	0	-1
Metadaten	+1	+1	+1	+1	+1
Integration der funktionalen Ähnlichkeitssuche	+1	-1	0	0	0
	2	2	3	3	0

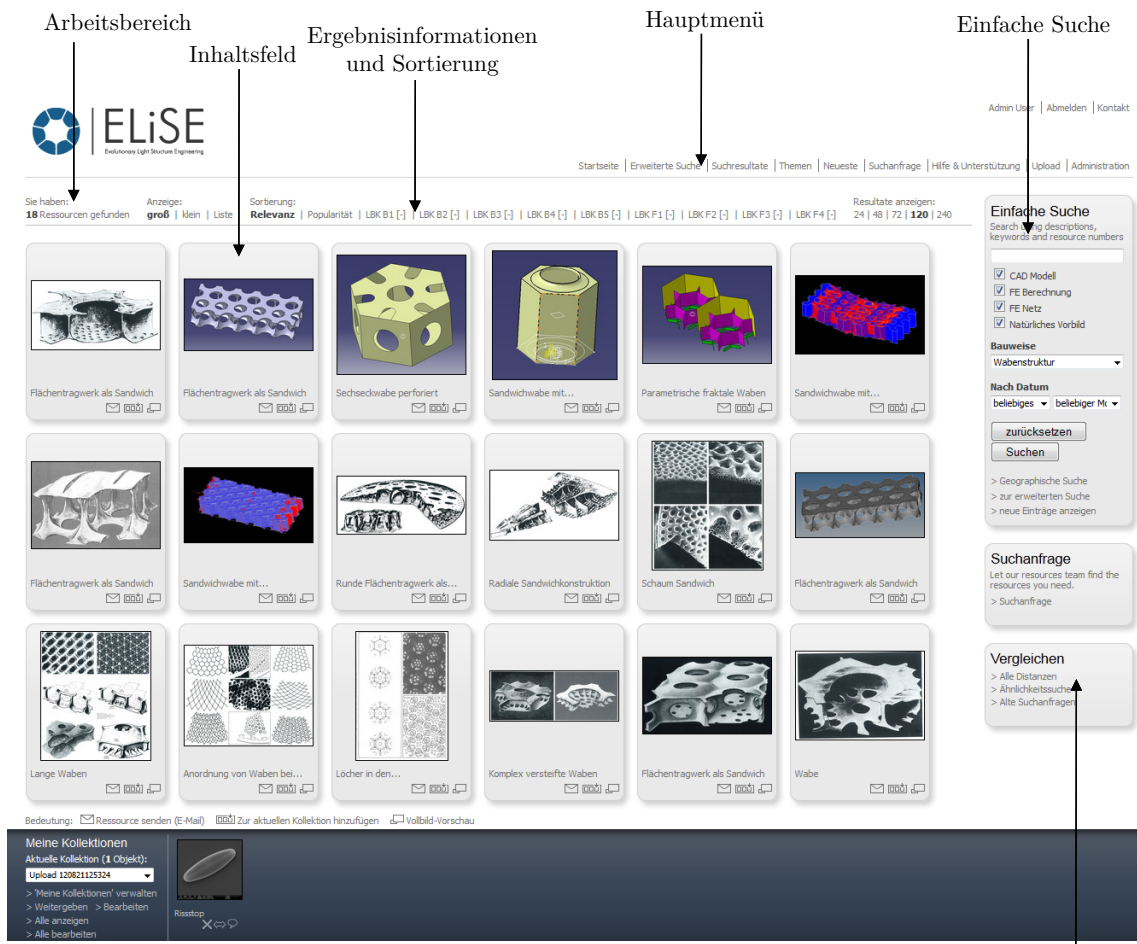
Aufgrund der Ergebnisse aus Tabelle 5.3 sind EDM Systeme und DAM Systeme für die Umsetzung des Wissensspeichers gleichermaßen geeignet. Da beim DAM System die CAD-Integration mit adäquatem Aufwand möglich ist, EDM Systeme jedoch nur bedingt frei verfügbar sind, wird beim Vergleich der beiden Softwaregattungen der Punkt „Open Source“ als gewichtiger gegenüber dem Punkt „CAD Integration“ angesehen. Unter dieser Annahme, wird ein DAM System als Basis für den Aufbau des Wissensspeichers verwendet. Aufgrund des offenen Quellcodes, der geeigneten Metadatenstruktur, sowie der Möglichkeit Plugins zu schreiben, wird in dieser Arbeit ResourceSpace²³ als Basissystem gewählt.

5.4.2 Umsetzung des Wissensspeichers auf Basis eines DAM Systems

Nach dem erfolgreichen Login, welcher über das LDAP-Protokoll gepflegt werden kann, gelangt der Anwender auf eine benutzerorientierte Oberfläche, die ihn bei der Suche, Organisation und Zugang zu neuartigen Leichtbaulösungen unterstützt (siehe Abb. 5.13). Die Arbeitsumgebung des Wissensspeichers ist intuitiv gestaltet, um Zugang zu allen Tools und Funktionen des Systems zu erhalten. Der Arbeitsbereich besteht aus dem Hauptmenü, welches Zugriff zu allen Bereichen sowie auch zu den administrativen Optionen des Wissensspeichers ermöglicht. Der Inhalt des Arbeitsbereiches ändert sich je nachdem was aktuell bearbeitet wird. Zum Beispiel ändert er sich um die Ergebnisse einer Suche anzuzeigen, um Details zu einem

²³<http://www.resourcespace.org> (Abfruf 29.10.2012)

Inhalt darzustellen oder um Suchanfragen zu verfassen. Die sog. „einfache Suche“ ermöglicht ein schnelles Auffinden von Inhalten mit Integration der wichtigsten Suchwerkzeuge wie Informationstyp, Bauweise und Lastfall. Ebenfalls ist der Zugang zur erweiterten Suche hierüber erreichbar. Die in Abschnitt 5.2 beschriebene funktionale Ähnlichkeitssuche ist über einen eigenen Bereich auf der rechten Seite der Oberfläche zugänglich.



Funktionale Ähnlichkeitssuche

Abb. 5.13: Arbeitsumgebung der Leichtbaudatenbank

5.4.3 Ressourcentypen

Der grundsätzliche Aufbau des Wissensspeichers besteht aus vier verschiedenen Informationstypen, sog. Ressourcen. Hierunter fallen die für einen Ingenieur notwendigen Informationstypen für die Ausarbeitung eines Leichtbaukonzepts: Das biologische Vorbild anhand mikroskopischer Aufnahmen oder Prinzipskizzen, CAD-Daten, Netzdateien für FE-Berechnungen, Ergebnisse von FEA für ein tieferes Strukturverständnis und den Vergleich von Strukturen untereinander. Um eine Vergleichbarkeit der Strukturen innerhalb des Wissensspeichers zu gewährleisten, sind die Strukturen verschiedenen Kategorien zugewiesen. Je nach geometrischer Ausführung wird zwischen Balkentragwerken, Flächentragwerken und Volumenbauteilen unterschieden. Die

geometrischen Eigenschaften sind (mit Ausnahme der Volumenbauteile) normiert. So werden Balkentragwerke, falls möglich, in einer Einheitslänge von 1000 mm und einer maximalen Breite/Höhe von 100 mm konstruiert. Flächentragwerke werden mit einer Kantenlänge von 1000 mm ausgeführt. Mit Hilfe dieser Normierung ist ein besserer Vergleich der zum Teil sehr unterschiedlichen Bauteile möglich. Jede Ressource erhält allgemeine Metadaten, die dann je nach Art der Ressource spezifisch ergänzt werden. Diese allgemeinen, beschreibenden Metadaten ermöglichen eine Schlagwortsuche und stellen sich zusammen aus:

- Titel
- Beschreibung
- Strukturtyp (Großstruktur oder Unterstruktur)
- Bauweise (z.B. Sandwich, Balkentragwerk, Flächentragwerk, Wabenstruktur, Standfuß, Rohrkonstruktion, Kantenversteifung)
- Anwendungsbeispiele
- Geometrische Form (unterteilt in 2D (streifenförmig, Dreieck, Viereck, Kreis, usw.) und 3D (Ellipsoid, Kugel, Würfel, Tetraeder, Kegel, usw.))
- Design (eckig, Freiform, geschwungene Flächen, doppelt gewölbte Flächen, symmetrisch, runde Elemente, organische Form, technische Form, usw.)
- Anzahl der fraktalen Ebenen
- Schlüsselworte

CAD Modell

CAD-Modelle werden grundsätzlich im VRML (*.wrl) Dateiformat angeboten, um eine dreidimensionale Vorschau innerhalb des Wissensspeichers zu ermöglichen. Die originalen CAD Daten werden im jeweiligen nativen Format (CATIA V5) abgelegt. Zudem finden sich die Austauschdatenformate STEP und IGES als universell einsetzbare Dateien wieder. Aufgrund der Anforderungen in Abschnitt 5.1 stellt diese Hybrid-Lösung aus nativen und Austauschformaten die optimale Umsetzung der Anforderungen dar, da makrogestützte multi-CAD Daten aufgrund der Komplexität der biologischen Vorbilder nicht realisierbar sind. Die Ressource CAD Modell wird mit einem Satz an Metadaten ergänzt:

- CAD System
- Anzahl der Parameter
- Konstruktionsweise (Flächenmodell oder Volumenmodell)
- Kommentar

FE Berechnungen

Der Wissensspeicher beinhaltet zu jeder Konstruktion verschiedene FE-Berechnungen. Mit Hilfe der Ergebnisse, die durch eine virtuelle Belastung der Bauteile gewonnen wurde, ist es möglich verschiedene Konstruktionen untereinander zu vergleichen, um so die beste Struktur für den jeweils benötigten Problemfall zu finden. Elemente, welche einer Leichtbaustruktur

Tab. 5.4: Standardlastfälle für Stab- und Balkentragwerke

Lastfall	Beschreibung
LC B1	Einseitig fest eingespannt - Biegekraft am freien Ende
LC B2	Beidseitig gelenkig gelagert - Biegekraft in der Mitte
LC B3	Einseitig fest eingespannt - Druckkraft am freien Ende
LC B4	Beidseitig gelenkig gelagert - Druckkraft an beiden Enden
LC B5	Beidseitig gelenkig gelagert - Flächenlast
LC B6	Einseitig fest eingespannt - Torsionskraft am freien Ende

Tab. 5.5: Standardlastfälle für Flächentragwerke

Lastfall	Beschreibung
LC F1	Zweiseitig gelenkig gelagert. Linienlast in der Mitte
LC F2	Zweiseitig gelenkig gelagert. Flächenlast
LC F3	Zweiseitig gelenkig gelagert. Druckkraft orthogonal zu den Lagern
LC F4	Zweiseitig gelenkig gelagert. Druckkraft parallel zu den Lagern

zugrunde liegen, können hierzu grundsätzlich anhand ihrer mechanischen Funktion klassifiziert werden. Neben Zuelementen stellen Druckelemente (Stäbe, Profile und Platten), Biegeträger und Torsionselemente die wichtigsten Strukturen dar. Demensprechend werden im Folgenden Lastfälle identifiziert, welche die Elemente möglichst repräsentativ in ihrer jeweiligen Leistungsfähigkeit beschreiben. Die FE-Berechnungen sind als NASTRAN Decks hinterlegt. Strukturen, die als Stab- bzw. Balken auffassbar sind, werden mit sechs verschiedenen Standardlastfällen (siehe Tab. 5.4 bzw. Abb. 5.14) belastet. Strukturen, die als Flächen ausgeführt sind, werden mit weiteren vier verschiedenen Standardlastfällen (siehe Tab. 5.5 bzw. Abb. 5.15) belastet.

Volumenbauteile können sehr unterschiedlich ausgeführt sein. Daher ist es schwer möglich Standardlastfälle zu definieren. Der Wissensspeicher stellt daher für jedes Volumenbauteil eigene geeignete Lastfälle bereit, die der Bestimmung der Struktur am besten angepasst sind. Die genaue Beschreibung der Lastfälle ist jeweils in den Ressourcendaten hinterlegt. Beim Vergleich von mehreren Volumenbauteilen über den Leichtbaukennwert muss daher darauf geachtet werden, dass den Berechnungen derselbe Lastfall zugrunde liegt.

Wie in Abb. 5.16 exemplarisch anhand eines Balkentragwerks dargestellt, ist zu jeder Ressource neben dem FE-Deck (welches die verschiedenen Lastfälle und Ergebnisse enthält) die Spannungsverteilung für jeden Lastfall als Bilddatei darstellbar. Neben den Lastfällen, deren Ergebnisse einen späteren Vergleich über den Leichtbaukennwert LBK (vgl. Abschnitt 5.3.2) ermöglichen, werden die FE Berechnungen mit den in Tabelle 5.6 aufgeführten beschreibenden Daten hinterlegt.

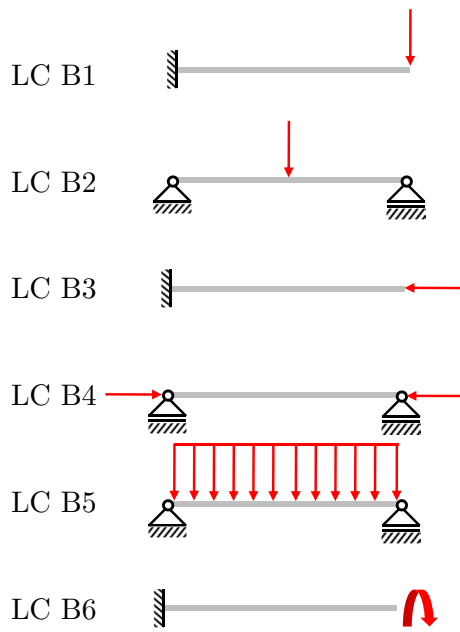


Abb. 5.14: Übersicht der Lastfälle für Balkentragwerke

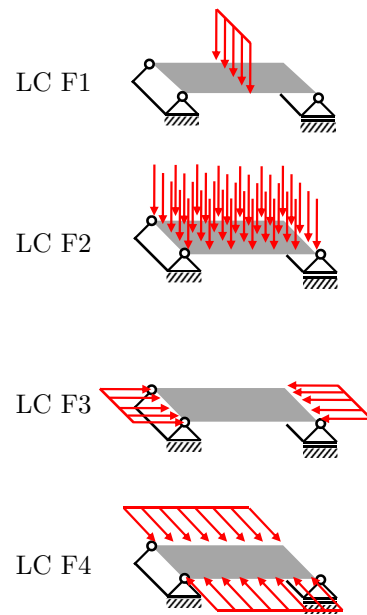
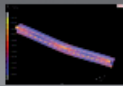
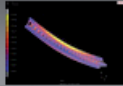
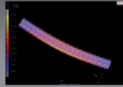
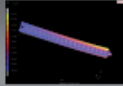



Abb. 5.15: Übersicht der Lastfälle für Flächentragwerke

Tab. 5.6: Metadaten des Ressourcentyps FE Berechnung

Meta Daten	Einheit
Länge, Höhe und Breite	mm
Volumen	mm ³
Material	Text
Dichte ρ	kg/mm ³
E-Modul E	N/mm ²
Querkontraktionszahl ν	-
$R_{p0,2}$ Fließgrenze	N/mm ²
Alle LBK	-

Ressourcen-Werkzeuge

Datei-Information	Dateigröße	Optionen
Original BDF Datei	1.9 MB	Download
Alternative Dateien		
 LC B2 Image	92 KB	Download
 LC B5 Image	17 KB	Download
 LC B4 Image	16 KB	Download
 LC B1 Image	15 KB	Download
 LC B3 Image	15 KB	Download

[> Zur Kollektion hinzufügen](#) > [Ressource senden \(E-Mail\)](#) > [Link](#)
[> Bearbeiten](#) > [Löschen](#) > [Alternative Dateien verwalten](#)
[> Protokoll](#)

Wie bewerten Sie diese Ressource?
★★★★★
0 Bewertungen

Abb. 5.16: FE Berechnung als Ressource innerhalb des Wissensspeichers

FE Netz

Es ist mit den in Abschnitt 5.4.3 definierten Standardlastfällen nicht möglich alle potentiell vorstellbaren Lastfallkombinationen abzudecken. Daher ist es sinnvoll neben den FE-Ergebnissen auch die reinen vernetzten Bauteile ohne Materialien, Randbedingungen etc. bereitzustellen. Ebenfalls ist es mit diesem Ressourcentyp möglich, 3D-Scans der biologischen Vorbilder zu ar-

chivieren (vgl. Abschnitt 6.2.1). In der Datenpflege bedeutet dies keinen großen Mehraufwand, da der Vernetzungsschritt immer vor den FE-Berechnungen stattfindet. Die Netze werden innerhalb des Wissensspeichers als Knoten und Elemente im NASTRAN Format bereitgestellt, da dieses von allen gängigen FE Preprozessoren gelesen bzw. importiert werden kann. Als Zusatzinformation wird zu jedem Netz ein Satz an Metadaten hinterlegt: Anzahl der Knoten, Anzahl der Elemente und Typen der Elemente.

Natürliches Vorbild

Die biologischen Vorbilder sind als Grafiken in gängigen Datenformaten hinterlegt. Insbesondere REM-Aufnahmen eignen sich dazu die feinen Details (z.T. wenige Nanometer) der biologischen Strukturen aufzulösen (siehe Abb. 5.17). Neben den mikroskopischen Aufnahmen können aber auch Prinzipskizzen und Zeichnungen aus gängiger Literatur (z.B. Round u. a. (1990)) nützlich sein. Der Ressourcentyp der natürlichen Vorbilder kann dazu genutzt werden, mit Hilfe von beschreibenden Materialien wie Folien, PDFs und dergleichen die Konstruktionsprinzipien der Natur aufzuzeigen. Metadaten werden bei diesem Ressourcentyp zur Planktonart (z.B. Kieselalgen, Radiolarien, etc.), Taxonomie und der Quelle des Bildes angelegt.



Abb. 5.17: Beispielaufnahme (Skizzen und REM) verschiedener natürlicher Vorbilder innerhalb des Wissensspeichers

5.4.4 Suche nach Ressourcen

Das Fenster der einfachen Suche erscheint auf jeder Seite am rechten Bildschirmrand und ermöglicht so Zugriff auf die Suchmaschine der Leichtbaudatenbank. Das Fenster besitzt ein Textfeld für eine schnelle Freitextsuche über alle Inhalte, sowie weitere Suchoptionen wie beispielsweise Bauweisen.

The screenshot shows a search interface with the following elements:

- Einfache Suche**: Search using descriptions, keywords and resource numbers.
- Input field: For entering types, descriptions, etc.
- Content types:
 - CAD Modell
 - FE Berechnung
 - FE Netz
 - Natürliches Vorbild
- Bauweise**: Search by construction type (e.g., Balkentragwerk).
- Nach Datum**: Filter by date (e.g., beliebiges, beliebiger Monat).
- Buttons: zurücksetzen, Suchen.
- Links: > Geographische Suche, > zur erweiterten Suche, > neue Einträge anzeigen.

Abb. 5.18: Einfache Suche nach Inhalten

Die Inhalte des Wissensspeichers sind global kategorisiert und die Suchalgorithmen darauf ausgelegt alle Informationen zu jedem Inhalt der Datenbank zu durchsuchen. Es ist möglich ein einziges oder auch mehrere Suchwörter parallel einzugeben, um nach Inhalten zu suchen. Die Suche vergleicht daraufhin alle Suchwörter mit den Inhalten der Datenbank und zeigt die Ergebnisse an. Die Suche kann eingegrenzt werden, indem weitere Optionen ausgewählt werden. Zum Beispiel würde eine Suche nach „Balken“ über 200 Inhalte finden. Wenn jedoch nach „Balken“, dem Inhaltstyp „CAD“ und gleichzeitig nach einem spezifischen Lastfall gesucht wird, findet die Datenbank evtl. nur noch 10 Ressourcen. Wenn innerhalb des Wissensspeichers keine Inhalte zu den Suchkriterien gefunden werden, werden automatisch alternative Suchwörter vorgeschlagen.

Die erweiterte Suche erlaubt dem Anwender über alle spezifischen Kategorien und Informationen (wie sie in Abschnitt 5.4.3 beschrieben wurden) zu suchen, die zu jeder einzelnen Ressource hinterlegt sind. Das Suchformular beinhaltet alle Optionen der einfachen Suche und weitere Einschränkungsmöglichkeiten, wie z.B. Anwendungsbeispiele, Geometrische Formeigenschaften, Design, CAD-System, Parameteranzahl, Werkstoff, Gewicht, etc. Mit Hilfe der erweiterten Suche ist es möglich sehr genaue Suchanfragen zu starten um ausschließlich diejenigen Konstruktionen anzuzeigen, die exakt auf die jeweilige Problemstellung zutreffen. Es kann z.B. nach Konstruktionen gesucht werden, die für einen ganz bestimmten Lastfall aus einem bestimmten Material optimal sind. Sollten Suchoptionen nicht ausgefüllt oder nicht angeklickt sein, so werden alle Suchkriterien dieser Option gefunden. Falls der Anwender z.B. keine geometrische Grundform aus der Baumstruktur ausgewählt hat, geht die Suche davon aus, dass die geometrische Form irrelevant ist und findet alle Formen, die zu den übrigen

Suchkriterien passen. Diese intelligente Art der Suche ermöglicht ein effizientes Auffinden von Inhalten ohne umständliches An- und Abwählen von Optionen.

Die funktionale Ähnlichkeitssuche, welche im Detail in Abschnitt 5.2 beschrieben wurde, wird neben der Metadaten-Suche ebenfalls in den Wissensspeicher integriert. Hierzu ist es notwendig zu jeder Ressource, welche mittels funktionaler Ähnlichkeitssuche aufgefunden werden soll, die Wirkflächen bzw. -punkte anzulegen. Da innerhalb der Datenbank alle Ressourcen zu einer Leichtbaukonstruktion miteinander verwandt sind, macht es Sinn die Wirkflächen und -punkte auf den Ressourcentyp CAD Modell zu beschränken, da ansonsten eine Ressource auf der Ähnlichkeitskarte ungewollt mehrfach (als CAD Modell und als FE Berechnung) auftauchen würde. Hierzu wird zu der jeweiligen CAD Ressource eine Datei mit den Wirkflächen hinterlegt (siehe Abb. 5.19).

Datei-Information	Dateigröße	Optionen	
Original WRL Datei	533 KB	Download	3D-Vorschau
Bildschirm 850 x 470 Pixel 7.2 cm x 4 cm @ 300 PPI	84 KB	Download	Bilddaten
Vorschau Vollbild-Vorschau	84 KB	Anzeigen	Bilddaten
Alternative Dateien			
CATIA Part	714 KB	Download	Native CAD Datei
STEP	663 KB	Download	Austauschformat der Geometrie
CATIA Part	598 KB	Download	Native CAD Datei
CATIA Produkt	16 KB	Download	Native CAD Datei
Wirkflächen	8 KB	Download	Wirkflächen für die Funktionale Ähnlichkeitssuche

> Zur Kollektion hinzufügen > Ressource senden (E-Mail) > Link
 > Bearbeiten > Löschen > Alternative Dateien verwalten
 > Protokoll

Wie bewerten Sie diese Ressource? ★★★★★
 1 Bewertung

Abb. 5.19: CAD Ressource innerhalb des Wissensspeichers mit Wirkflächen für die funktionale Ähnlichkeitssuche

Die funktionale Ähnlichkeitssuche steht innerhalb des Wissensspeichers in zwei Varianten zur Verfügung. Zum einen können alle Ähnlichkeiten aller hinterlegten Modelle in einer Karte dargestellt werden. Zum andern kann gezielt nach einem funktional ähnlichen Bauteil gesucht werden. Die Suche nach allen Ähnlichkeiten ermöglicht einen umfassenden Überblick über die Konstruktionsweisen und Zusammenhänge der hinterlegten Bauteile während die gezielte Ähnlichkeitssuche zu einem technischen Problem das passende biologische Vorbild findet.

Zur Beschreibung des technischen Problems, zu dem ein Vorbild gefunden werden soll, wird ein FE-Deck (bzw. die GRID Einträge) in NASTRAN Form benötigt. Hierzu muss der Benutzer im originalen Bauteil, zu welchem er ein Vorbild sucht, die Wirkflächen vernetzen. Die so erstellte NASTRAN Datei kann er anschließend über eine Eingabemaske in den Wissensspeicher laden. Nach dem Hochladen der Datei wird auf dem Server ein Prozess gestartet, welcher die GRID Einträge der Datei mit Hilfe der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Schritte mit den im Wissensspeicher vorhandenen Strukturen vergleicht und so die funktionalen Ähnlichkeiten berechnet.

Nachdem die Berechnung erfolgt ist, wird die Ähnlichkeitskarte dargestellt (vgl. Abb. 5.20) und der Anwender kann durch Auswählen ähnlicher Vorbilder zu der jeweiligen Ressource gelangen. Die Referenzstruktur, zu welcher passende biologische Vorbilder gesucht wurden, liegt hierbei im Zentrum. Im gezeigten Beispiel wurde die im Zentrum liegende Diatomee als Referenzstruktur gesucht. Da diese ebenfalls bereits im Wissensspeicher hinterlegt war, zeigt das Ergebnis der funktionalen Ähnlichkeitssuche eine hundertprozentige Übereinstimmung mit dieser Ressource und demnach einen Abstand von 0. Die ähnlichste andersartige Struktur ist mit einem Abstand von 79 direkt rechts neben dem Zentrum angeordnet.

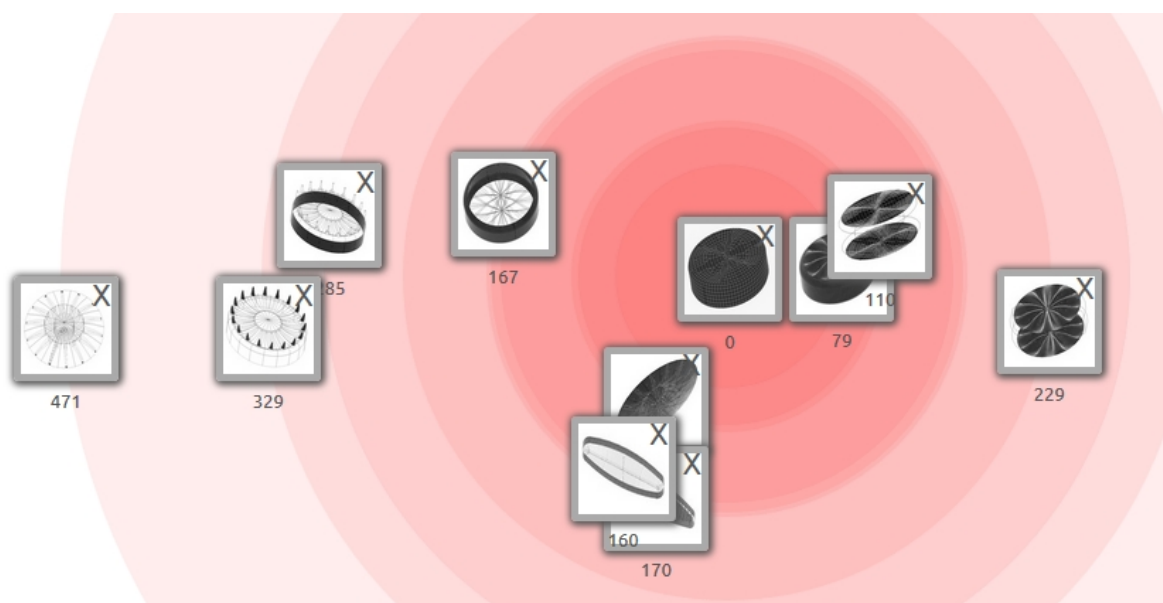


Abb. 5.20: Im Wissensspeicher integrierte, visuell aufbereitete Ähnlichkeitskarte

5.4.5 Umgang mit Suchergebnissen

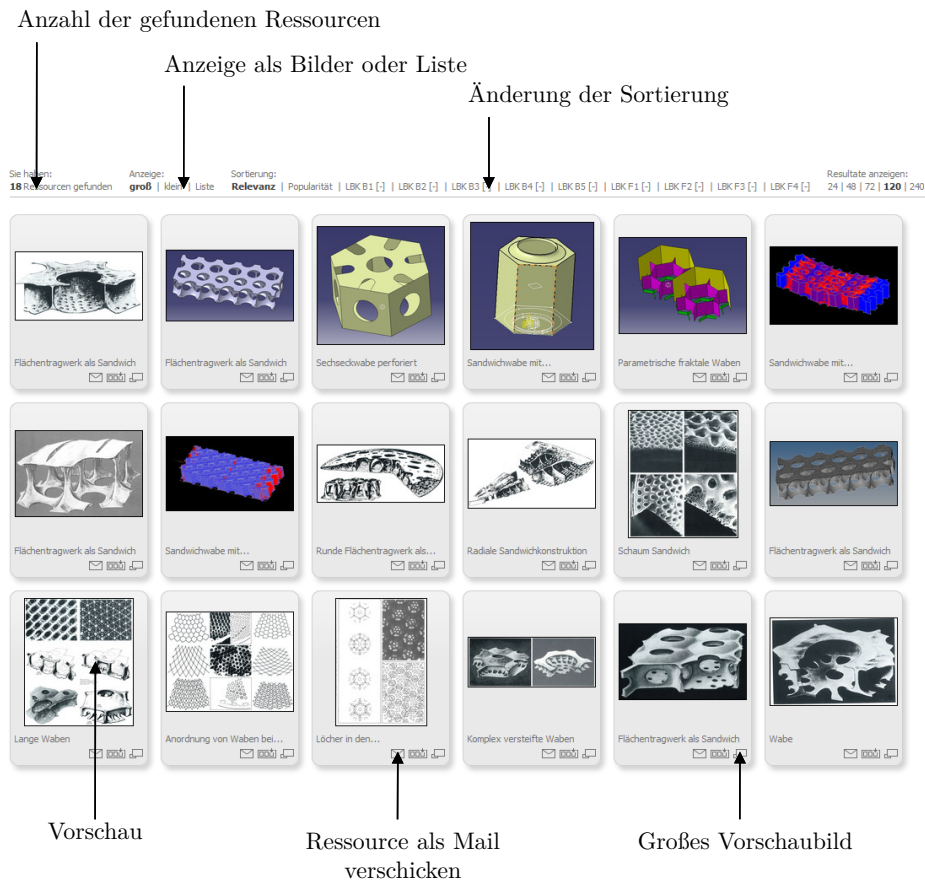


Abb. 5.21: Ergebnisanzeige als Vorschaubilder

Ergebnisse können als Vorschaubilder oder als Liste im Arbeitsbereich angezeigt werden und dort nach verschiedenen Optionen sortiert werden. Informationen über die Suche, Sortierung und die Navigation zu den Ergebnissen werden am oberen Arbeitsbereich angezeigt. Der Wissensspeicher „lernt“ fortwährend von der Art und Weise wie Benutzer nach Ressourcen suchen, indem er Ressourcenaufrufe pro Suchwort bewertet. Über eine längere Zeit werden so Ressourcen nach Stichworten bewertet, was sicherstellt, dass die passendsten Ressourcen zuerst angezeigt werden. Wählen Benutzer beispielsweise regelmäßig die zweite Ressource bei einer Suche nach dem Schlüsselwort „Sandwich“, wird diese die erste Ergebnisposition übernehmen, da das Suchsystem denkt dieses Ergebnis trifft evtl. besser auf das Suchwort „Sandwich“ zu. Dies ist auch bei mehrwörtigen Suchen wie beispielsweise nach „Sandwich permeabel“ möglich.

Innerhalb des Wissensspeichers gibt es neben der Möglichkeit nach Konstruktionsweisen anhand von Schlagworten zu suchen, auch die Möglichkeit Ergebnisse auf ihr Leichtbaupotential hin anhand ausführlicher Berechnungen mittels FE zu vergleichen. Dies ermöglicht das Auffinden der besten Struktur für den jeweiligen Problemfall. Um einen sinnvollen strukturmehchanischen Vergleich durchführen zu können, muss daher zunächst die Suche eingegrenzt

werden. Wichtig ist hierbei die Auswahl eines einzigen Lastfalls und des Inhaltstyps „FE Berechnung“, welcher für Berechnungsergebnisse steht. Zusätzlich zu diesen notwendigen Suchoptionen können jedoch alle weiteren Suchoptionen der erweiterten Suche oder der einfachen Suche ausgewählt werden, um das Ergebnis weiter einzuzugrenzen. Nach der Suche und der Darstellung in Listenform folgt folgende Tabelle:

Absteigend sortiert nach LBK Lastfall Balken B1

Resultate als Liste

↓

Sie haben: **2** Ressourcen gefunden

Anzeige: groß | klein | **Liste**

Sortierung: Relevanz | Popularität | **LBK B1 [-]** v | LBK B2 [-] | LBK B3 [-] | LBK B4 [-] | LBK B5 [-] | LBK F1 [-] | LBK F2 [-] | LBK F3 [-] | LBK F4 [-]

Resultate anzeigen: 24 | 48 | 72 | **120** | 240

Titel	LBK B1 [-] v	LBK B2 [-]	LBK B3 [-]	LBK B4 [-]	LBK B5 [-]	LBK F1 [-]	LBK F2 [-]	LBK F3 [-]	LBK F4 [-]	Material	ID	Typ	Werkzeuge
Radiolorie als...	66.373577	313.615151	7034.76949	1991.20731	374.346974					Stahl	28	FE Berechnung	> Anzeigen > Zur Kollektion hinzufügen > E-Mail
Balken aus drei...	49.5412706	312.110005	4443.85198	16356.8762	403.870347					Stahl	13	FE Berechnung	> Anzeigen > Zur Kollektion hinzufügen > E-Mail

Abb. 5.22: Ergebnisanzeige als Liste für den strukturmechanischen Vergleich

Durch Auswahl der Tabellenüberschrift „LBK“ können die Ergebnisse der Berechnungen nach dem Leichbaukennwert (vgl. Abschnitt 5.3.2) sortiert werden. Diejenige Ressource mit dem größten LBK bei dem gewählten Lastfall verspricht die bestmögliche Konstruktionsweise des Tragwerks.

6

Systematischer Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien

Im vorherigen Kapitel wurde entsprechend der Problemstellung des Auffindens geeigneter Planktonorganismen als Vorbilder für eine Leichtbaukonstruktion eine funktionale Ähnlichkeitsuche innerhalb eines datenbankbasierten Wissensspeichers erarbeitet und deren Umsetzung beschrieben. Wie in Abschnitt 4.1 herausgearbeitet, wird für die weiterführende Adaption des Prozesses nach Klein (vgl. Abb. 4.1) nach dem Auffinden eines geeigneten Vorbildes und einer Konzeptbildung in Arbeitsschritt 4 eine Möglichkeit zum Transfer der Konstruktionsprinzipien aus der Natur zum technischen Tragwerk benötigt.

Die biologischen Vorbilder bilden meist generalistische und robuste Konstruktionen, da die wirkenden Lastfälle, wie in Kapitel 2 dargelegt, in ihrer Richtung und Stärke nicht vorhergesehen werden können. Die notwendige Spezialisierung der Bauweisen hinsichtlich der technischen Randbedingungen, welche in Arbeitsschritt 1 („Klären der Randbedingungen“) erfolgt ist, soll im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe einer abgewandelten Topologieoptimierung umgesetzt werden. Es wird versucht die Topologieoptimierung und die biologischen Bauprinzipien zu vereinen, um sowohl die natürlichen Vorbilder, als auch die mathematische Strukturoptimierung gleichzeitig zu nutzen. Das Ergebnis dieser Kombination soll ein belastungsgerechtes Konstruktionsprinzip nach dem Vorbild mariner Planktonorganismen sein.

In diesem Kapitel wird daher vor dem Hintergrund der zweiten Arbeitsthese (vgl. Abschnitt 4.1) untersucht, inwiefern mit einer abgewandelten Topologieoptimierung der Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien zu technischen Leichtbaulösungen möglich ist und eine anschließende Spezialisierung hinsichtlich der mechanischen Randbedingungen mit parametrischer Geometrieoptimierung erfolgen kann. Hierzu werden zunächst in Abschnitt 6.1 die

biologischen Vorbilder als Inspiration zur Erstmodellgenerierung betrachtet und mehrere Möglichkeiten einer Kombination aus den bekannten Methoden der Topologieoptimierung und den Geometrievorlagen der Natur erforscht. Nachdem die Konstruktionsprinzipien übertragen wurden, erfolgt in Abschnitt 6.2 eine exemplarische Vorgehensweise, welche den Weg vom Aufbereiten der Diatomeenvalven als Vorbild für die abgewandelte Topologieoptimierung bis hin zur Spezialisierung der Konstruktionsprinzipien mittels parametrischer Optimierung aufzeigt.

6.1 Kombination von Topologieoptimierung mit biologischen Bauprinzipien

Biologische Vorbilder für Leichtbaustrukturen, wie sie Diatomeen und Radiolarien darstellen, stellen im Gegensatz zu spezialisierten technischen Strukturen eher universell ausgelegte Tragwerke dar (vgl. Abschnitt 3.2.1). Dies bedeutet, dass sie für eine Vielzahl von potentiellen Lastfällen ausgelegt sein müssen, um den Angriffen ihrer Fressfeinde Stand zu halten. Die Vielzahl an Leichtbauweisen und konstruktiven Detaillösungen, mit denen die Natur dem Selektionsdruck bei den Diatomeen begegnet ist exemplarisch in Abb. 6.1 dargestellt. Bei einer Übertragung der Konstruktionsprinzipien der Natur zur Technik ist folglich eine Spezialisierung der Vorbilder nötig.

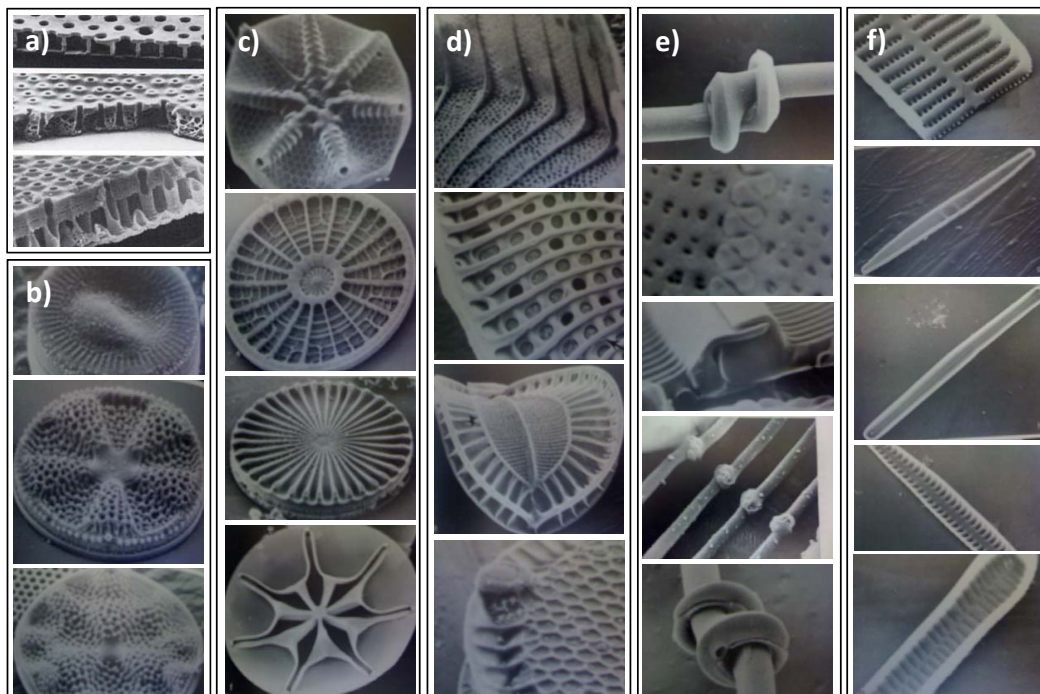


Abb. 6.1: Verschiedene Beispiele von Leichtbauprinzipien, wie sie bei Diatomeen vorzufinden sind: a) Sandwichbauweisen mit z. B. schaumartigen Blasen, Rohren, X- und Y-Stege; b) Mehrfach gewölbte Flächen mit Faltungen, radialen und konzentrischen Wellen; c) Versteifungsspeichen; d) Kantenversteifungen mit fraktalen Rippen; e) Verbindungselemente, z.T. wieder lösbar; f) Balkentragwerke

Die in Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2 beschriebenen Methoden zur Topologieoptimierung stellen zwei gängige Vorgehensweisen zum Entwurf eines ersten Designvorschlages dar. Um eine systematische Übertragung der generalistischen Konstruktionsweisen der Natur zu technisch spezialisierten Konstruktionen zu ermöglichen, soll im Folgenden eine Kombination der Topologieoptimierung mit den Geometrien der biologischen Vorbilder untersucht werden. Hierbei soll einerseits die universelle Eigenschaft der Topologieoptimierung hinsichtlich Bauraum und andererseits die evolutionär optimierten Strukturen marinen Planktons als Vorlage für neuartige Leichtbaukonzepte genutzt werden. Als Ergebnis dieser Übertragung sollen Kraftpfade innerhalb eines Bauraumes identifiziert werden, die sich möglichst an der Geometrie des biologischen Vorbildes orientieren, jedoch zudem durch die Topologieoptimierung kraftoptimierte Konstruktionen für den jeweils vorherrschenden technischen Lastfall darstellen. So können, wie in Abb. 6.2 dargestellt, die für den speziellen technischen Lastfall benötigten Teilbereiche eines biologischen Vorbildes identifiziert werden, nicht benötigte Bereiche entfernt werden, oder auch um Konstruktionsdetails erweitert werden, die eine Anpassung des Entwurfes an z. B. neue Lagerungen ermöglicht.

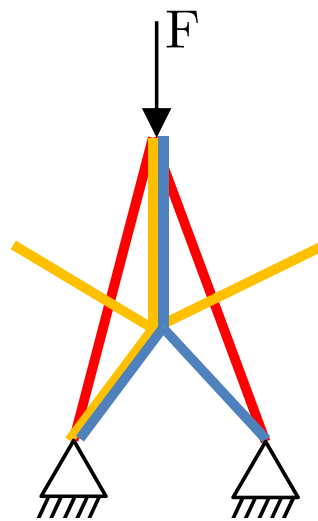


Abb. 6.2: Prinzip des systematischen Transfers von Konstruktionsprinzipien: topologieoptimierter Lastpfad (rot); biologisches Vorbild (orange); ausgewählte und ergänzte Bereiche des Vorbildes auf Basis der Ergebnisse der Topologieoptimierung (blau)

Um diese Kombination von Topologieoptimierung und biologischen Bauprinzipien zu realisieren, werden verschiedene Arbeitsschritte benötigt. Als erstes müssen die Geometrien der Planktonschalen in digitaler Form vorliegen, um sie als Vorbilder in einem FE-Programm nutzen zu können. Hierfür ist eine Archivierung der Geometrien im Wissensspeicher im Form des Ressourcentyps „FE Netz“ geeignet (vgl. Abschnitt 5.4.3). Anschließend kann das Vorbild mit verschiedenen Algorithmen untersucht werden, um genau die Konstruktionsprinzipien zu identifizieren, welche für den technischen Lastfall relevant sind und evtl. neue zu ergänzen.

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Extraktion der Konstruktionsprinzipien betrachtet. Hierbei handelt es sich um eine modifizierte SKO Methode (Abschnitt 6.1.1) sowie eine SIMP Methode (Abschnitt 6.1.2) innerhalb eines speziellen Bauraumes.

6.1.1 Modifizierte SKO-Methode

Die Topologieoptimierungsmethode SKO, welche auf der Simulation der Wachstumsregel von biologischen Kraftträgern basiert (vgl. Abschnitt 3.3.2), ermöglicht die belastungsgerechte Auslegung eines Bauteils. Mit Hilfe der „Reference stress relationship“ (RSR, Mineralisierungsprozess von Knochen, siehe Gleichung 3.4) wird hierbei in einem iterativen Prozess das E-Modul in einem bestimmten Bauraum variiert und somit unnötiges Material in Bereichen ohne Belastung gelöscht.

Um die Spezialisierung der generalistischen Bauweisen der Natur hin zu technischen Lösungen zu ermöglichen, wird im Folgenden eine Kombination der RSR und einem biologischen Vorbild als „Wegweiser“ für den mathematischen Algorithmus untersucht. Hierbei sollen die universellen Eigenschaften der SKO Methode bezüglich eines beliebigen Bauraumes genutzt werden. Zugleich sollen die evolutionär optimierten Strukturen der Planktonschalen einen Hinweis für den mathematischen Algorithmus geben, an welcher Stelle Material für innovative Leichtbau-Konzepte sinnvollerweise anzulagern ist.

Die Grundidee hinter dieser Kombination ist eine Variation des E-Moduls, welche in jeder Iteration abhängig ist von der RSR und zugleich eine Gewichtung erhält, welche den minimalen Abstand des jeweiligen Elementes zu dem natürlichen Vorbild berücksichtigt. Es werden diejenigen Elemente, die weit entfernt von der natürlichen Struktur sind, mit einem niedrigeren E-Modul belegt. Die höchsten Module werden somit in Elementen erreicht, welche zugleich in der Nähe der natürlichen Struktur sind und sich ein hohes E-Modul durch die RSR berechnet. Entsprechend werden Elemente, die sich fern von der natürlichen Struktur befinden und sich ein geringes E-Modul durch die RSR berechnet mit einem niedrigen E-Modul belegt und können im Anschluss an die Iterationen entfernt werden:

Tab. 6.1: Einflussgrößen auf das E-Modul der modifizierten SKO-Methode

Abstand	E-Modul nach RSR	neues E-Modul
hoch	niedrig	niedrig
hoch	hoch	mittel
gering	niedrig	mittel
gering	hoch	hoch

Das Vorgehen bei dieser Methode kann in fünf Schritte unterteilt werden:

1	Biologisches Vorbild auswählen und Digitalisierung
2	Vernetzung des Bauraumes und Anpassen des Vorbildes
3	Berechnung der minimalen Abstände jedes Elements des Bauraumes zum Vorbild
4	Optimierung
5	Extrahierung des Designvorschlages

Abb. 6.3: Die fünf Arbeitsschritte der modifizierten SKO-Methode zur Übertragung von biologischen Konstruktionsprinzipien in die Technik

Zunächst muss das biologische Vorbild ausgewählt und digitalisiert werden. Die Skelette der Diatomeen Radiolarien, welche die Vorbilder für das in dieser Arbeit untersuchte Leichtbauverfahren sind, liegen in Form von Rohmaterial im Friedrich-Hustedt-Zentrum für Diatomeenforschung¹ des AWI vor. Hier gilt es zu unterscheiden, ob die Proben in Form von in Harz eingelassenen Exoskeletten für lichtmikroskopische Aufnahmen auf Deckgläschen oder als Rohmaterial für z. B. Rasterelektronenmikroskopie vorliegen (siehe Abb. 6.4). Da für die automatisierte Übertragung insbesondere die dreidimensionalen Informationen der Schalengeometrien wichtig sind, kann nur das Rohmaterial sinnvoll genutzt werden.



Abb. 6.4: Rohmaterial des Friedrich-Hustedt-Zentrums für Diatomeenforschung

Für den Fall, dass lebende Organismen untersucht werden sollen, müssen vor Beginn der mikroskopischen Aufnahmen einige Reinigungsschritte vollzogen werden, da für präzise Aufnahmen die Schalen frei von organischem Material sein müssen. Nach Poll u. a. (1999) würde insbesondere die Biomembran, welche die Schale der Diatomeen umgibt, die feinen Strukturen

¹Online-Zugang: <http://www.awi.de/en/go/hustedt>, Abruf 18.04.2013

für eine REM-Aufnahme unsichtbar machen. Round u. a. (1990) beschreibt eine schonende Reinigungsprozedur, welche mit Hilfe von Salzsäure (37%) die Schalen vom organischen Material befreit ohne hierbei die Schalen oder die Feinstrukturen zu zerstören.

Aktuell sind verschiedene Methoden zur 3D-Rekonstruktion von Objekten im Mikrometerbereich bekannt, insbesondere die Mikrotomographie (μ CT) (Nahrendorf u. a., 2007) und die Transmissions- und REM mit fokussiertem Ionenstrahl nach z. B. Hildebrand u. a. (2009); Marinello u. a. (2008) sog. FIB/SEM). Für eine einfache Rekonstruktion der 3D-Informationen der biologischen Vorbilder wird in dieser Arbeit die Laser-Konfokal-Scanningmikroskopie (CLSM) verwendet, da diese in ihrer Auflösung ausreichend für die benötigte Bauraummodellierung ist und zugleich ein genügend großes Sichtfeld ermöglicht, um die biologischen Vorbilder in einer Aufnahme abbilden zu können (vgl. Abb. 6.5). Ebenfalls handelt es sich bei CLSM um eine nicht zerstörerische Methode, was den Vorteil hat, dass die biologischen Vorbilder mehrfach gescannt werden können, falls ein Fehler bei einer Aufnahme auftreten sollte.

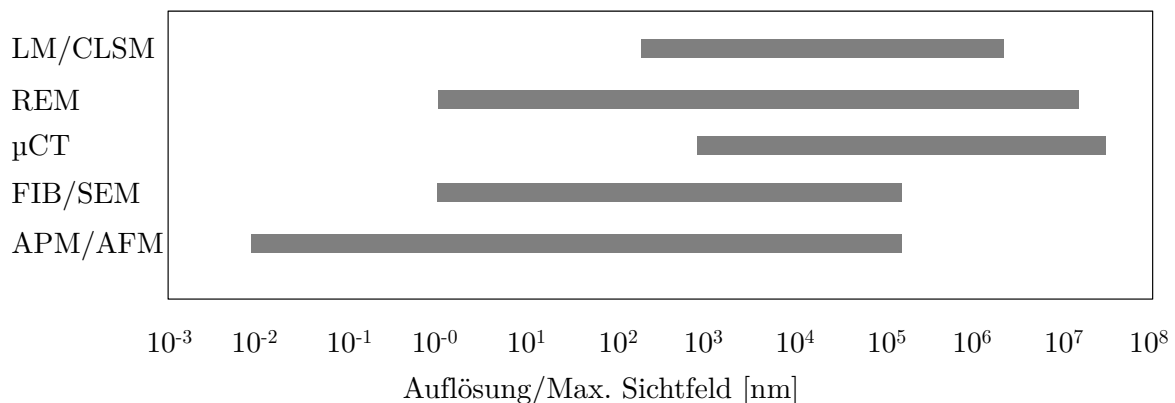


Abb. 6.5: Auflösungsbereiche und Sichtfelder verschiedener Mikroskoptechniken

Bei Konfokalmikroskopen wird jeweils nur ein kleiner Bildausschnitt (Punkt) des Präparats betrachtet. Mit Hilfe einer Lochblende gelangt nur dasjenige Licht an den Detektor, welches von der aktuellen Fokusebene (eine schmale Schicht des Präparates) und dem betrachteten Punkt abgestrahlt wird (vgl. Abb. 6.6). Dadurch, dass nur ein sehr kleines Volumen um den Fokuspunkt isoliert betrachtet werden kann, können optische Schnittbilder mit hohem Kontrast erzeugt werden. Beim CLSM wird das Präparat mit Hilfe eines Laserstrahls abgerastert. Um die Schengeometrien für den Laser sichtbar zu machen, müssen sie zunächst mit einem fluoreszierenden Farbstoff angereichert werden (Descles u. a., 2008).

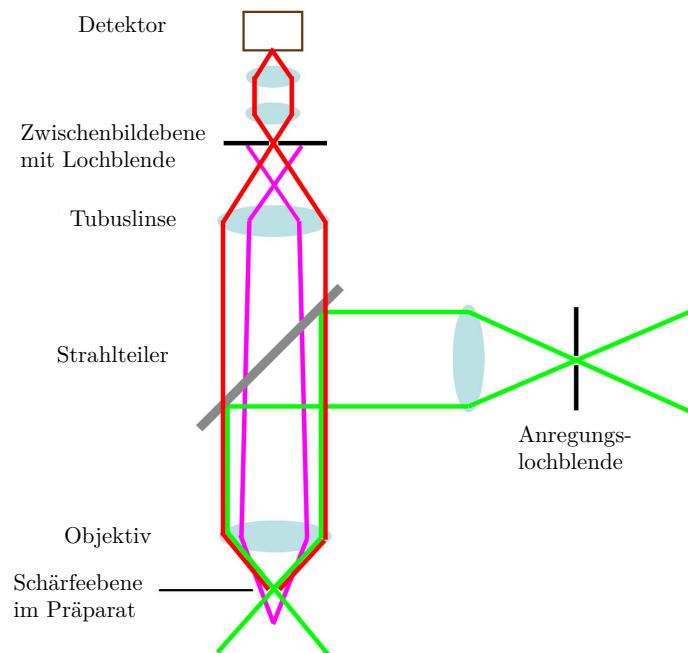


Abb. 6.6: Schema des Prinzips des Konfokalmikroskops

Für die vorliegende Arbeit wird ein Leica[®] TCS SP2 Mikroskop mit einem 40x HCX PL APO CS Objektiv verwendet. Der Ar/Kr Laser regt mit einer Wellenlänge von 488 nm an. Der detektierte Emissionsbereich liegt bei 500 - 520 nm. Bei dem verwendeten Fluoreszenz-Farbstoff handelt es sich um Fluoresceinthioisocyanat-(3-aminopropyl)trimethoxysilane. Friedrichs u. a. (2012) beschreibt das Vorgehen näher im Detail.

Die resultierenden digitalen Schnittaufnahmen werden anschließend mit Hilfe der Software ScanIP^{®2} bearbeitet und unter Verwendung des integrierten Tools ScanFE[®] zu einer Punktwolke umgewandelt. Als Ergebnis der CLSM Aufnahmen steht eine Punktwolke in Form einer Textdatei (x-, y- und z-Koordinaten) zur Verfügung.

Nachdem die Digitalisierung der biologischen Vorbilder erfolgt ist, kann nun eine modifizierte SKO Methode genutzt werden, um die relevanten Konstruktionsprinzipien zu übertragen. Ausgehend von einem mit finiten Elementen vernetzten Bauraum, wird für jedes Element der Mittelpunkt bestimmt. Die Feinheit der Vernetzung (Elementgröße) muss hierbei als Kompromiss zwischen späterer Rechenzeit und ausreichender Feinheit des Strukturentwurfes gewählt werden. Das biologische Vorbild (in Form einer digitalen Punktwolke) wird anschließend durch Skalierung und Neuorientierung in diesen Bauraum eingepasst. In Schritt Drei wird die minimale Distanz δ für jedes Element des Bauraumes zur biologischen Struktur berechnet und gespeichert. Hierfür eignet sich die sog. Nächsten-Nachbarn-Suche, wie sie auch bereits in Abschnitt 5.2.4 beschrieben wurde. Der Maximalwert aller minimalen Distanzen des Bauraumes wird als δ_{max} gespeichert. Ebenso wird der geringste globale Abstand aller minimalen Distanzen δ_{min} berechnet. Parallel zum Vorgehen bei der SKO Methode wird

²Simpleware Ltd. Exeter, U.K.

das E-Modul in einem Bereich zwischen $E_{max} = 100$ und $E_{min} = 1$ limitiert. Gleichung 6.1 beschreibt die verwendete Abstandsfunktion in Form des zwischen 0 und 1 normierten Faktors α . Elemente, welche entfernt des biologischen Vorbilder sind, erhalten folglich α -Werte, welche in der Nähe von 0 liegen und Elemente, welche in der Nähe der biologischen Struktur sind, erhalten Werte in der Nähe von 1.

$$\alpha = 1 - \frac{\delta - \delta_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (6.1)$$

Für die iterative Berechnung ist es wichtig eine geschickte Ausgangssituation zu verwenden, da die Berechnung der E-Module nach der RSR immer von der vorherigen Spannung eines Elementes ausgeht. Es zeigt sich, dass es zweckmäßig ist, die ersten E-Module anhand der Distanzen zur biologischen Struktur zu wählen (vgl. Gl. 6.2). Die Beziehung zwischen Abstand und E-Modul kann hierbei mit dem Faktor λ abgestimmt werden und wird im Detail in Abschnitt 6.1.1 betrachtet.

$$E_{Start} = E_{max} \cdot \alpha^\lambda \quad (6.2)$$

Nachdem alle E-Module für die erste Berechnung anhand der minimalen Distanzen bzw. Gleichung 6.2 berechnet wurden, wird die erste FE-Analyse des Bauraumes unter Berücksichtigung aller nötigen Randbedingungen des technischen Lastfalls (Lagerung, Kräfte, Momente, usw.) durchgeführt. Die Referenzspannung σ_{ref} wird zweckmäßig zu $\sigma_{ref} \propto \bar{\sigma}$ bestimmt, was der mittleren Spannung aller Elemente der ersten Iteration entspricht. Entsprechend der SKO Methode wird der Faktor $k = 100/\sigma_{ref}$ gewählt (Baumgartner, 1992).

Im Anschluss an die erste FE-Analyse müssen für die nun folgende iterative Berechnung der E-Module die Spannungen³ der Elemente ausgelesen werden. Die erste Möglichkeit im Folgenden die Spannungen der Elemente zu bestimmen ist die Berechnung mit der RSR nach der SKO Methode. Der Abstand α der Elemente zur biologischen Struktur wird hierbei ausschließlich bei der initialen E-Modul Berechnung berücksichtigt (im Folgenden „vSKO 1“ genannt).

Eine zweite Möglichkeit (im Folgenden „vSKO 2“ genannt) zur Berechnung der iterativen E-Module zeigt Gleichung 6.3. Hierbei wird durch eine Variation der Schrittweite die gleichzeitige Berücksichtigung der Spannung des Elements der letzten Iteration und dessen Abstand zum biologischen Vorbild realisiert. Die Schrittweite k wird mit der Abstandsfunktion α multipliziert, sodass Elemente, welche in der Nähe des biologischen Vorbildes sind, ihr E-Modul innerhalb weniger Iterationen nach den Regeln der RSR variieren können. Elemente, die entfernt des biologischen Vorbildes sind, können ihr E-Modul dagegen nur langsam verändern und müssen folglich auf die Variation der näheren Elemente im Nachhinein reagieren.

$$E_{n+1} = E_n + k \cdot (\sigma - \sigma_{ref}) \cdot \alpha^\lambda \quad (6.3)$$

³Wie bei der SKO-Methode die von Mises Vergleichsspannungen, da es sich hierbei um eine skalare Größe handelt

Als dritte Möglichkeit (im Folgenden „vSKO 3“ genannt) kann das maximale E-Modul E_{max} unter bestimmten Voraussetzungen in Abhängigkeit von der Abstandsfunktion α lokal erhöht werden. Wenn bei der iterativen E-Modul Berechnung nach der RSR das maximale E-Modul für ein Element erreicht wird, kann das E-Modul beispielsweise mit Gleichung 6.4 für dieses Element erhöht werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass 0,5 ein günstiger Wert für β ist. Da für kleine α das maximale E-Modul auch verringert werden kann, hindert dieses Vorgehen insbesondere Elemente, welche entfernt der biologischen Struktur liegen, als sinnvolle Materialträger aufzutreten.

$$E_{max} = E_{max_0} \cdot (\alpha + \beta) \quad (6.4)$$

Im Folgenden werden die drei verschiedenen Möglichkeiten der Variation des E-Moduls in Abhängigkeit des jeweiligen Elementabstandes zum biologischen Vorbild untersucht. Nach der initialen Belegung der E-Module unter Berücksichtigung der minimalen Distanzen, können die drei Varianten folgendermaßen zusammengefasst werden:

1. **vSKO1:** Berechnung der E-Module mit Hilfe der RSR (Gl. 3.4) nach einer bestimmten Anzahl initialer Iterationen nach Gl. 6.2. Der Abstand α wird hierbei ausschließlich bei den initialen Iterationen berücksichtigt.
2. **vSKO2:** Variation der Schrittweite in Abhängigkeit des Abstandes zum biologischen Vorbild nach Gleichung 6.3.
3. **vSKO3:** Vergrößertes E_{max} in Abhängigkeit des Abstandes zum biologischen Vorbild bei Erreichen von E_{max} mit Hilfe der RSR nach Gleichung 6.4.

Die iterativen Berechnungen werden solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Das Abbruchkriterium kann beispielsweise eine stabile Verteilung von E-Modulen aller Elemente sein. Mathematisch bedeutet dies, dass sich E_{n+1} aller Elemente um weniger als z. B. 1% gegenüber dem jeweiligen E_n ändert. Ein alternatives Abbruchkriterium ist die vollständige Zuweisung aller Elemente zu E_{max} oder E_{min} . Im Anschluss an die iterativen Berechnungen und nachdem das Abbruchkriterium erreicht ist können diejenigen Elemente eliminiert werden, welchen E_{min} zugewiesen wurde. Die verbleibenden Elemente stellen einen belastungsgerechten, an die biologische Vorbildstruktur angepassten, Konstruktionsentwurf dar.

Variation und Einfluss der Parameter

Für die nähere Untersuchung wird im Folgenden ein vereinfachter zweidimensionaler Lastfall angenommen. Wie in Abb. 6.7 dargestellt, ist der Bauraum an den beiden unteren Ecken gelenkig gelagert und wird mit einer vertikalen Last in der Mitte der oberen Kante belastet.

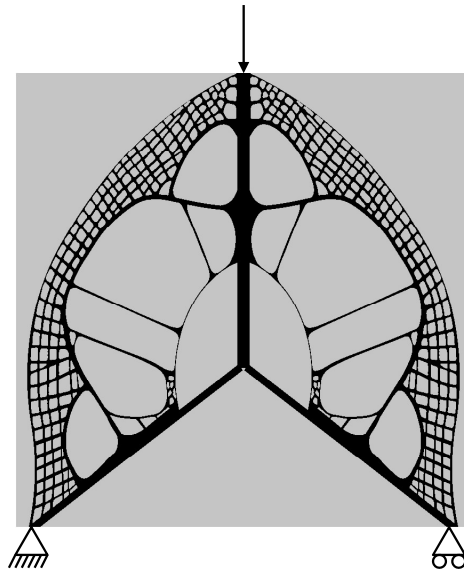


Abb. 6.7: 2D Bauraum (grau) mit hinterlegter Radiolarie *Clathrocorys teuscheri* als biologisches Vorbild (schwarz)

Abb. 6.8 zeigt hierzu die Ergebnisse der Berechnungen mit unterschiedlichen in grau dargestellt Anzahlen von initialen Iterationen (grau) von 1 bis 5. Die initialen Berechnungen nach Gleichung 6.2 werden jeweils mit $\lambda = 3$ durchgeführt. Im Anschluss (weiß) wird mit Hilfe der RSR (Gl. 3.4) bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums (1% Abweichung der E-Module innerhalb zweier Iterationen) weitergerechnet. Die Rechnungen werden mit einem potentiell vergrößerten E_{max} nach Gleichung 6.4 mit $\beta = 0,5$ durchgeführt (Kombination aus vSKO 1 und vSKO 3).

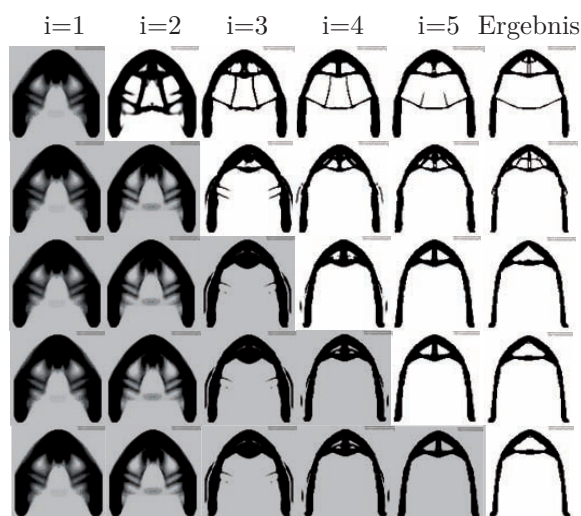


Abb. 6.8: Ergebnisse der modifizierten SKO Methode unter Einfluss der Anzahl der initialen Iterationen (1-5 in grau dargestellt) nach Gl. 6.2 (vSKO1). Weiterführende Berechnung mit Hilfe der SKO-Methode (nach Gl. 3.4) und unter Berücksichtigung eines vergrößerten E_{max} nach Gl. 6.4 (vSKO3)

Für die initiale Berechnung der E-Module nach Gleichung 6.2 kann gezeigt werden, dass eine Iterationsanzahl von 1 bis 3 zu Ergebnisse führt, welche ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Abstraktionsgrad und biologischen Bauprinzip darstellen. Ab drei initialen Iterationen nach Gleichung 6.2 verändert sich das finale Design nur noch marginal. Dies wird beim Betrachten von Abb. 6.8 deutlich, da sich die Ergebnisse (rechte Spalte) für 3-5 initiale Berechnungen nicht unterscheiden. Ebenso wird erkennbar, dass je weniger initiale Berechnungen nach Gleichung 6.2 durchgeführt werden, desto feingliedriger die berechnete Struktur ist.

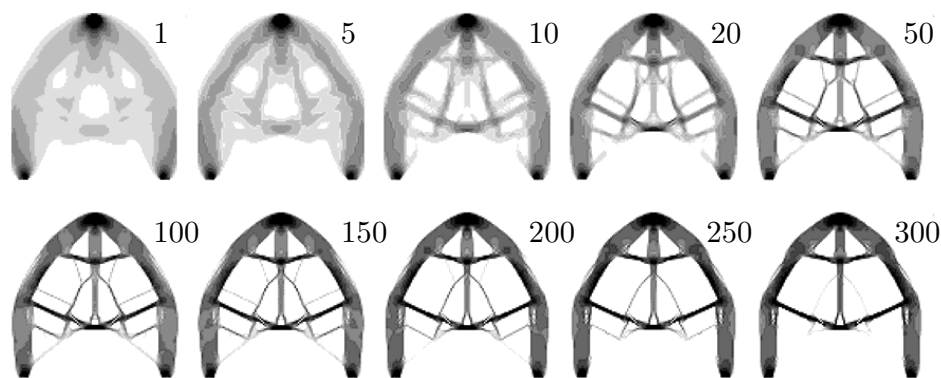


Abb. 6.9: Beispiel einer modifizierten SKO Berechnung nach Gl. 6.3 mit $\lambda = 1$ unter Berücksichtigung der Elementabstände zum natürlichen Vorbild (vSKO2)

Um die modifizierte SKO Methode nach Gleichung 6.3 (vSKO 2 mit Abstandsgewichtung zu einem natürlichen Vorbild) zu untersuchen, wird im gleichen Bauraum (vgl. Abb. 6.7) zunächst mit $\lambda = 1$ die Berechnung durchgeführt. Wie Abb. 6.9 zeigt, wird die natürliche Struktur zunächst relativ weich umrissen. Im weiteren Verlauf der Rechnungen (in etwa bei Iteration 100) wird die natürliche Struktur deutlicher, wobei bereits erste Anzeichen zu erkennen sind, die einzelne Bereiche der Struktur als unnötig (heller) andeuten. Ab Iteration 200 bis hin zum Erreichen des Abbruchkriteriums bei ca. Iteration 300 wird die natürliche Struktur hinsichtlich des Lastfalles stark vereinfacht und somit auf den Lastfall spezialisiert.

Wie Gleichung 6.2 beschreibt, hat die Wahl des Parameters λ einen kritischen Einfluss auf die Lösung des Algorithmus. λ beschreibt den „Schärfegrad“ mit dem das biologische Vorbild in der ersten Iteration simuliert wird. Abb. 6.10 zeigt verschiedene Werte für λ von 0 bis 7 und deren Einfluss auf das E-Modul in Abhängigkeit des Abstandes des Elements von der biologischen Struktur. $\lambda = 1$ beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen Abstand und E-Modul. Je kleiner λ gewählt wird, desto näher muss das jeweilige Element an der biologischen Struktur sein, um ein hohes E-Modul zu bekommen. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, ist in Abb. 6.10 der Zusammenhang zwischen E-Modul, λ und dem Abstand δ wie in Gleichung 6.2 verwendet, dargestellt.

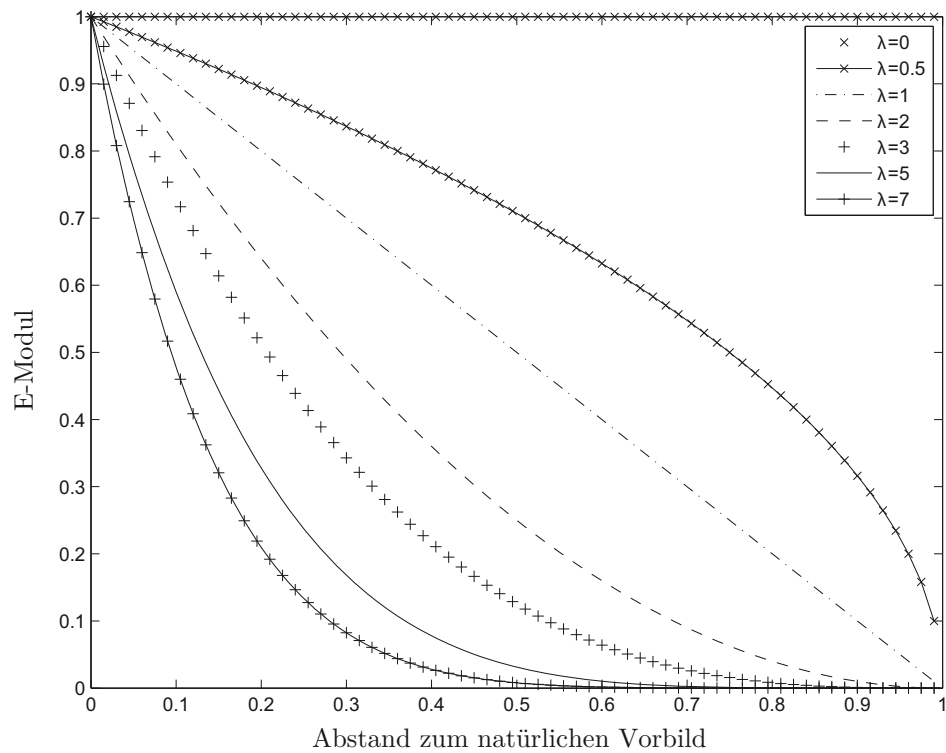


Abb. 6.10: Variation von λ für die Berechnung nach Gl. 6.2. Normierte Darstellung der E-Module im Verhältnis zum Abstand eines Elementes zum natürlichen Vorbild.

Um diesen Zusammenhang weiter zu verdeutlichen sind in Abb. 6.11 für verschiedene Werte von λ die Ergebnisse der vSKO 2 Methode nach Gleichung 6.3 dargestellt. Deutlich erkennbar wird mit zunehmendem λ innerhalb der ersten Iterationen die biologische Struktur stringenter „nachgebaut“. Dies hat zur Folge, dass auch das Endergebnis (rechte Spalte) sich mehr dem biologischen Vorbild annähert. Im Gegensatz dazu gleicht die oberste Spalte mit $\lambda = 0$ der klassischen SKO Methode, da der Anteil der biologischen Struktur der ersten Iteration im Verlauf der weiteren Iterationen überlagert wird. Mit Hilfe des Faktors λ ist es folglich möglich den Einfluss des biologischen Vorbildes auf die Optimierung genau einzustellen.

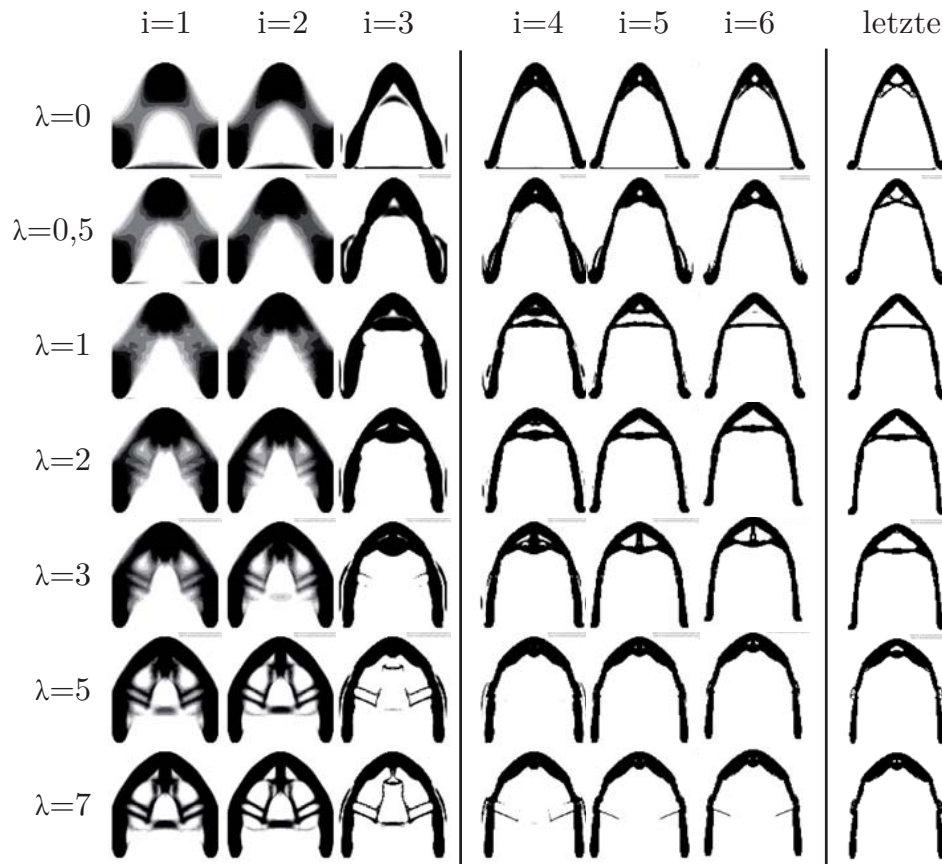


Abb. 6.11: Variation von λ und deren Einfluss auf die modifizierte SKO Methode nach Gl. 6.3 (vSKO2)

Die Wahlmöglichkeiten der Parameter bei den modifizierten SKO Methoden sind ebenfalls problemabhängig. Je nach Geometrie, Lager, Kräften, etc. sind unterschiedliche Parameterkombinationen sinnvoll. Für eine erste Abschätzung konnte im Rahmen dieser Arbeit folgender Parametersatz erarbeitet werden:

$$\begin{array}{l}
 1 \leq \text{Anzahl ersten Iterationen} \leq 3 \\
 0,5 \leq \lambda \leq 5 \\
 \beta = 0,5
 \end{array}$$

6.1.2 SIMP-Methode innerhalb eines natürlichen Bauraumes

Als alternatives Vorgehen zu der in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen modifizierten SKO Methode, kann die SIMP-Methode (vgl. Abschnitt 3.3.1) im Bereich nahe der biologischen Struktur angewendet werden, um ein belastungsgerechtes Design nach dem Vorbild der biologischen Bauweise zu generieren. Das folgende Vorgehen wurde ebenfalls im Journal of Bionic Engineering publiziert (Maier u. a., 2013). Das Vorgehen kann in drei Arbeitsschritte (siehe Abb. 6.12) aufgeteilt werden. Als erstes muss wie auch bei der modifizierten SKO Methode ein biologisches Vorbild identifiziert (vgl. Abschnitt 5.2), digitalisiert (gleiches Vorgehen wie bei

der modifizierten SKO Methode in Abschnitt 6.1.1 beschrieben) und in den Bauraum (DS) eingepasst werden. Im nächsten Arbeitsschritt wird der Bauraum in zwei Bereiche unterteilt: Einen Teilbereich DSS+ nahe der biologischen Struktur, in dem die Topologieoptimierung stattfindet, und den restlichen Teilbereich DSS-, in dem keine Topologieoptimierung stattfinden. Nachdem diese Zuweisung erfolgt ist, kann die SIMP-Methode im Teilbereich DSS+ nahe der biologischen Struktur angewandt werden und ermöglicht eine belastungsgerechte Abstraktion der biologischen Struktur.

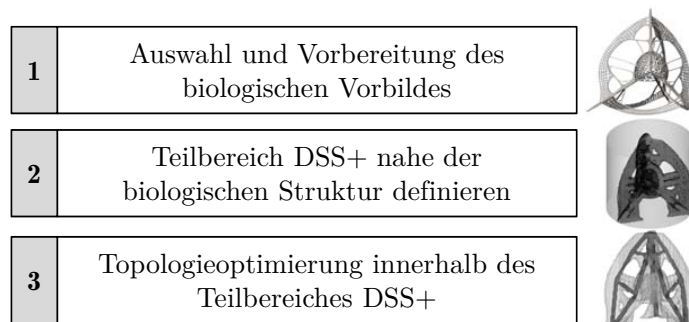


Abb. 6.12: Drei Arbeitsschritte zur belastungsgerechten Abstrahierung eines biologischen Vorbildes mit Hilfe von Topologieoptimierung

Im Folgenden wird die Methode anhand des in Abb. 6.7 in Abschnitt 6.1.1 gezeigten zweidimensionalen Lastfalls mit einer einfachen vertikalen Last in der Mitte des oberen Randes, sowie dem biologischen Vorbild *Clathrocorys teuscheri* beschrieben.

Nachdem ein biologisches Vorbild identifiziert und digitalisiert wurde, wird es in den Bauraum DS eingepasst, sodass die Kraftein- und -ausgänge mit den biologischen Geometrien übereinstimmen. Der Bauraum wird mit finiten Elementen diskretisiert. Hierfür wird er mit möglichst gleichmäßigen Elementen mit ausreichend kleiner Elementgröße vernetzt. Für die folgende Topologieoptimierung wird nicht der komplette DS benutzt, sondern nur der Bauraum DSS+, welcher in einem bestimmten Abstand zur biologischen Struktur ist. Um den DSS+ zu bestimmen wird von jedem Element der minimale Abstand zur biologischen Struktur berechnet. Parallel zur modifizierten SKO Methode kommt hierbei die Nächste-Nachbarn Suche zum Einsatz (vgl. Abschnitt 5.2.4). Mit den minimalen Abständen kann anschließend durch die Wahl eines Grenzwertes δ_l die Unterscheidung zwischen DSS- und DSS+ getroffen werden:

wenn Abstand(Element) $\leq \delta_l$
dann Zuweisung(Element, DSS+)
sonst Zuweisung(Element, DSS-)

Mit Hilfe des Grenzwertes δ_l kann der Abstrahierungsprozess von der biologischen Struktur zum technischen Tragwerk angepasst werden. Soll nur das natürliche Vorbild Bauraum für die Topologieoptimierung sein, so wird ein δ_l gewählt, der ungefähr der Elementgröße des DS

entspricht. Alternativ können Berechnungen mit größerem δ_l durchgeführt werden, welche auch Bereiche neben dem biologischen Vorbild als Bauraum der Topologieoptimierung ermöglichen. Das Vergrößern des Bauraumes DSS+ durch die Wahl eine größeren δ_l hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis und wird im Folgenden untersucht.

Nachdem der Bauraum definiert wurde, wird eine Topologieoptimierung mit der SIMP-Methode innerhalb des DSS+ durchgeführt. Typischer Weise erfolgt diese mit dem Ziel der Minimierung der Masse oder der Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit. Am Beispiel des zweidimensionalen Lastfalls zeigt Abb. 6.13 die Ergebnisse der Topologieoptimierung (schwarz) innerhalb verschieden großer DSS+ (grau). Wie zu erkennen ist, erzeugt ein DSS+, welches sehr nahe dem biologischen Vorbild gewählt wurde praktisch eine klassische Topologieoptimierung innerhalb des biologischen Vorbildes (a). Je größer (dicker) der Bauraum DSS+ gewählt wird, desto eher tritt der mathematische Algorithmus in den Vordergrund und ermöglicht mathematisch optimale Kraftpfade, welche jedoch immer noch in der Nähe des biologischen Vorbildes verlaufen müssen. Schlussendlich zeigt (h) einen maximal aufgedickten DSS+, welcher gleichzeitig das Ergebnis einer SIMP Optimierung ohne biologisches Vorbild darstellt.

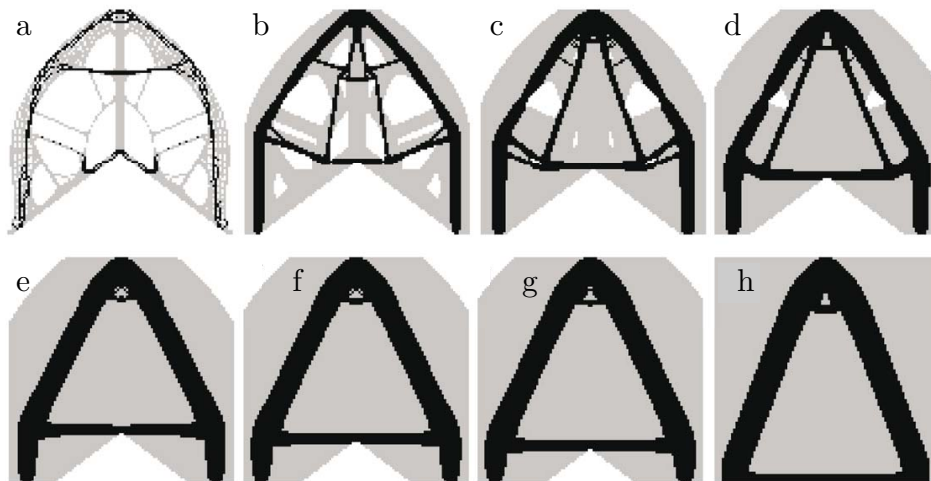


Abb. 6.13: Ergebnisse der Topologieoptimierung (schwarz) innerhalb des DSS+ (grau) für unterschiedliche δ_l (ansteigend von a (Bauraum bildet nur das biologische Vorbild nach) bis h (kompletter Bauraum)) des biologischen Vorbildes *Clathrocorys teuscheri*.

Die Limitierung der Topologieoptimierung auf einen Bauraum DSS+ nahe des biologischen Vorbildes ermöglicht die automatisierte Generierung verschiedener Design, welche zugleich belastungsgerecht ausgeführt sind (aufgrund der SIMP-Methode) und sich an der biologischen Struktur orientieren. Die mit Hilfe der modifizierten SKO Methode (vgl. Abschnitt 6.1.1) oder der SIMP-Methode innerhalb eines natürlichen Bauraumes erzeugten Konstruktionen stellen bionische Entwürfe für Leichtbaustrukturen dar. Um die Entwürfe in ausgearbeitete Konstruktionen zu überführen, welche speziell an die Lastfälle der Technik angepasst sind, bietet sich im Anschluss an die Topologieoptimierung eine Parameterstudie an.

6.2 Umsetzung des Transfers von Konstruktionsprinzipien vom biologischen Rohmaterial zum spezialisierten technischen Leichtbaukonzept

Nachdem im vorherigen Abschnitt die theoretischen Grundlagen des Transfers von Konstruktionsprinzipien betrachtet wurden, wird im Folgenden der systematische Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien anhand der flächigen Diatomeenvalve *Asterolampra sp.*, welche als Flächentragwerk abstrahiert werden soll, beispielhaft aufgezeigt. Hierdurch wird das Vorgehen der Arbeitsschritt 4 und 5 (vgl. Abb. 4.1) der für eine Berücksichtigung der Konstruktionsweisen biologischer Vorbilder angepassten systematischen Vorgehensweise für leichtbaugerechtes Konstruieren veranschaulicht. Ausgehend von der Digitalisierung des biologischen Vorbildes mit Hilfe von CLSM (Abschnitt 6.2.1) wird ein Bauraum für eine Topologieoptimierung erstellt (Abschnitt 6.2.2). Die Topologieoptimierung (SIMP Methode, Abschnitt 6.2.3) ermöglicht anschließend eine einfache Abstraktion des Tragwerks, welche in einem parametrischen CAD Modell aufgesetzt wird. Darauf aufbauend variieren verschiedene Optimierungsalgorithmen die Parameter des Modells (Abschnitt 6.2.4) und nähern sich so dem leichtesten Design unter der Berücksichtigung einer maximalen Verschiebung.

6.2.1 3D-Aufnahmen mittels CLSM

Wie in Abschnitt 6.1.1 aufgezeigt wird das biologische Vorbild zunächst für die Verwendung im CLSM vorbereitet. Die Proben, welche in Formaldehyd gelöst vorliegen, müssen hierfür zunächst gereinigt werden. Durch fünfmaliges Zentrifugieren, Abgießen, Auffüllen mit destilliertem Wasser und anschließendem Schütteln (im Folgenden „Waschen“ genannt) werden die Formaldehydreste entfernt. Anschließend werden die organischen Bestandteile der Schalen mit Hilfe von einfachem Haushaltsreiniger (verdünnt mit destilliertem Wasser im Verhältnis 1:10) entfernt. Durch ein ca. 20 minütiges Schütteln der Proben wird sichergestellt, dass der Reiniger alle Bereiche der Proben erreicht. Um den Reiniger wieder zu entfernen wird im Anschluss erneut der fünfmalige Waschvorgang mit destilliertem Wasser durchgeführt. Nachdem das restliche Wasser abgegossen wurde kann nun der Farbstoff eingebracht werden. Dieser kann ca. 40 Minuten lang unter Schüttelbewegungen einwirken. Es folgt erneut ein fünfmaliger Waschvorgang mit abschließender Zentrifugation. Die nun eingefärbte Probe wird mit wenig destilliertem Wasser auf einen Objektträger aufgebracht. Da das CLSM während des Scanvorgangs häufig das Objektiv verschiebt und so mechanische Störgrößen in den Scanvorgang einbringt, wird die Probe mit Glycerin fixiert, um ein Driften der Probe während der Aufnahme zu minimieren.

Nachdem die einzelnen Schichten der Probe aufgenommen wurden, wird das Bild zu einem dreidimensionalen Gebilde zusammengesetzt. Stellen, an denen der Farbstoff eine hohe Reflexion ergeben hat werden als helle (grüne) Punkte interpretiert, wohingegen Stellen, an denen kein Material vorhanden ist, und demnach keine Reflexion stattfindet, als schwarz

interpretiert werden. Es ergibt sich folglich ein unscharfes Bild der Diatomee. Mit Hilfe eines Histogramms (Anteilige Verteilung der Reflexionsgrade über das komplette Scanvolumen) kann der Schwellenwert bestimmt werden, ab welchem Grad der Reflexion das Modell als Volumen interpretiert werden soll. Abb. 6.14 zeigt die Ergebnisse der CLSM Aufnahmen und die Interpretation als Volumenmodell.

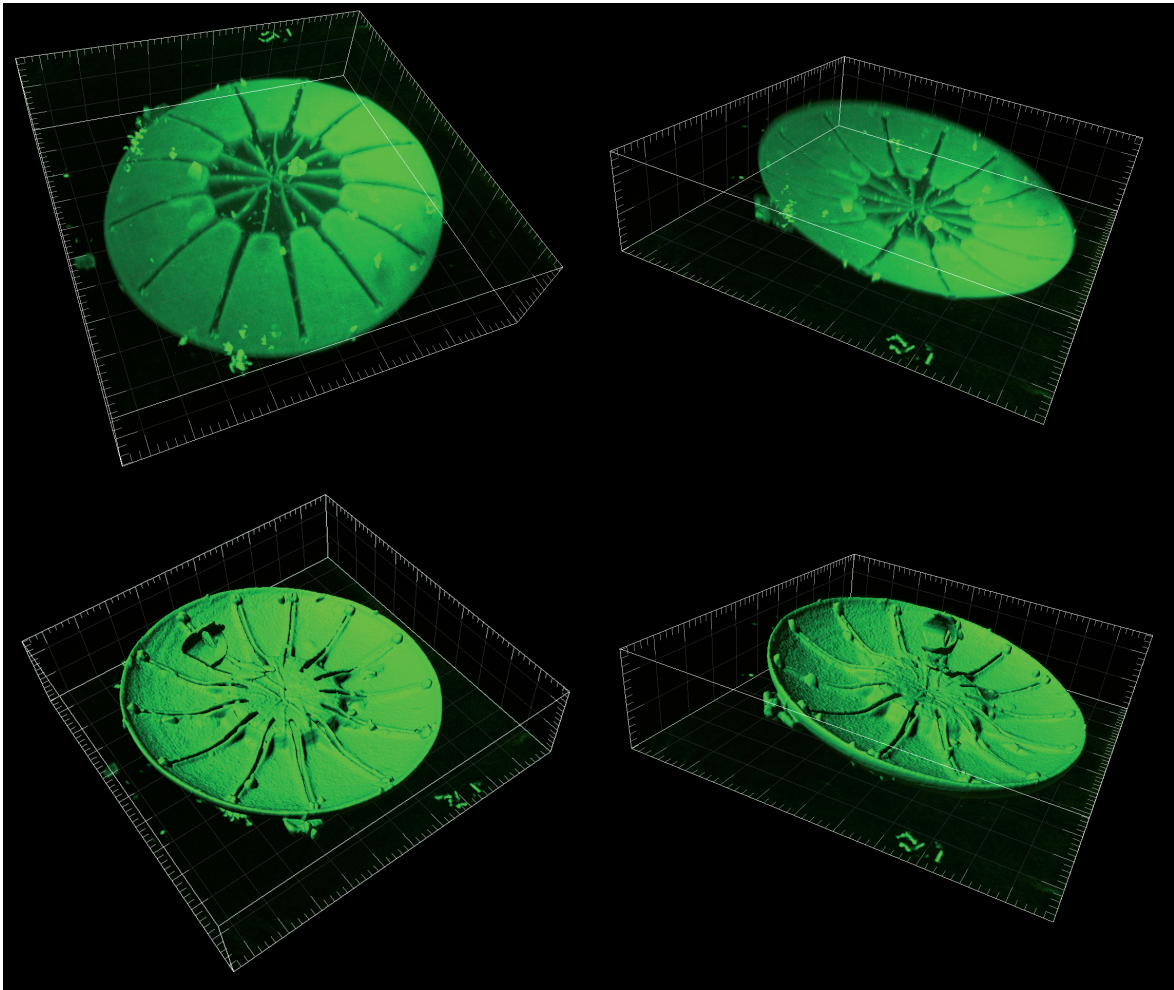


Abb. 6.14: CLSM Aufnahmen der Diatomee *Asterolampra sp.*. Oben: Reflexionsbild des Farbstoffs nach Anregung mit dem Laser; Unten: Volumenableitung nach Wahl eines Schwellenwertes

6.2.2 Aufbereitung der Punktwolke zum Bauraum

Die für die Bauraumdefinition notwendige Information aus der CLSM Aufnahme sind die Punkte (Koordinaten) an denen das biologische Vorbild Material aufweist. Nachdem die Punkte des biologischen Vorbildes in einem für FE-Programme lesbaren Format vorliegen, kann der Bauraum (DS) für das technische Bauteil zunächst einheitlich vernetzt werden. In diesem Beispiel wird der DS mit würfelförmigen Hexaeder-Elementen vernetzt. Anschließend wird die Punktwolke des biologischen Vorbildes in Form in das Modell geladen und entsprechend der

technischen Randbedingungen skaliert und ausgerichtet. Um die Zuweisung eines Elementes des DS zum späteren DSS+ oder DSS- zu berechnen wird in dieser Arbeit ein Datenbanktool verwendet, welches die nötigen Berechnungen ermöglicht. Die Realisierung erfolgt in Microsoft Access. Die wichtigsten Tabellen beinhalten hierbei alle Informationen über die Elemente des DS, sowie die Koordinaten des natürlichen Vorbildes. Über eine VBA Routine wird jedes Element des DS betrachtet und überprüft, ob sich in seinem Volumen oder in seiner Nähe (vgl. Abschnitt 6.1.2, in diesem Beispiel mit einem Grenzwert für den Abstand in Höhe der einfachen Elementgröße) ein Punkt des natürlichen Vorbildes befindet. Ist dies der Fall wird das jeweilige Element zum DSS+ zugewiesen und die Schleife wird beim nächsten Element fortgesetzt. Nachdem die Zuweisung für alle Elemente erfolgt ist, kann das Ergebnis über die PROP (Elementeigenschaften) Einträge jedes einzelnen Elementes in einem NASTRAN Deck abgespeichert werden (siehe Abb. 6.15) und für das Pre-Processing in einem FE-Programm geöffnet werden.



Abb. 6.15: Darstellung des Bauraumes (DSS+) auf Basis von *Asterolampra sp.*, welcher mit Hexaederelementen vernetzt wurde.

6.2.3 Topologieoptimierung

Der aufbereitete DSS+ wird anschließend in Altair HyperWorks für die Topologieoptimierung nach der SIMP Methode überführt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Der Lastfall, welcher Grundlage für die Leichtbauoptimierung ist, besteht aus einer einzelnen Kraft, welche mittig auf die Außenseite der Diatomeenvalve aufgebracht wird. Der äußere Rand der Valve wird fest eingespannt (Verschiebung in x-, y- und z-Richtung verboten). Für eine konzeptionelle Optimierung des Tragwerks wird zunächst nicht die Masse minimiert, da noch kein Grenzwert für die maximale Verschiebung des Kraftangriffpunktes bestimmt ist. Für erste Konzepte eignet sich vielmehr die Vorgabe des Anteils von Material, welches maximal bestehen bleiben darf und die anschlie-

ßende Maximierung der Steifigkeit des Systems (Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit). Hierzu wird der Volumenanteil vorgegeben. Abb. 6.16 zeigt das Topologieoptimierungsergebnis innerhalb des DSS+ mit einem Restvolumen von 10% des ursprünglichen Bauraumes.

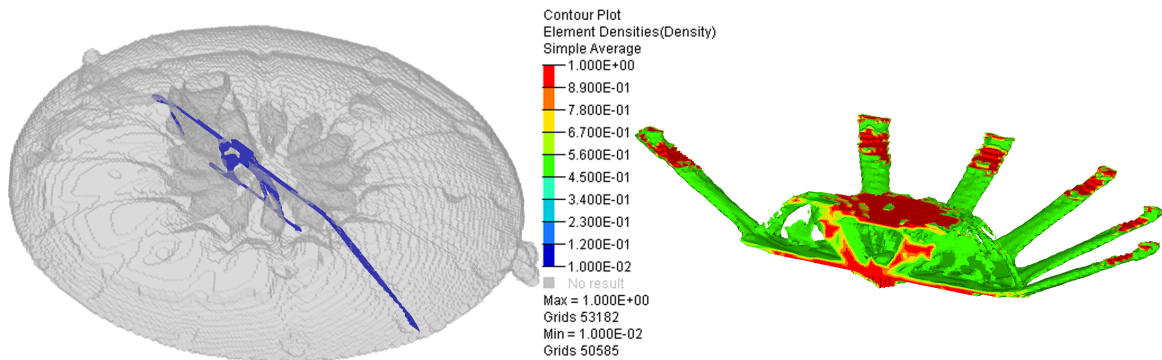


Abb. 6.16: Topologieoptimierung mit 10% Restvolumen des Bauraumes und minimierter mittlerer Nachgiebigkeit. Links: Schnitt (blau) durch den DSS+; Rechts: Farbliche Darstellung der Elementdichte

Wie in Abb. 6.16 zu erkennen, bildet sich ein flächiges Tragwerk aus, welches mit Streben gestützt wird. Mit Hilfe einer Geometrierückführung ins CAD Programm kann anschließend das Konzept zu einer parametrischen CAD Konstruktion abstrahiert werden. In diesem Beispiel wird das CAD Modell mit insgesamt sechs Parametern (siehe Abb. 6.17) konstruiert. Die Parameter umfassen die Dimensionierung aller Balkenquerschnitte, die Dicken der beiden Flächen, sowie die Anzahl der Streben. Eine Übersicht über die gültigen Bereiche der Parameter ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

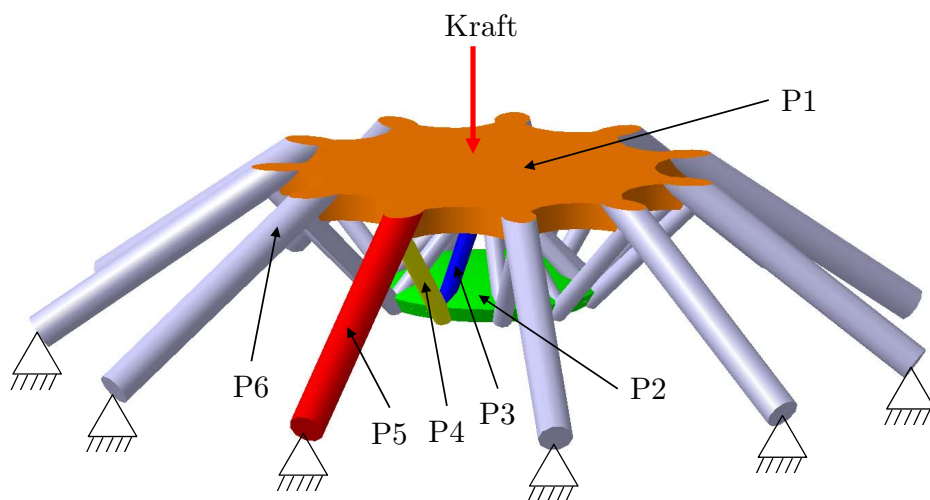


Abb. 6.17: Lastfall des abstrahierten parametrischen Modells

Tab. 6.2: Parameter des abstrahierten Modells

Parameter	Bedeutung	Typ	Grenzen
P1	Flächendicke	kontinuierlich	1 mm bis 4 mm
P2	Flächendicke	kontinuierlich	1 mm bis 4 mm
P3	Radius	kontinuierlich	0,5 mm bis 2 mm
P4	Radius	kontinuierlich	0,5 mm bis 2 mm
P5	Radius	kontinuierlich	0,5 mm bis 2 mm
P6	Anzahl	diskret	6 bis 20

6.2.4 Parametrische Optimierung

Das parametrische CATIA Modell wird über eine bidirektionale Schnittstelle⁴ mit dem FE-Programm ANSYS verbunden, sodass neue Geometrien, welche sich aufgrund von Parameteränderungen (vgl. Tab. 6.2) innerhalb einer Optimierungsschleife ergeben, von ANSYS direkt erzeugt werden können. Das Modell wird an allen äußeren Stabflächen fest eingespannt und in der Mitte der oberen Fläche mit einer Einzelkraft orthogonal zu der Fläche belastet. Als Ergebnis der FE-Analyse wird die maximale Durchbiegung im Kraftangriffspunkt ausgewertet, sowie die jeweilige Masse der Konstruktion. Des Weiteren wird eine maximale Verschiebung am Kraftangriffspunkt von $1 \cdot 10^{-5}$ mm vorgegeben. Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Masse. Abb. 6.18 zeigt den Aufbau der Optimierungsschleife in der ANSYS Workbench. Ausgehend von der statisch-mechanischen Analyse werden die Parameter, sowie die Masse und die Verschiebung als Parametersatz erzeugt. Auf diesem Parametersatz kann der Optimierer (Dynardo OptiSLang⁵) die Analysen durchführen.

Wie in Abschnitt 3.4 aufgezeigt, wird zunächst eine DoE durchgeführt. Hierfür wird das Latin Hypercube Verfahren verwendet, welches 200 Stützstellen berechnet, die möglichst gut den Designraum repräsentieren. Mit Hilfe der Ergebnisse der DoE wird anschließend eine Response Surface (RS) erzeugt. Die Qualität der statistischen Antwortfläche wird mit geeigneten Methoden überprüft. In diesem Beispiel beträgt der globale Prognosekoeffizient 98%, was eine qualitativ ausreichende RS verspricht. In Abb. 6.19 ist exemplarisch die dreidimensionale Teil-Antwortfläche für die Parameter P5 und P6 dargestellt. Es wird deutlich, dass ein geringer Radius P5, sowie eine geringe Strebenanzahl P6 zu einer geringen Masse führen.

⁴CADNexus Schnittstelle, siehe www.cadnexus.com (Abruf 18.08.2014)

⁵<http://www.dynardo.de/software/optislang.html>, Abruf 12.01.2015

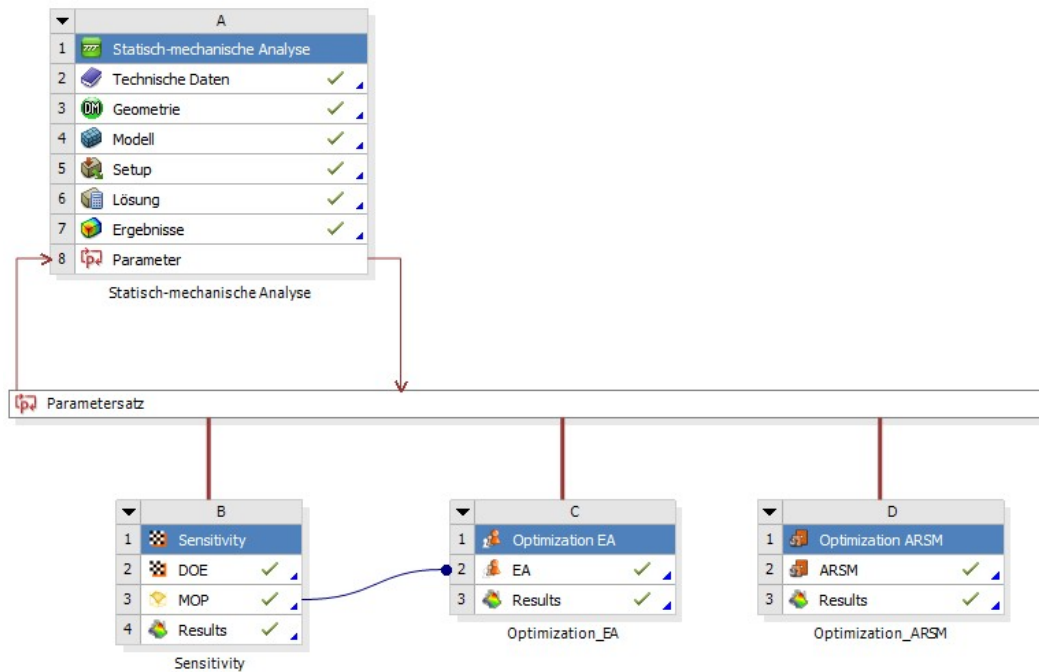


Abb. 6.18: Übersicht der parametrischen Optimierung in ANSYS

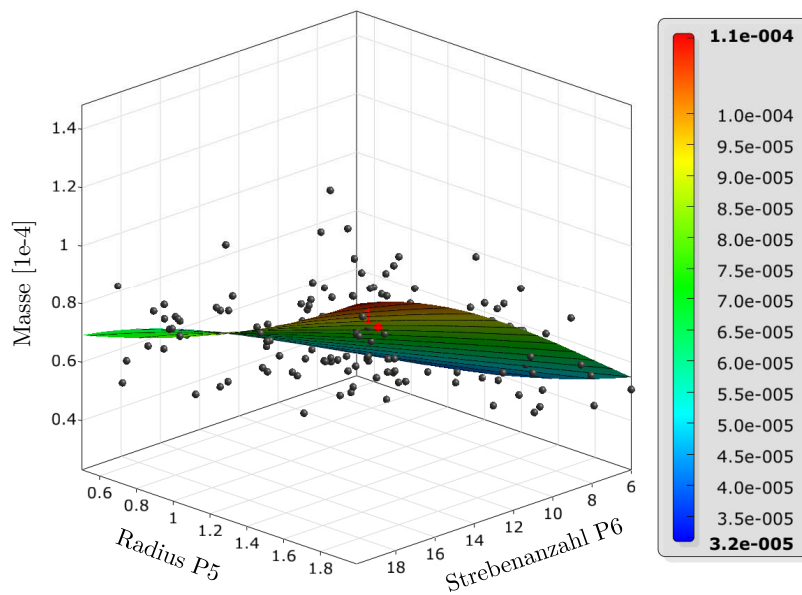


Abb. 6.19: Response Surface (RS) zeigt den Zusammenhang zwischen Masse, Strebenanzahl (P6) und Radius der äußeren Streben (P5) mit einem Prognosekoeffizient von 98%.

Die reale Antwortfläche ist ein multidimensionales Gebilde, welches hier nicht visualisiert werden kann, weshalb eine Sensitivitätsanalyse auf Basis der RS erstellt wird. Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht eine statistische Auswertung aller Parameter und deren Einfluss auf die Zielgrößen Masse und Verschiebung. In Abb. 6.20 ist das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Die erste Zeile beschreibt den Einfluss der Parameter auf die Zielgröße Masse.

Die zweite Zeile beschreibt den Einfluss der Parameter auf die Zielgröße Verschiebung. Die Spalten zeigen jeweils die Werte der einzelnen Parameter. Die rechte Spalte (gesamt) zeigt den aufsummierten Prognosekoeffizienten, welcher in diesem Beispiel mit 98% ausreichend genau ist. Betrachtet man z. B. den Parameter P6, so zeigt sich, dass dieser die Masse des Bauteils zu 43% bestimmt und die Verschiebung zu 42%. Dies bedeutet, dass der Parameter P6 der einflussreichste Parameter des Modells ist. Parameter P5 bestimmt zu 40% die Verschiebung, hat jedoch nur zu 27% einen Einfluss auf die Masse des Bauteils. Ein interessanter Parameter ist P4, da dieser keinen Einfluss auf die Verschiebung hat, jedoch zu 9% die Masse bestimmt. Er sollte folglich möglichst klein gewählt werden. Graue Felder (wie bei der Verschiebung von P1 und P3) bedeuten, dass hier kein Einfluss vorhanden ist und für eine spätere Optimierung nicht beachtet werden muss.

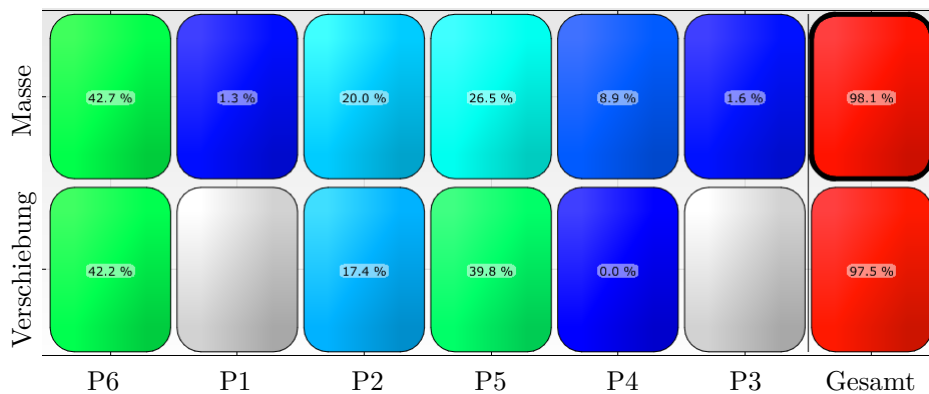


Abb. 6.20: Sensitivitätsanalyse zeigt den statistischen Einfluss der Parameter auf die Zielgrößen Masse und Verschiebung

Nachdem die RS, sowie die Sensitivitätsanalyse erstellt wurde, wird eine 10,10 Evolutionsstrategie (ES) auf der Basis der RS durchgeführt. Der Verlauf der Optimierung über 400 Generationen ist in Abb. 6.21 dargestellt. Die horizontale Achse stellt hierbei die Iterationsschritte dar, auf der vertikalen Achse ist das Zielkriterium (Masse) aufgetragen. Gut erkennbar ist der Anstieg der Masse zu Beginn, da die Grenze der Verschiebung nicht erreicht wird. Ab ca. der 50. Iteration fängt dann die Masse an im Mittel langsam zu sinken. Für eine Evolutionsstrategie typisch ist der zackige Verlauf, welcher auf die zufallsgesteuerte Parameterwahl zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 3.4.3).

Im Anschluss an die ES, welche auf der RS durchgeführt wurde, wird das optimale Design am richtigen FE-Modell validiert. Hierbei kommt es im Regelfall zu Abweichungen, je nach Qualität der RS. Für den Fall, dass das Zielkriterium (maximale Verschiebung) im realen FE Modell nicht eingehalten wird, kann eine Vorgabe einer noch geringeren Durchbiegung als Grenze Abhilfe schaffen, falls der validierte Wert anschließend die ursprüngliche Grenze nicht überschreitet.

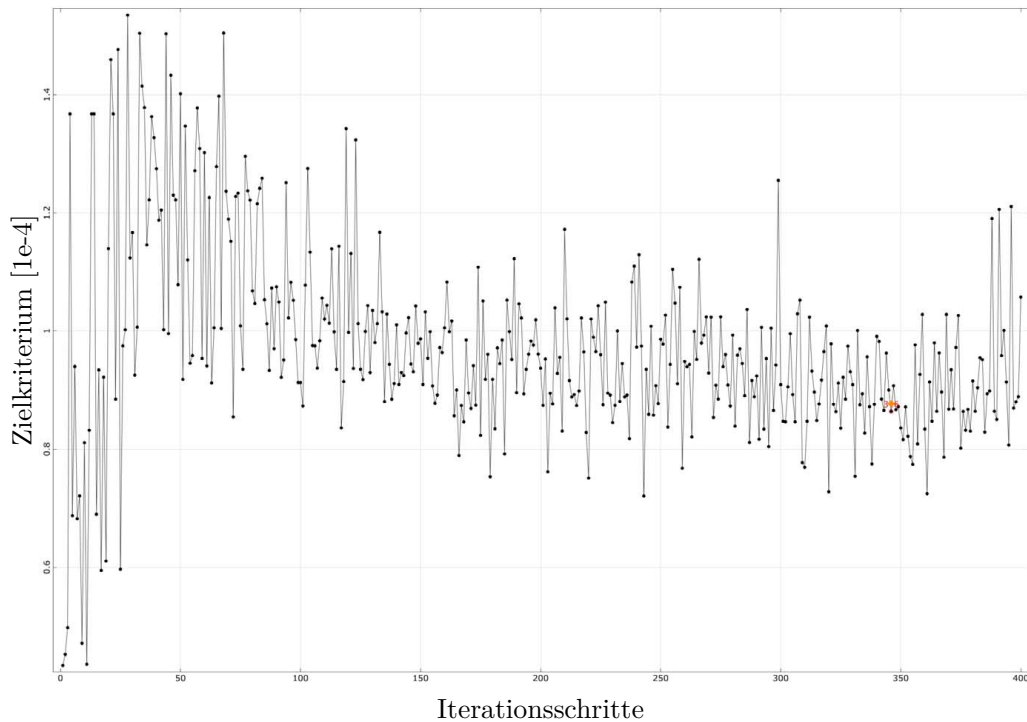


Abb. 6.21: Evolutionsstrategie als Optimierungsalgorithmus auf Basis der RS. Bestes Design gefunden bei der 346. Iteration

In diesem Beispiel wird als weiterführender Optimierungsschritt eine Adaptive Response Surface Methode (ARSM) durchgeführt. Diese vorrangig lokale Optimierungsmethode wird im Bereich des globalen Optimums, welches zuvor mit der Evolutionsstrategie gefunden wurde, angewendet. Hierzu wird der ARSM das optimale Ergebnis der EA als Startwert vorgegeben. Ausgehend von diesem Startwert wird eine DoE erstellt, welche den Startwert als Mittelpunkt besitzt. Auf der lokalen RS, welche hieraus resultiert, wird das Optimum gesucht. Mit diesem lokalen Optimum als Mittelpunkt wird erneut eine DoE und eine lokale RS berechnet. Je nachdem wie nah die beiden Optima zwischen zwei Iterationen sind, desto kleiner oder größer wird der Versuchsraum bei der nächsten Iteration gewählt. Weiterführende Informationen zur ARSM finden sich bei Etman u. a. (1996) und Stander u. Graig (2002).

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Es wird deutlich, dass durchaus unterschiedliche Variationen der Parameter ähnliche Leistungskennzahlen erreichen können. Das mittels EA gefundene Design besteht beispielsweise aus 14 Streben, wohingegen die ARSM Methode ein geringfügig leichteres Optimum mit 18 Streben vorschlägt. Die beiden finalen Designs sind in Abb. 6.23 dargestellt und können nun als Konzepte für ein von der Natur inspiriertes Flächentragwerk genutzt werden.

Tab. 6.3: Optimierte Parameterwerte des abstrahierten Modells aus unterschiedlichen Optimierungsverfahren

Parameter	Ergebnis EA auf RS	Ergebnis ARSM
P1	1,00 mm	1,85 mm
P2	3,22 mm	2,86 mm
P3	0,85 mm	1,13 mm
P4	1,54 mm	1,01 mm
P5	1,66 mm	1,41 mm
P6	14	18
Verschiebung	$9,87 \cdot 10^{-6}$ mm	$9,95 \cdot 10^{-6}$ mm
Masse	0,088 kg	0,085 kg

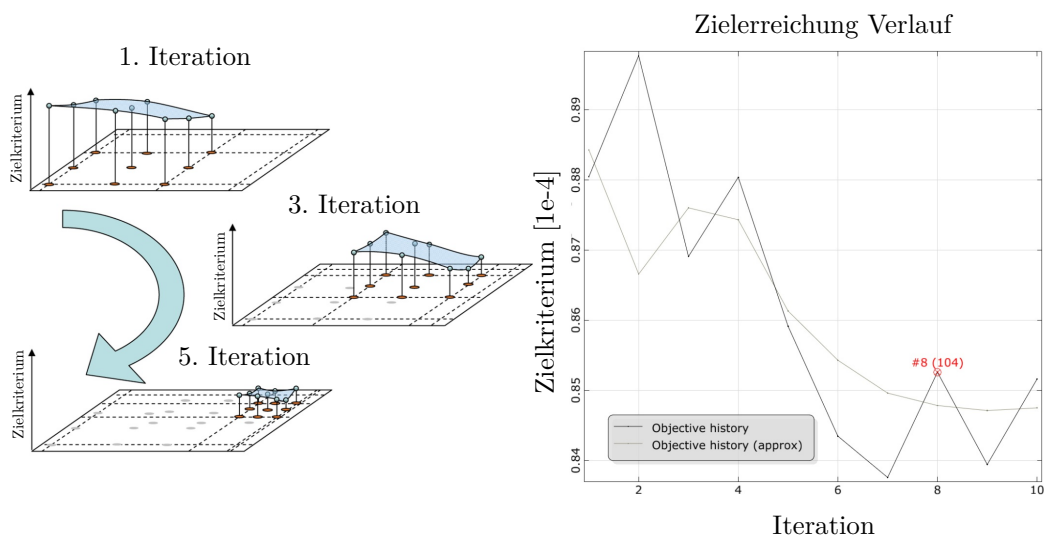


Abb. 6.22: Links: Anpassung der lokalen RS innerhalb der ARSM Methode nach (Dynardo GmbH, 2013, S. 26); Rechts: Verlauf der ARSM als Optimierungsalgorithmus mit Startwert des besten Designs der Evolutionsstrategie

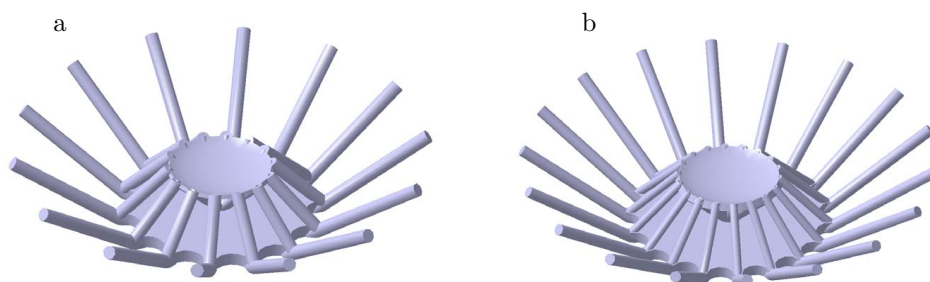


Abb. 6.23: a) Ergebnis der Optimierung mittels RS und EA; b) Ergebnis der Optimierung mittels ARSM und Startwert aus der EA von a)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die in diesem Kapitel aufgezeigten Arbeitsschritte zum systematischen Transfer biologischer Bauprinzipien auf beliebige Fragestellungen und biologische Vorbilder adaptiert werden können, sodass ein Vorgehen im Sinne des Arbeits-

schrittes 4 (vgl. Abb. 4.1) aufgezeigt werden konnte, welches die biologischen Bauprinzipien systematisch auf technische Fragestellungen transferiert. Die parametrische Optimierung ermöglicht anschließend die finale Anpassung des Konzeptes an den technischen Lastfall im Sinne des Arbeitsschrittes 5.

Das in diesem Abschnitt aufgezeigte und stark vereinfachte Beispiel eines einfachen Flächentragwerks zeigt die grundsätzliche Umsetzungsmöglichkeit der beschriebenen Vorgehensweise. Im nun folgenden Kapitel 7 werden sowohl die Methoden und Hilfsmittel des Wissensspeichers, der funktionalen Ähnlichkeitssuche, sowie auch die Transfermethoden dieses Kapitels anhand eines realistischen und komplexen Beispiels im Detail angewendet, um die erarbeiteten Anpassungen und Ergänzungen der systematischen Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach Klein (2013) für eine Berücksichtigung der Konstruktionsweisen biologischer Vorbilder umfassend evaluieren zu können.

7

Anwendung am Beispiel einer Offshore Gründungsstruktur für Windenergieanlagen

Die Auslegung von Gründungsstrukturen für Windkraftanlagen ist eine der größten Herausforderungen in der Offshore-Windindustrie. Dabei ist neben Standortfaktoren wie Wassertiefe, Seegang und Beschaffenheit des Meeresgrundes vor allem auch die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus ist die Förderung nachhaltiger Gründungsstrukturen beim Ausbau der regenerativen Energien erstrebenswert. Leichtbau kann hierbei den Materialeinsatz verringern und fördert damit gleichermaßen Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit (Lesny, 2009). Je nach Wassertiefe werden aktuell verschiedene Typen von Gründungsstrukturen eingesetzt:

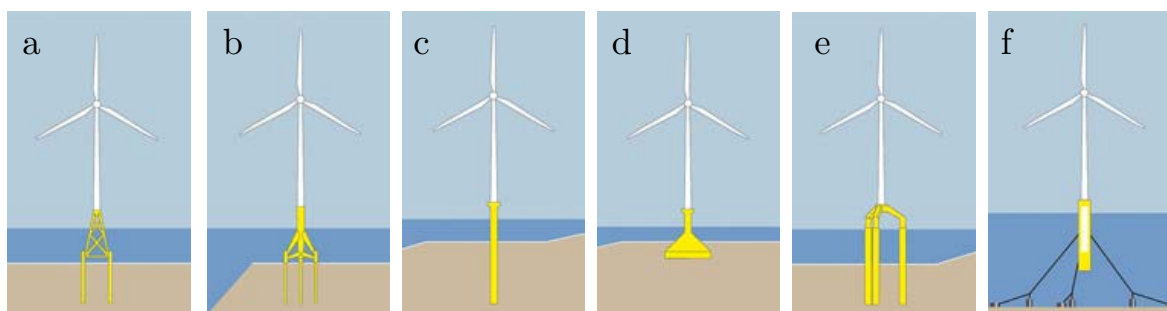


Abb. 7.1: Darstellung aktueller Offshore Gründungsstrukturen für unterschiedliche Wassertiefen und Anlagengrößen. **a)** Jacket **b)** Tripod **c)** Monopile **d)** Schwergewichtfundament **e)** Tripile **f)** Schwimmendes Fundament (Quelle: <http://www.offshore-windenergie.net/technik/fundamente>, Abruf 10.09.2013)

Jackets, welche vierbeinige fachwerkartige Stahlkonstruktionen darstellen, werden bei Wassertiefen von ca. 30 m eingesetzt. Ein Vorteil dieses Strukturtyps ist die Verwendbarkeit in relativ großen Wassertiefen. Tripods werden im Bereich von 20 bis 80 m Wassertiefe eingesetzt und sind v.a. für ebene Meeresböden geeignet. Die sehr einfach gebauten Monopiles sind einfach zu installieren, eignen sich jedoch nur bedingt in Wassertiefen größer als 20 m. Schweregewichtsrundungen werden bei tragfähigen, steinigen Böden verwendet. Tripiles werden von 25 bis 50 m Wassertiefe eingesetzt und können aufgrund ihrer einfachen Konstruktion individuell auf den Standort angepasst werden. Bucket-Fundamente oder auch Saugpfähle stellen sehr kostengünstige Fundamente dar, mit einem ebenso einfachen Rückbau. Ihr Einsatzbereich ist in Wassertiefen um ca. 40 m. Schwimmende Fundamente können sehr einfach schwimmend zum Einsatzort transportiert werden und eignen sich für sehr große Wassertiefen.

Für das Anwendungsbeispiel in dieser Arbeit sollen Wassertiefen im Bereich von 20 bis 40 m betrachtet werden und somit Tripodstrukturen untersucht werden. Die ersten Tripodstrukturen wurden 2006 in Bremerhaven von der Firma WeserWind GmbH¹ gebaut (siehe Abb. 7.2).



Abb. 7.2: Tripod-Fundamente auf der ABC-Halbinsel in Bremerhaven

Im folgenden Kapitel soll die systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau, welche in dieser Arbeit entwickelt wurde (vgl. Abb. 7.3), angewandt werden. Entsprechend der dritten Arbeitsthese (vgl. Abschnitt 4.1) soll überprüft werden, ob die Übertragung von Bauweisen aus der Biologie zu technischen Konstruktionen zu leistungsfähigen Leichtbaukonstruktionen führt und in der angepassten Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens umgesetzt werden kann.

¹siehe auch <http://www.weserwind.de/de/produkte/offshore-fundamente.html>, Abruf 29.08.2013

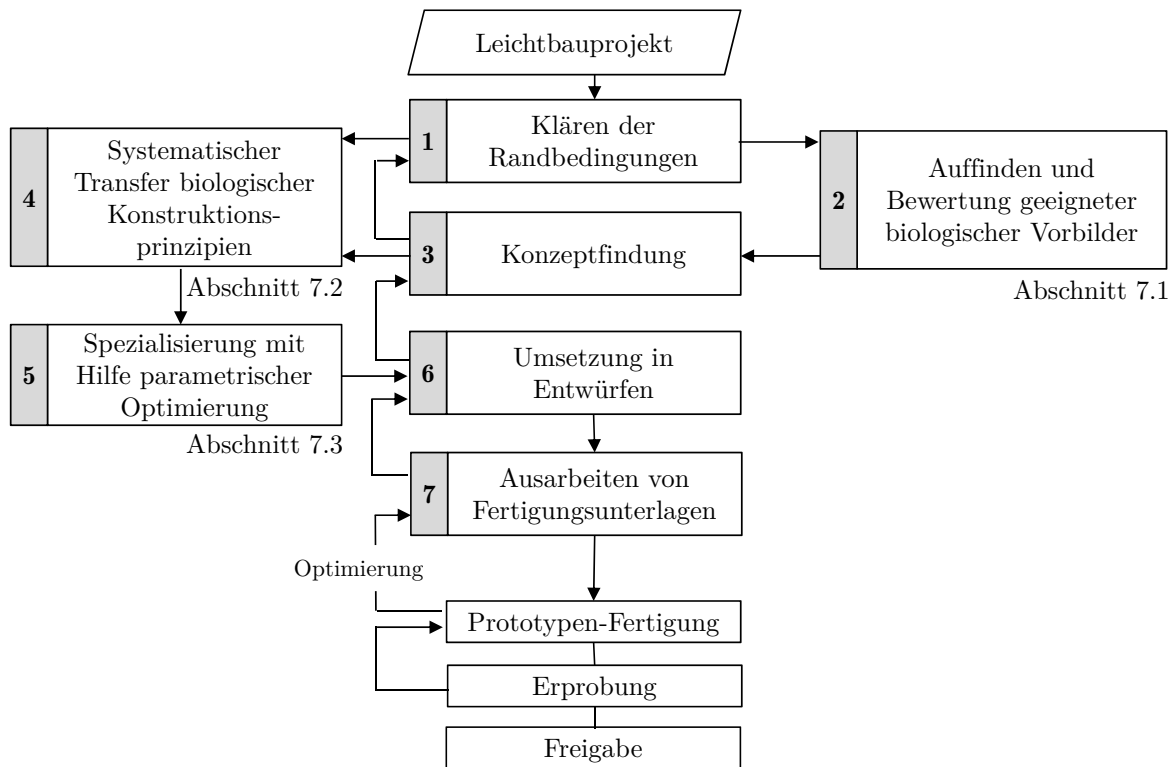


Abb. 7.3: Systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau nach dem Vorbild von marinen Planktonorganismen (vgl. Abb. 4.1)

Der erster Arbeitsschritt (Klären der Randbedingungen) erfolgt im Rahmen eines Lastenhefts, welches für die Auslegung einer 5 MW Offshore Gründungsstruktur für den Standort „Alpha Ventus“ geeignet ist (siehe Tab. 7.1). Im Anschluss werden entsprechend dem Arbeitsschritt 2 in Abschnitt 7.1 aus einem Pool von Vorbildern, welche innerhalb des Wissensspeichers abgelegt sind, diejenigen mittels funktionaler Ähnlichkeitssuche ausgewählt, welche als Vorbilder für eine Gründungsstruktur in Frage kommen. Die Konzepte werden entsprechend Arbeitsschritt 3 von den ebenfalls im Wissenspeicher hinterlegten dreidimensionalen Scandaten der biologischen Vorbilder erstellt. Anschließend werden in Abschnitt 7.2 diejenigen Bereiche abgeleitet, welche als Designraum für einen systematischen Transfer der Konstruktionsprinzipien mit Hilfe der in Abschnitt 6.1 entwickelten Topologieoptimierung dienen (Arbeitsschritt 4). Die so erhaltenen Bauprinzipien werden entsprechend Arbeitsschritt 5 mit parametrischen Balkenkonstruktionen umgesetzt und mit Hilfe der in Abschnitt 3.4 aufgezeigten Optimierungsalgorithmen weiter auf den Lastfall spezialisiert. Entsprechend Arbeitsschritt 6 werden die spezialisierten Konzepte schlussendlich in Abschnitt 7.4 zu einer finalen bionischen Gründungsstruktur ausgearbeitet.

Ziel dieses Kapitels ist die Überprüfung der dritten Arbeitsthese (siehe Abschnitt 4.1), dass die Übertragbarkeit von Bauweisen aus der Biologie zu technischen Konstruktionen zu leistungsfähigen Leichtbaukonstruktionen führt und in der angepassten Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens umgesetzt werden kann.

7.1 Auffinden und Bewertung geeigneter biologischer Vorbilder

Für die Auswahl passender biologischer Vorbilder für eine Konstruktion einer Gründungsstruktur wird entsprechend Arbeitsschritt 2 (vgl. Abb. 7.3) die in Abschnitt 5.2 dargestellte funktionale Ähnlichkeitssuche angewendet. Zunächst wird hierfür das FE-Modell des aktuellen Tripods analysiert und diejenigen Wirkflächen ausgewählt, die in das System Kräfte ein- oder ausleiten (vgl. Abb. 7.4). Da es sich in diesem Fall bereits um ein FE-Modell der Gründungsstruktur handelt, können die Wirkflächen sehr einfach extrahiert werden, indem diejenigen Elemente des Tripods gelöscht werden, welche nicht Teil einer Wirkfläche sind. Das FE-Modell besitzt anschließend folglich nur noch vier ringförmige Flächen, welche aus finiten Elementen inkl. Punkten bestehen.

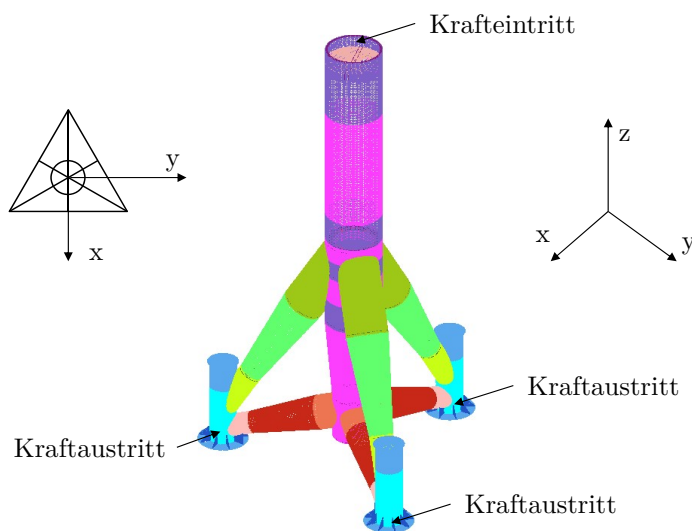


Abb. 7.4: Wirkflächen des originalen Tripod-Fundaments

Das Ergebnis der Vorbereitung des technischen Problems ist eine Textdatei mit den Elementknoten (x -, y - und z -Koordinaten) der vernetzten Wirkflächen des Tripods. Da im Wissensspeicher bereits eine Vielzahl von biologischen Vorbildern und deren Wirkflächen hinterlegt sind, kann die funktionale Ähnlichkeitssuche im Anschluss durchgeführt werden. Insgesamt werden für dieses Anwendungsbeispiel 16 biologische Vorbilder betrachtet und deren funktionale Ähnlichkeit mit der Tripodstruktur untersucht. Die ausgewählten Strukturen setzen sich sowohl aus Diatomeen sowie auch aus Radiolarienstrukturen zusammen und sind in Abb. 7.5 dargestellt.

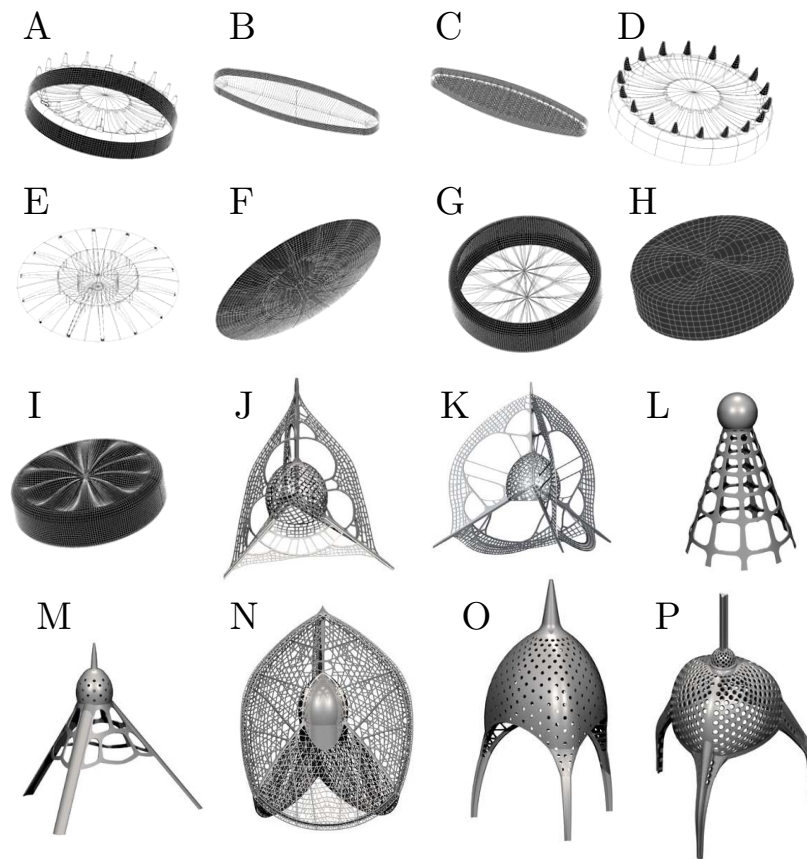


Abb. 7.5: Exemplarische Diatomeen und Radiolarienstrukturen innerhalb des Wissensspeichers als Datenbasis für die funktionale Ähnlichkeitssuche: **A** *Stephanodiscus niagarae* (Gürtelband), **B** *Plagiodiscus nervatus* (Gürtelband), **C** *Fragilariopsis kerguelensis* (Gürtelband), **D** *Stephanodiscus niagarae* (Hörner), **E** *Asterolampra marilandica* (Hörner), **F** *Asterolampra marilandica* (Valve), **G** *Actinoptychus heliopelta* (Gürtelband), **H** *Actinoptychus heliopelta* (3 Ondulationen), **I** *Actinoptychus heliopelta* (10 Ondulationen), **J** *Clatrocorys murrayi* (4 Punkte), **K** *Clathrocorys teuscheri* (4 Punkte), **L** *Peripyramis circumtexta* (9 Punkte), **M** *Dictyophimus plectaniscus* (4 Punkte), **N** *Callimitra carolotae* (4 Punkte), **O** *Pteroscenium pinnatum* (4 Punkte), **P** *Pterocanium charybdeum* (4 Punkte)

Das Ergebnis der funktionalen Ähnlichkeitssuche unter Verwendung des euklidischen Distanzmaßes ist in Abb. 7.6 dargestellt. Deutlich erkennbar positioniert sich der Tripod zwischen den beiden Gruppen der Radiolarien. Die erste Gruppe (K, L und N) ist funktional dem Tripod am ähnlichsten. Obwohl *Peripyramis circumtexta* (Struktur L) mit neun Wirkflächen im unteren Bereich dem Tripod eher unähnlich erscheint, wird dieses Vorbild, wie in Abschnitt 5.2.4 diskutiert, als mögliches Vorbild gewertet. Von den neun Wirkungspunkten treffen drei sehr gut auf das Anforderungsprofil des Tripods zu. Die übrigen sechs Funktionspunkte werden nicht negativ gewichtet, was zu einer funktional ähnlichen Struktur führt. Die zweite Gruppe der Radiolarien (J, M, O und P) gruppiert sich ebenfalls zu funktional ähnlichen Vorbildern, wohingegen Vorbild M (*Dictyophimus plectaniscus*) und O (*Pteroscenium pinnatum*) dem Tripod ähnlicher erscheinen als J (*Clatrocorys murrayi*) und P (*Pterocanium charybdeum*). Die

zwei Gruppen von Diatomeen (Gruppe 1: B, C, F, H, I und Gruppe 2: A, D, E, G) stellen sich funktional unähnlicher dem Tripod dar, wohl aber sehr ähnlich untereinander. Basierend auf dem Ergebnis der funktionalen Ähnlichkeitssuche werden im Folgenden die beiden Gruppen der Radiolarien als mögliche Vorbilder für die Offshore-Gründungsstruktur näher betrachtet.

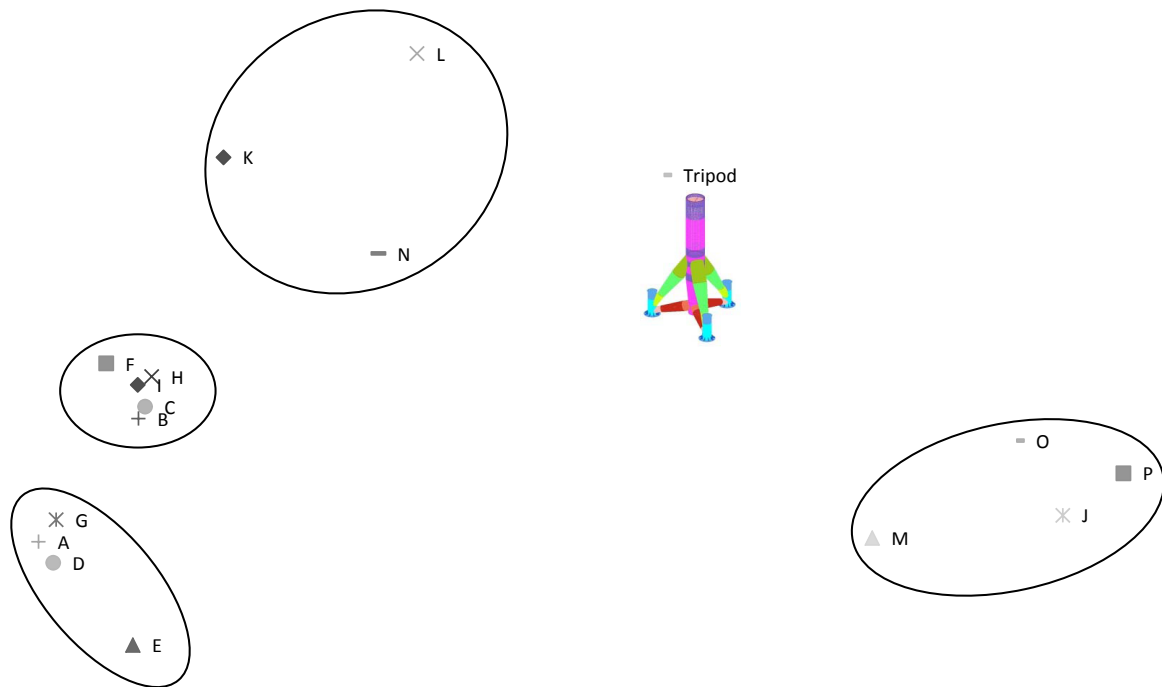


Abb. 7.6: Ergebnis der funktionalen Ähnlichkeitssuche mit Euklidischen Distanzmaß. Die Codierung der einzelnen Strukturen (A-P) ist in Abb. 7.5 dargestellt

7.2 Systematischer Transfer der biologischen Konstruktionsprinzipien

Die sieben Radiolarien (J-P) werden zunächst mit einem vereinfachten Lastfall untersucht um die Eigenschaften der Strukturen besser einschätzen zu können und eine sinnvolle Bau-raumaufdickung zu definieren. Der vereinfachte Lastfall ist eine feste Einspannung an den unteren drei Füßen, sowie eine vertikal wirkende Kraft am oberen Wirkpunkt (Turmanschluss). Entsprechend des Arbeitsschrittes 4 (vgl. Abb. 7.3) werden die biologischen Vorbilder wie in Abschnitt 6.1.2 dargestellt mit Hilfe der SIMP-Methode bezüglich des einfachen Lastfalls abstrahiert. Die Randbedingungen der SIMP-Methode sind hierbei eine Minimierung der Masse bei einer maximal erlaubten Verschiebung von 150 mm am oberen Turmanschluss. Der Bauraum wird jeweils durch gleichgroße Solidelemente diskretisiert. Nachdem die natürlichen Vorbilder auf die Größe des Bauraumes skaliert wurden, wird mit Hilfe der Nächste-Nachbarn-Suche der jeweils geringste Abstand eines Elementes des Bauraumes zum biologischen Vorbild berechnet. Eine Variation des Grenzwertes für den Abstand beeinflusst die Aufdickung des Bauraumes, was in Abb. 7.7 anhand des Vorbildes *Clathrocorys teuscheri* (K) dargestellt ist.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Bauraumgrößen zeigen sinnvolle Designs bis zu einer Aufdickung welche ca. der vierfachen Elementgröße entspricht. Bei einer weiteren Vergrößerung des Bauraumes werden keine neuen Designs erzielt, da der Bauraum (bezüglich des Lastfalles) bereits dem vollen Bauraum entspricht und keine Geometrie des natürlichen Vorbildes den SIMP-Algorithmus einschränkt.

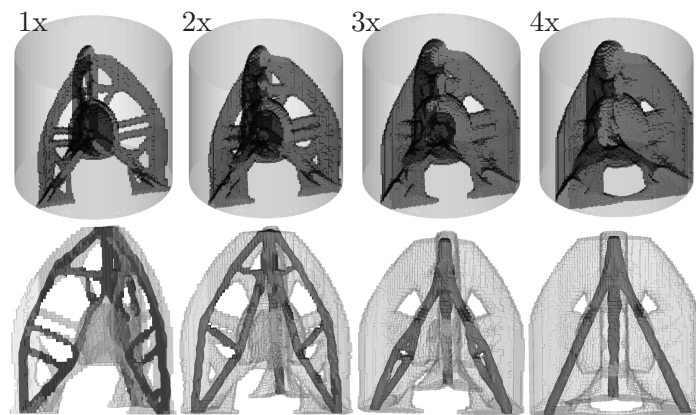


Abb. 7.7: Erste Reihe: Dreidimensionaler Bauraum des Vorbildes *Clathrocorys teuscheri* (schwarz) innerhalb des zylindrischen Vollraumes (grau) für verschiedene Grenzwerte bei der Bauraumaufdickung (ansteigend von der einfachen Elementgröße bis hin zur vierfachen Elementgröße); **Zweite Reihe:** Ergebnisse der SIMP-Optimierung innerhalb der jeweiligen natürlichen Bauräume

Wie in Abb. 7.7 gezeigt, versucht der mathematischen Algorithmus, den optimalen Kraftweg zu nutzen, wird jedoch zum Teil durch den durch die natürliche Struktur in eine bestimmte Richtung gelenkt. Abb. 7.8 zeigt die auf dem einfachen Lastfall basierenden Designprinzipien von allen Radiolarien mit jeweils unterschiedlich aufgedickten Bauräumen. Um einen Vergleich der verschiedenen Ergebnisse zu gewährleisten, müssen alle Konzepte das gleiche Volumen besitzen. Diese Einschränkung wird bereits beim Setup der Topologieoptimierung berücksichtigt. Die mit dem vereinfachten Lastfall erzeugten Designprinzipien für Gründungsstrukturen zeigen eine Vielzahl an Varianten.

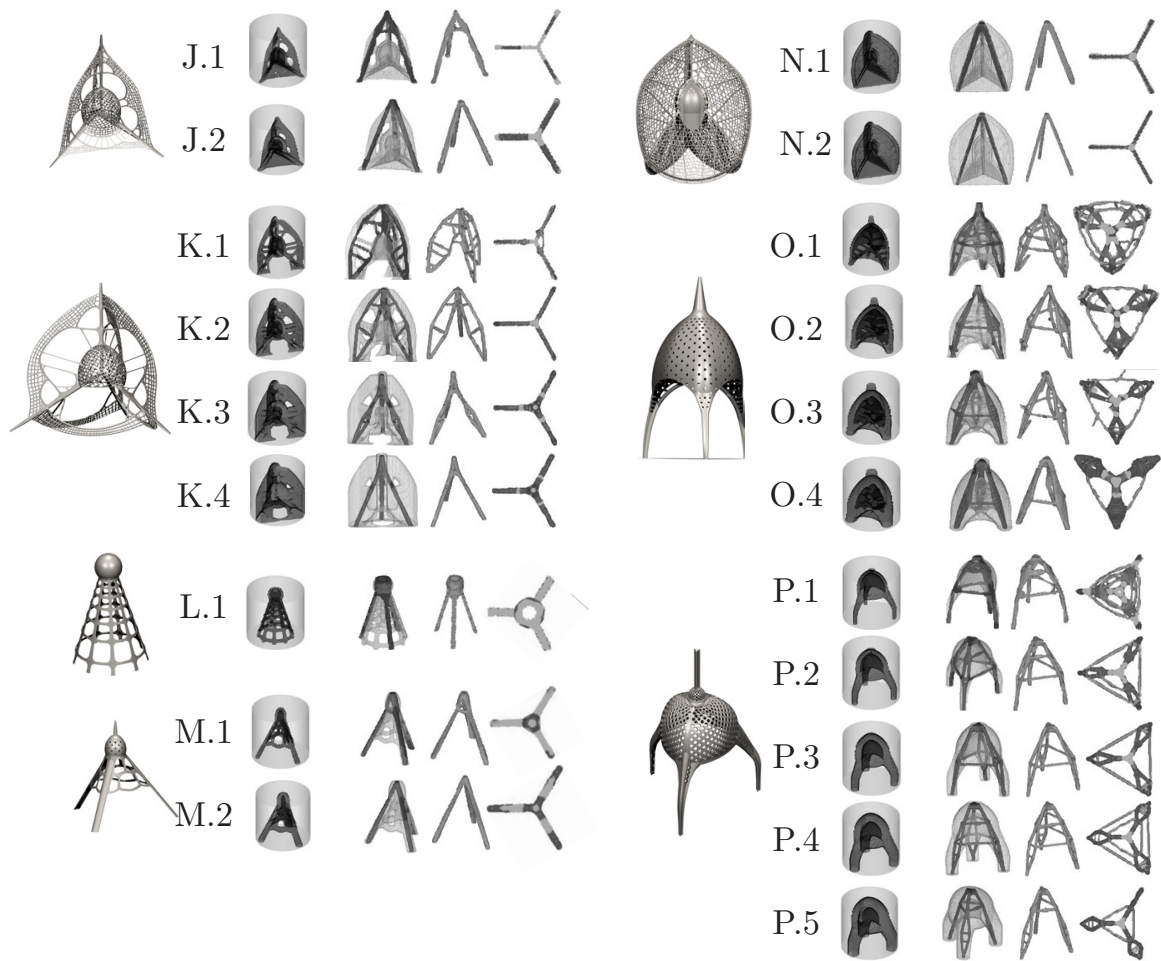


Abb. 7.8: Konstruktionsprinzipien der sieben verschiedenen natürlichen Vorbilder (J-P) mit aufgedicktem Bauraum von der einfachen Elementgröße (.1) bis hin zur 5-fachen Elementgröße (.5)

Die reale Gründungsstruktur wird neben dynamischen Wind- und Wellenlasten auch durch eine Modellierung der Bodenmechanik und der Simulation von Schiffskollisionen ausgelegt. Um die Komplexität im frühen Stadium des Konzeptentwurfes in einem sinnvollen Rahmen zu halten, soll in dieser Arbeit die statische Auslegung der Gründungsstruktur betrachtet werden, dessen Lastfälle von Areva Wind GmbH in Anlehnung an Richtlinien des Germanischen Lloyds, wie in Tabelle 7.1 qualitativ angegeben, definiert sind.

Unter Berücksichtigung der Lastfälle aus Tab. 7.1 wird die Topologieoptimierung mit Hilfe des SIMP-Ansatzes im Bauraum der Radiolarien J bis P durchgeführt. Um einen sinnvollen Vergleich der unterschiedlichen Konzepte zu ermöglichen wird das Volumen der Konzepte gleich gesetzt. Dies bedeutet, dass die Zielfunktion für den SIMP-Ansatz eine Volumenrestriktion beinhaltet, die abhängig vom natürlichen Bauraum ist. Ist beispielsweise Bauraum J klein gegenüber Bauraum N muss das Zielvolumen bei J größer sein als bei N um ein identisches Endvolumen der Konzepte zu erhalten. In Abb. 7.9 sind die Ergebnisse der Topologieoptimierung aller Radiolarien dargestellt. Deutlich sichtbar werden die durch das

Tab. 7.1: Qualitative Schnittlasten am Turmflansch auf einer Höhe von 16,6 m LAT für die Auslegung einer 5 MW Offshore Gründungsstruktur für den Standort „Alpha Ventus“. (Koordinatendefinition siehe Abb. 7.4)

	F_X [%]	F_Y [%]	F_Z [%]	M_X [%]	M_Y [%]	M_Z [%]
LC1	17,4	5,6	-94,2	-5,2	88,7	7,3
LC2	-10,1	7,1	-96,8	-14,8	-51,2	-6,1
LC3	7,4	-2,7	-94,6	29,1	36,7	1,0
LC4	1,2	14,1	-92,8	-54,1	8,1	2,3
LC5	20,5	4,0	-96,1	-1,6	100,0	5,3
LC6	-17,9	8,1	-94,7	-22,3	-85,7	-4,0
LC7	2,4	5,9	-88,7	-12,3	10,7	1,9
LC8	3,9	4,3	-100,0	-0,5	20,8	1,1
LC9	-6,7	15,9	-92,5	-53,2	-31,2	0,7
LC10	5,8	-3,6	-94,4	28,4	28,2	1,8

komplexe Lastkollektiv erzeugten „verzweigten“ Designs, welche im Gegensatz zum einfachen Lastfall (vgl. Abb. 7.8) insbesondere zur Aufnahme der Momente dienen.

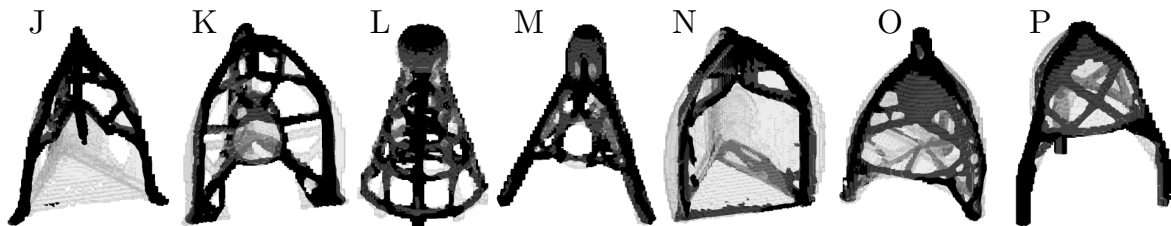


Abb. 7.9: Ergebnisse der Topologieoptimierung innerhalb des natürlichen Bauraumes der Radiolarien unter Berücksichtigung der Lastfälle LC1 bis LC10. Volumenrestriktion entsprechend der Forderung nach einheitlichem Endvolumen aller Konzepte: **J**) 20,5%, **K**) 18%, **L**) 23,8% , **M**) 28,8% , **N**) 10,1% , **O**) 10,3% , **P**) 16,6%

Die mit Hilfe der SIMP-Methode innerhalb des Bauraumes der Radiolarien erzeugten Konstruktionen sind (abhängig von dem gewählten Restvolumen und den Fertigungsrestriktionen) runde, massive Balkenkonstruktionen. Für eine Leichtbaukonstruktion ist es jedoch vorteilhaft Hohlquerschnitte zu verwenden, da diese ein höheres, gewichtsspezifisches Trägheitsmoment besitzen. Für die optimale Auslegung der generierten Konstruktionsprinzipien werden die Bauweisen daher in einfachen Balkentragwerken abstrahiert. Hierzu erfolgt eine Flächenrückführung der Topologieoptimierungsergebnisse ins CAD. Anschließend werden die Knotenpunkte mit einfachen Linien, welche später zu Balkenelementen umgewandelt werden können, verbunden. Für einfache Rohrquerschnitte reichen zwei Parameter aus, um die Eigenschaften des Rohres als Balkenelement zu definieren: Der Innenradius r_i , sowie der Außenradius r_a . Da es sich hierbei jedoch um abhängige Variablen handelt ($r_a \geq r_i$), wird die Rohrdicke t eingeführt, welche mit der Gleichung $r_a = r_i + t$ die Variablen voneinander unabhängig macht. Für die Optimierung kann folglich r_a und t verwendet werden. Da es

sich bei der Gründungsstruktur um ein rotationssymmetrisches Bauteil handelt, sollte diese Eigenschaft ebenfalls verwendet werden um die Parameteranzahl zu reduzieren.

7.3 Spezialisierung mit Hilfe parametrischer Optimierung

Die Parameteroptimierung wird an dieser Stelle exemplarisch anhand des Modells *Pterocanium charybdeum* (Struktur P) aufgezeigt, ist jedoch auf die anderen Modelle übertragbar. Dieser Arbeitsschritt entspricht dem 5. Schritt der systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau, wie in Abb. 7.3 aufgezeigt. Die in CATIA modellierten Linienmodelle der Ergebnisse der Topologieoptimierung werden zunächst im ANSYS DesignModeller importiert und zu Balkentragwerken mit Rohren umgebaut. Die Parametrisierung der Balkenmodelle erfolgt ebenfalls im ANSYS DesignModeller, wobei die aufgezeigte Vereinfachung durch die Einführung der Wandstärken getroffen wird.

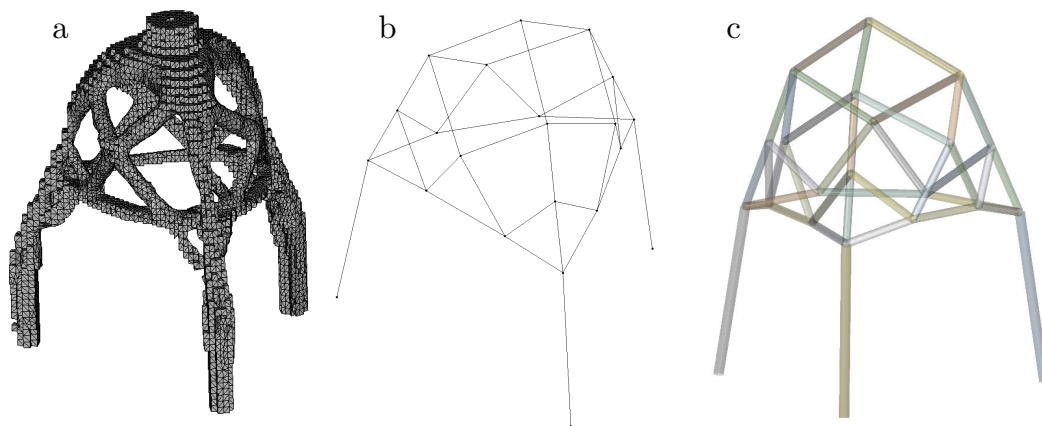


Abb. 7.10: Arbeitsschritte vom Ergebnis der Topologieoptimierung (a) über ein Linienmodell in CATIA (b) zum parametrisierten Balkenmodell in ANSYS (c)

Das Modell *Pteroscenium pinnatum* besitzt in diesem Beispiel acht verschiedene Rohrgeometrien und demnach 16 Designvariablen. Die 48 m hohe Gründungsstruktur soll kostengünstig mit Pipelinerohren als Zukaufteile realisiert werden. Dies erlaubt einen Rohrinne Durchmesser von $508 \text{ mm} \leq r_i \leq 1524 \text{ mm}$ und Wandstärken im Bereich $7 \text{ mm} \leq t \leq 40 \text{ mm}^2$. Für eine erste Auslegung wird vereinfacht die Wandstärke der unterschiedlichen Rohrquerschnitte mit 20 mm als konstant angenommen. Die Gesamtmasse der Gründung dient als zu minimierendes Optimierungsziel. Die maximale Verschiebung am Turmflansch wird für jeden der zehn Lastfälle (vgl. Tab. 7.1) als Grenzwert zu 150 mm gesetzt.

Für eine sinnvolle Parameteroptimierung werden zunächst ein Sensitivitätsanalyse und ein Versuchsplan (DoE) mit 100 Designpunkten erstellt. Hierbei findet das Latin Hypercube-Verfahren Anwendung (mit deterministisch gleichverteilten Designpunkten, siehe hierzu auch

²Lieferprogramm der Firma Europipe GmbH

Abschnitt 3.4). Nachdem mit Hilfe des Konfidenzintervalls³ eine ausreichende Güte der DoE sichergestellt ist, kann mit Hilfe der Ergebnisse anschließend die Antwortfläche (RS) berechnet werden (siehe Abschnitt 3.4.2). Die RS ist in diesem Beispiel ein 8-dimensionales Gebilde, was die Auswirkungen der einzelnen Designvariablen auf die Steifigkeit und die Masse des Systems beschreibt. Da für die Berechnung eines Designpunktes nicht das eigentliche FE-Modell berechnet wird, sondern nur die mathematisch geschlossene Gleichung der RS gelöst werden muss, kann die ES relativ schnell durchgeführt werden. Am Beispiel *Pteroscenium pinnatum* wird eine 10,10 ES mit adaptiver Schrittweite über max. 1000 Generationen durchgeführt. Einen exemplarischen Aufbau des Optimierungssetups innerhalb der ANSYS Workbench zeigt Abb. 7.11. Der Parametersatz erfolgt über alle Lastfälle und wird durch eine DoE-Studie (OptiSlang) zu einer Antwortfläche übertragen (RS). Mit Hilfe der RS wird die Optimierung durch den EA durchgeführt (siehe Abb. 7.12). Nach 500 Generationen wird eine Stagnation des Optimierungsgrades bei 10 aufeinander folgenden Generationen festgestellt, was zu einem Abbruch der Optimierung führt.

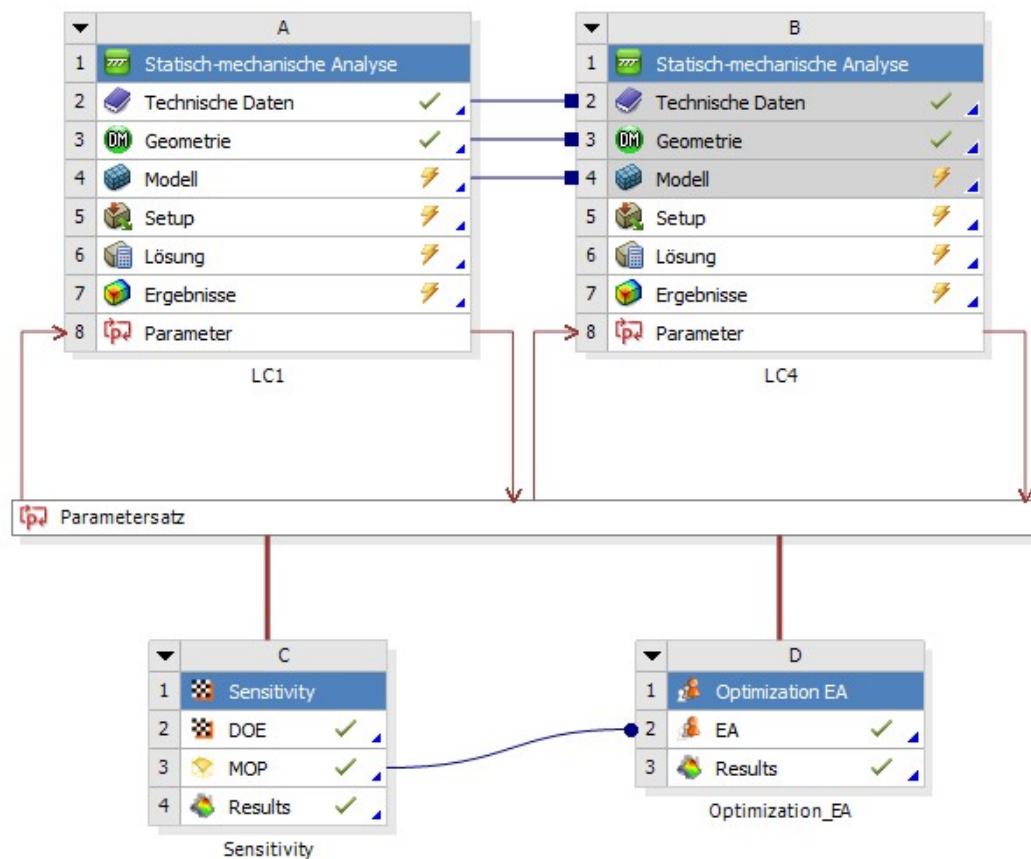


Abb. 7.11: Exemplarisches Optimierungssetup innerhalb des ANSYS Workbench. Zwei exemplarische Lastfälle LC1 und LC4 werden mit einem jeweils neuen Parametersatz (Rohrdurchmesser, etc.) aufgebaut und berechnet. Die Ergebnisse (Gewicht und maximale Verschiebung) werden anschließend dem Optimierer zurückgeführt.

³Hilfsmittel der Statistik, um eine Aussage über die Präzision der Lageschätzung eines Parameters aussagen zu können

Tab. 7.2: Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse der Radiolarienkonzepte

Konzept	Rohrsegmente	Rohrarten	Gewicht
J	26	10	243,1 t
K	40	12	347,7 t
L	45	11	398,3 t
M	27	7	229,9 t
N	16	6	303,5 t
O	42	8	285,8 t
P	33	8	293,2 t

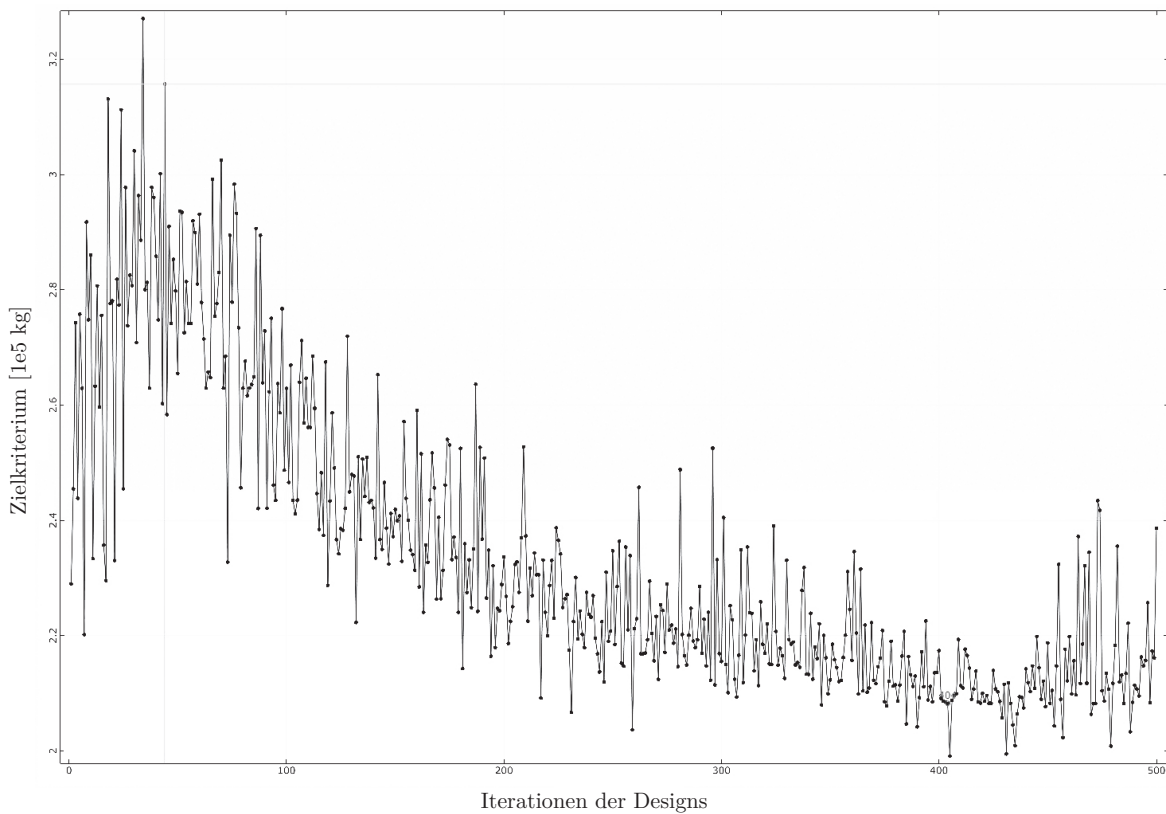


Abb. 7.12: Evolutionsstrategie als Werkzeug für die Parameteroptimierung des *Pteroscenium pinnatum* Konzeptes. Design Nr. 404 wird als bestes Design gewertet. Gut erkennbar ist die Zufallskomponente des EA, welche den lokal zackigen Verlauf der Optimierung erklärt.

Die Optimierung der parametrischen Modelle wird mit allen sieben bionischen Konzepten durchgeführt. In Tabelle 7.2 sind die Gewichte der einzelnen Konzepte zusammen mit der Anzahl unterschiedlicher Rohrarten und Segmenten aufgeführt. Weniger Rohrsegmente bedeuten weniger Schweißarbeit und damit eine kostengünstigere Fertigung.

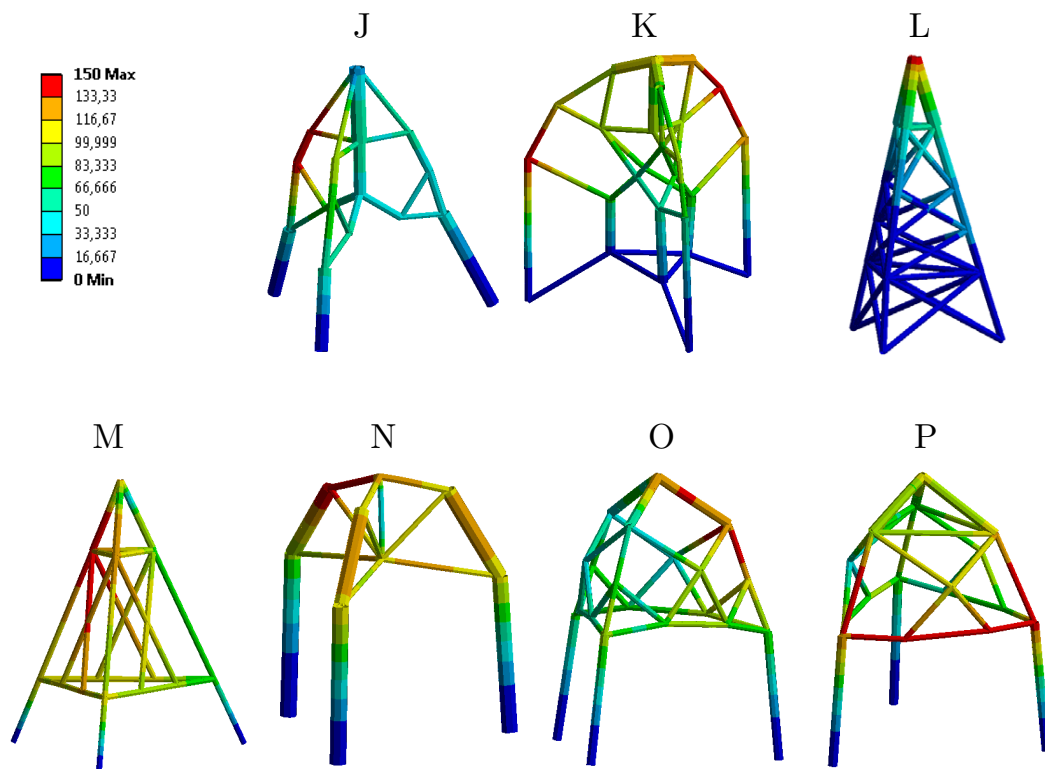


Abb. 7.13: Maßstabgerechte Verformungsplots (Einheiten in mm) der unterschiedlichen Gründungsstrukturkonzepte anhand des Lastfalles LC1 unter Berücksichtigung der optimierten Rohrquerschnitte

Das Konzept M, welches auf dem biologischen Vorbild der Radiolarie *Dictyophimus plectaniscus* beruht, stellt das leichteste Konzept dar. Mit 7 unterschiedlichen Rohrsegmenten ist es ein Konzept mit eher geringem Halbzeugbedarf. Abb. 7.13 stellt die Verformung der Konzepte für den ersten Lastfall (LC1) unter Berücksichtigung der optimierten Rohrquerschnitte farblich dar. Konzept J ermöglicht eine gute Anbindung des Turmes, auf welchem die Gondel platziert wird, da das vertikale Innenrohr bereits konisch verläuft und stellt somit eine interessante Alternative zum leichtesten Konzept M dar. Konzept K ist sowohl das schwerste als auch das am verzweigteste Konzept und sollte aufgrund der aufwändigen Bauweise nicht für eine Gründungsstruktur verwendet werden. Beim stark durch Kreuzverstreben versteiften Konzept L ermöglicht der im Vergleich zu den anderen Konzepten kleine Abstand der Füßen eine sehr kompakte Bauweise, jedoch muss diese durch eher große Rohrquerschnitte kompensiert werden. Die Bauweise N ist für eine Anwendung im Offshorebereich sehr gut geeignet, da die Rohre, welche im Boden verankert werden, bereits vertikal ausgerichtet sind und folglich einfach auf die Rammpfähle adaptiert werden können. Die beiden Konzepte O und P sind relativ ähnlich aufgebaut und haben daher ebenfalls ein vergleichbares Gewicht und Rohrdurchmesser. Das etwas komplexer aufgebaute Konzept O erzielt eine leicht geringere Bauteilmasse, benötigt jedoch auch neun weitere Rohrabschnitte.

Die Ergebnisse des systematischen Transfers der Leichtbauprinzipien ermöglichen eine Vielzahl an unterschiedlichen Konzepten für neuartige Gründungsstrukturen mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen. Da neben der reinen Gewichtsanforderung im Leichtbau auch immer weitere Anforderungen wie beispielsweise Transportfähigkeit, Schweißnahtlänge, Fertigungskosten, etc. berücksichtigt werden müssen, steht dem Ingenieur durch dieses Vorgehen eine große Auswahlmöglichkeit an alternativen Lösungen zur Verfügung, aus der er die für ihn optimale wählen kann.

7.4 Dreibeiniges bionisches Jacket

Arbeitsschritt 6 und 7 stellen zusammen die nächsten Schritte der systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau dar (vgl. Abb. 7.3) und werden im Folgenden bearbeitet. Zunächst wird hierzu das Konzept mit dem größten Leichtbaupotential ausgewählt. Mit einem Gewicht von ca. 230 t (vgl. Tab. 7.2) besitzt das Konzept M die geringste Masse bei Einhaltung der maximalen Verschiebung. Als Grundlage für die Ausarbeitung des bionischen Jackets werden folglich die Ergebnisse der Balkenoptimierung des Konzeptes M aus Abschnitt 7.2 verwendet. Hierzu wird das Balkenmodell, welches auf Basis einer Linienkonstruktion im CAD vorhanden ist durch eine Flächenkonstruktion ergänzt. Mit Hilfe dieser Konstruktion ist es möglich, die für die finale Auslegung wichtige FE-Analyse mit Shell-Elementen (und damit mit einer aussagekräftigen Spannungs- und Verformungsanalyse) durchzuführen. Die berechneten Rohrdurchmesser werden hierzu ins CAD übertragen. Für eine einfachere Fertigung und Auslegung der Gussknoten wird ein konstanter Rohrradius von 508 mm verwendet und die Anpassung an die jeweilige Belastung durch eine spätere Optimierung der Wandstärken vorgenommen. Anschließend werden die Verbindungsstücke der Rohrsegmente durch Gussknoten modelliert, wie es einer späteren Fertigung entspricht. Der Übergang zum Turm wird durch ein sog. Transitionpiece (TP) realisiert, welches einen Durchmesser von 7 m besitzt. Gleichzeitig dient das TP als Aufnahme für spätere Messgeräte, Kranaufbauten und weiterer technischer Hilfsmittel.

Für die finale Auslegung der Gründungsstruktur wird eine erneute Wandstärkenoptimierung durchgeführt, um der realistischeren Modellierung mit Shell-Elementen und den neuen Randbedingungen durch die Lasteinleitung über das TP, sowie der Umsetzung mit Gussknoten Rechnung zu tragen. Als Rohrmaterial wird Offshore tauglicher S355 Stahl verwendet. Durch den üblichen Sicherheitsfaktor 2 darf die maximale Spannung in den Rohren, sowie im TP 230 N/mm^2 nicht überschreiten. Die Gussknoten werden mit einer Spannungsobergrenze von 560 N/mm^2 ausgelegt, was ebenfalls einem Sicherheitsfaktor von 2 für alle 10 Lastfälle entspricht. Entsprechend dem Lieferprogramm können die Wandstärken der Rohre in einem Bereich von 7 bis 40 mm variieren. Für die Gussknoten wird keine Einschränkung in der Dicke vorgenommen. Als maximale Verformung am Turmflansch wird die Grenze von 150 mm beibehalten. Die Optimierung wird mittels Altair OptiStruct durchgeführt.

Abb. 7.14 zeigt die finale Auslegung des bionischen Jackets mit den optimierten Rohrquerschnitten und einem Gesamtgewicht von 314 t. Hiervon fallen 112 t für das TP an, die reinen Rohre wiegen 110 t und die Gussknoten in Summe 92 t. Alle Rohrquerschnitte sind symmetrisch aufgebaut, die jeweiligen Dickenangaben finden sich in Abb. 7.14. Es werden fünf verschiedene Sorten von Pipelinerohren benötigt. Eine Übersicht über die Spannungsverteilung des Jackets ist in Abb. 7.15 dargestellt. Eine Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse aller Lastfälle findet sich in Tab. 7.3.

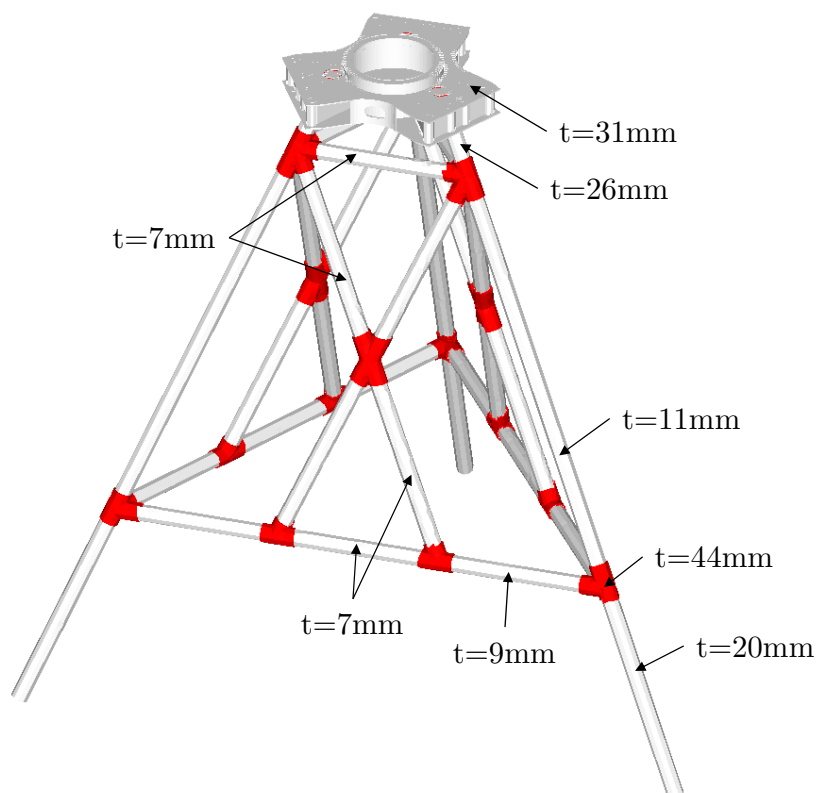


Abb. 7.14: Bionisches Jackett mit Gussknoten als Verbindungselemente zwischen den Rohrabschnitten und einem Transitionspiece zur Anbindung an den Turmflansch. Das Gesamtgewicht beträgt 314 t

Tab. 7.3: Zusammenfassung der maximalen von Mises Spannungen und Verformungen des bionischen Jackets

Lastfall	Max. Spannung Rohre [N/mm ²]	Max. Spannung Guss [N/mm ²]	Verformung Turm [mm]	Max. Verformung [mm]
LC1	218	297	39	93
LC2	183	266	30	75
LC3	229	399	25	123
LC4	169	212	27	50
LC5	225	303	43	84
LC6	203	303	43	80
LC7	153	188	21	48
LC8	189	216	23	68
LC9	178	209	32	32
LC10	229	352	24	101

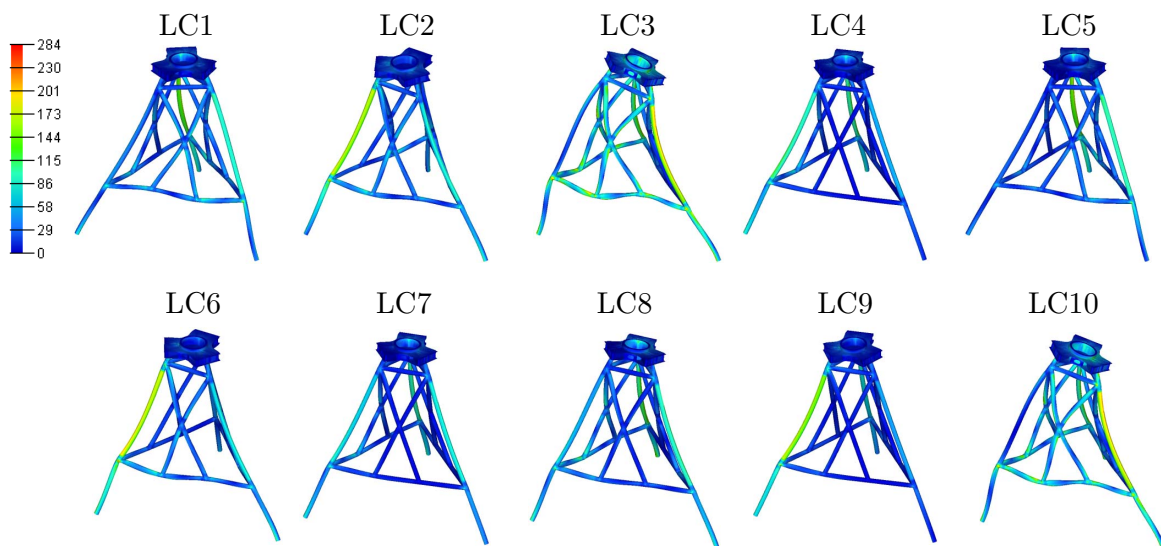


Abb. 7.15: Von Mises Spannungsplots (Spannungseinheit in MPa) des bionischen Jackets mit 50x überhöhter Verformung

8

Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert. Zunächst wird hierzu entsprechend Arbeitsschritt 2 (vgl. Abb. 4.1) in Abschnitt 8.1 die datenbankgestützte Umsetzung des Wissensspeichers mit der funktionalen Ähnlichkeitssuche evaluiert. Im Hinblick auf die erste Arbeitsthese wird das Auffinden geeigneter Planktonorganismen als Vorbilder für eine Leichtbaukonstruktion und deren Bewertung diskutiert und die Frage beantwortet, ob die Problemstellung des systematischen Screenings durch die erarbeiteten Methoden gelöst werden kann. Anschließend werden in Abschnitt 8.2 die Möglichkeiten und Grenzen des systematischen Transfers von biologischen Leichtbauweisen aufgezeigt und die These überprüft, ob mit Hilfe der abgewandelten Topologieoptimierungen der Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien zu technischen Leichtbaulösungen möglich ist (Arbeitsschritt 4). Weiterführend wird die Spezialisierung (Arbeitsschritt 5) hinsichtlich der mechanischen Randbedingungen mit parametrischer Geometrieoptimierung diskutiert. Die Anwendung der ganzheitlichen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau nach Abb. 4.1 wird am Beispiel einer Offshore-Gründungsstruktur abschließend in Abschnitt 8.3 diskutiert und hierbei die dritte Arbeitsthese der systematischen Übertragbarkeit biologischer Bauweisen mit der aufgezeigten Vorgehensweise diskutiert.

8.1 Evaluation des Auffindens geeigneter Vorbilder im Wissensspeicher

Die Umsetzung der funktionalen Ähnlichkeitssuche im Wissensspeicher in einer browserorientierten Umgebung stellt in der Praxis eine universelle Möglichkeit dar, die Inhalte der Datenbank schnell und einfach zu verteilen, da auf den Klientrechnern keinerlei Software

installiert werden muss, um einen Zugang zum Wissensspeicher zu erhalten. Hierdurch löst die Umsetzung des Wissensspeichers insbesondere die in Abschnitt 2.3 identifizierte Problemstellung des Zugangs zu Wissen. Nachteilig ist jedoch die Übertragungszeit beim Darstellen und Laden von größeren Dateien wie z.B. komplexen CAD-Bauteilen. Die gewählten Schnittstellen ermöglichen eine Kompatibilität zu der verwendeten CAD-Software.

Wie für datenbankgestützte Werkzeuge charakteristisch, hängt die Leistung des Wissensspeichers stark vom Befüllungsgrad der Datenbank, sowie von der Informationsqualität der Daten ab. Im Rahmen dieser Arbeit wurden exemplarische Daten und zahlreiche Fallbeispiele in der Datenbank abgelegt. Für eine nachhaltige Befüllung der Datenbank wurde ein Prozess etabliert, der im Rahmen von einzelnen Prinzipienuntersuchungen die Datenbank weiter füllt und so ein stetiges Wachstum des Wissensspeichers garantiert. Für eine gleichbleibende Qualität der im Wissensspeicher hinterlegten Informationen sind Leitlinien und/oder Schulungen sinnvoll.

In der Praxis haben technische Bauteile meist eine von den biologischen Vorbildern stark abweichende Geometrie bzw. Bauraum und unterliegen gleichzeitig einer Vielzahl von Restriktionen und Lastfällen. Ein ganzheitliches Vorbild (z.B. eine komplette Diatomeenschale) kann folglich nur in Ausnahmefällen (wie beispielsweise Radiolarien bei einer Gründungsstruktur) verwendet werden kann. Eine universellere Anwendbarkeit der aufgezeigten Vorgehensweise stellt die Kombination unterschiedlichster Konstruktionsprinzipien, zum Teil von unterschiedlichen biologischen Vorbildern dar. Der Schwerpunkt bei der Befüllung des Wissensspeichers sollte daher auf allgemeinen Konstruktionsprinzipien (Balken, Flächen, Kantenversteifungen, Rippenkonfigurationen, etc.) liegen (vgl. hierzu auch Drechsler (2006, Kap. 4, S. 2)).

Beim Entwurf des Wissensspeichers wurden die notwendigen Ressourcentypen (Vorbild, CAD, FE-Analyse und FE-Netz) definiert. In der Praxis zeigt sich, dass die verschlagworteten biologischen Vorbilder in Form von REM-Aufnahmen oder CLSM-Daten die wichtigste Information des Wissensspeichers sind. Beim Bearbeiten eines Leichtbauprojektes ist die Dokumentation der biologischen Vorbilder essentiell, da hierüber die größte Wertschöpfung erzielt werden kann. Die Umsetzung von parametrischen CAD-Daten, welche so universell konstruiert wurden, dass sie auf alle möglichen Anwendungsfälle übertragbar sind, stellt sich als aufwändig dar und wird nur bei immer wiederkehrenden Standardkonstruktionen als sinnvoll erachtet. Eine Möglichkeit der weiteren Anpassung von CAD-Konstruktion verspricht das sog. Shape Morphing¹, bei dem z. B. Stützstellen von Flächen als Parameter gewählt werden und diese so eine gewisse Verformung der Konstruktion ermöglichen. Die Freiheitsgrade sind hierbei jedoch insbesondere bei Mustern eingeschränkt. Für die meisten technischen Anwendungen ist eine Neukonstruktion unumgänglich, sodass eine nicht-parametrische CAD-Vorlage oder auch nur die Bildinformation des biologischen Vorbildes ausreichend sind.

Um eine nachhaltige Nutzung von bionischen Konzepten und bereits erarbeiteten Konstruktionsmerkmalen zu unterstützen, bietet sich der Wissensspeicher zu Archivierungszwecken abgeschlossener Projekte an. Hierfür wird ein weiterer Ressourcentyp erstellt, welcher Projekt-

¹z. B. mittels CATIA Generative Shape Optimizer

abschlussberichte und auch verworfene Konzepte mit Leistungsbeschreibung beinhalten kann. Durch eine ausführliche Beschreibung der Projekte ist ein sicheres Auffinden der Ergebnisse über die Metasuche gewährleistet.

Die im Wissensspeicher integrierte funktionale Ähnlichkeitssuche kann insbesondere bei dreidimensionalen Gebilden eine erste Vorauswahl der natürlichen Vorbilder vereinfachen. Unter der Voraussetzung, dass die Wirkflächen der Vorbilder definiert und im Wissensspeicher hinterlegt wurden, ist wie beispielsweise im Anwendungsfall der Offshore Gründungsstruktur eine grafische Aufbereitung der Vorbilder möglich. Bei Konstruktionsprinzipien, wie beispielsweise „Kantenversteifungen“, „Flächenversteifungen“, usw. bei denen die Definition der Wirkflächen nicht möglich ist, da es sich um übergeordnete Versteifungselemente handelt, ist die funktionale Ähnlichkeitssuche nicht einsetzbar. An dieser Stelle liefert die Metasuche bessere Ergebnisse, da die Konstruktionsprinzipien per Schlagwörter treffend beschrieben werden können. Das Gesamtkonzept wird hierbei folglich eine Kombination verschiedener Prinzipien sein und muss händisch konstruiert werden. Es muss abgeschätzt werden, ob für das technische Problem ein einziges „komplettes“ Vorbild gesucht werden soll (Einsatz der funktionalen Ähnlichkeitssuche), oder ob die Kombination aus einzelnen Konstruktionsprinzipien sinnvoll ist (Metasuche).

Mit Hilfe der im Wissensspeicher vorhandenen Suchfunktionalitäten lässt sich der im Stand der Technik nur bedingt systematisierte Prozess des Screenings in einer für Leichtbauprojekte sinnvollen Art und Weise durchführen. Unter der Voraussetzung eines ausreichend befüllten Wissensspeichers sind die in dieser Arbeit beschriebene Vorgehensweise und die erarbeiteten Hilfsmittel in der Lage den Leichtbauexperten beim Auffinden geeigneter biologischer Vorbilder systematisch zu unterstützen.

Im Rahmen des praktischen Arbeitens mit dem Wissensspeicher hat sich herausgestellt, dass die Inhalte sehr gut für die Unterstützung bei der ersten Konzeptfindung (siehe Arbeitsschritt 3, Abb. 4.1) innerhalb der abgewandelten Vorgehensweise nach Klein geeignet sind. Insbesondere durch die ingenieurtechnische Verschlagwortung der biologischen Konstruktionsprinzipien kann der Wissensspeicher ähnlich einem Konstruktionskatalog verwendet werden. Nichtsdestotrotz kann der Wissensspeicher nicht den kompletten Entwicklungsaufwand ersetzen, der bei einem Leichtbauproblem notwendig ist, sondern stellt vielmehr eine unterstützende Rolle beim Entwurf neuer Leichtbauweisen dar, indem er das Wissen des Leichtbauexperten (siehe Abb. 2.1) ergänzt.

Die erste Arbeitsthese, die das Auffinden geeigneter Planktonorganismen als Vorbilder für eine Leichtbaukonstruktion und deren Bewertung mit Hilfe einer Suchfunktion innerhalb eines datenbankbasierten Wissensspeichers beinhaltet, kann folglich mit Hilfe eines befüllten Wissensspeichers, der funktionalen Ähnlichkeitssuche und der im Wissensspeicher integrierten Bewertungsfunktion über den LBK (mit den genannten Einschränkungen) als validiert angesehen werden. Der Arbeitsschritt 2 der für bionischen Leichtbau angepassten Vorgehensweise des Konstruierens nach Klein (vgl. Abb. 4.1) ist demnach möglich und löst die Problemstellung des systematischen Screenings.

8.2 Möglichkeiten und Grenzen des systematischen Prinzipientransfers

Das in Kapitel 6 dargestellte Verfahren für den systematischen Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien nutzt Grundlagen der Topologieoptimierung in Kombination mit dem Bauraum von Planktonschalen für innovative Leichtbaukonstruktionen. Die vorgestellten Varianten (modifizierte SKO Methode, sowie die SIMP Methode im speziellen Bauraum) unterscheiden sich wesentlich und bieten Vor- und Nachteile, welche im Folgenden näher betrachtet werden.

Die modifizierten SKO Methoden gliedern sich in drei unterschiedliche Ansätze, wobei eine Kombination von vSKO1² und vSKO3³, wie in Abschnitt 6.1.1 gezeigt wurde, gute Ergebnisse hervorbringen kann. Der Ansatz vSKO2, welcher die Schrittweite in Abhängigkeit des Abstandes zum biologischen Vorbild variiert, liefert ebenfalls qualitative hochwertige Designvorschläge. Die vSKO1/vSKO3 Methode hat den Vorteil, dass sie je nach Schrittweite im Vergleich zur vSKO2 Methode weniger Iterationen benötigt, um zu einem eindeutigen Design zu kommen. Dies ist gleichbedeutend mit weniger Rechenzeit und folglich weniger Kosten. Ein Vorteil der vSKO2 Methode ist allerdings, dass die natürlichen Strukturen detaillierter berücksichtigt werden können, da die minimalen Abstände in jede Iteration einfließen. Eine Aussage, welche der beiden Varianten die geeignetere ist, lässt sich folglich nur im speziellen Anwendungsfall anhand der Ergebnisse der modifizierten SKO Varianten klären. Es sollten demnach jeweils beide Varianten durchgeführt werden.

Die modifizierten SKO Methoden haben im Gegensatz zur SIMP Methode im speziellen Bauraum den grundlegenden Vorteil, dass die Topologieoptimierung über den kompletten Bauraum hinweg möglich ist. Dies bedeutet, dass der mathematische Algorithmus in der Lage ist auch Elemente als tragende Strukturen auszuwählen, die nicht zwangsläufig nahe dem biologischen Vorbild sein müssen. Dies ist dann sinnvoll, wenn beispielsweise nicht alle Randbedingungen (Lager, Kräfte, etc.) exakt mit der Geometrie des biologischen Vorbilds übereinstimmen. Die modifizierten SKO Methoden sind in diesem Fall in der Lage „neue“ Kraftpfade zu wählen, welche sich mit denen der biologischen Struktur verbinden. Im Gegensatz dazu ist die SIMP Methode nur im speziellen Bauraum (welcher natürlich beliebig aufgedickt werden kann) nahe dem biologischen Vorbild in der Lage Material anzuhäufen oder zu entfernen. Neue Kraftwege sind hierbei nicht möglich.

Die Wahlmöglichkeiten der Parameter bei den modifizierten SKO Methoden (vgl. Abschnitt 6.1.1: Anzahl der initialen Iterationen, λ , α) stellen eine Schwachstelle hinsichtlich der robusten Anwendbarkeit dieser Methoden dar, da sie problemabhängig sind. Je nach Geometrie, Lager, Kräften, etc. sind unterschiedliche Parameterkombinationen sinnvoll und müssen im Detail bestimmt werden.

²vSKO1: Berechnung der E-Module mit Hilfe der RSR nach einer bestimmten Anzahl initialer Iterationen.

³vSKO3: Vergrößertes E_{max} in Abhängigkeit des Abstandes zum biologischen Vorbild bei Erreichen von E_{max} mit Hilfe der RSR nach Gleichung

Für den Fall, dass das technische Problem sehr gut mit einem biologischen Vorbild übereinstimmt, hat die SIMP Methode im speziellen Bauraum den Vorteil, dass die eigentliche Topologieoptimierung in gängiger Software bereits implementiert ist und folglich robust lauffähig sein sollte. Lediglich der spezielle Bauraum muss zu Beginn erarbeitet und definiert werden. Insbesondere mit den möglichen Zusatzoptionen (wie beispielsweise Auszugsrichtung, Gruppierung von Strukturmerkmalen, Symmetrien, etc.), welche meist in gängiger Software implementiert sind, sind dem Bearbeiter Möglichkeiten gegeben das Design an einschränkende Fertigungsrestriktionen anzupassen.

Beide Varianten haben folglich ihre vorteilhaften Anwendungsgebiete und der Bearbeiter kann zu Beginn entscheiden nach welcher Methode er die biologischen Prinzipien übertragen möchte. Das Auswahlkriterium ist hierbei der Grad der Übereinstimmung der Lager und Kräfte (bzw. Wirkflächen) des technischen Problems und des biologischen Vorbilds. Für den Fall dass die SIMP Methode angewendet wird, ist sicherzustellen, dass die Wirkflächen des biologischen Vorbilds und die Wirkflächen des technischen Problems eine große Übereinstimmung haben. Dies erfordert eine ausführliche Recherche (bzw. einen hohen Füllungsgrad des Wissensspeichers) nach dem richtigen Vorbild und ist folglich bei einer industriellen Anwendung nicht immer möglich.

Eine Alternative, welche der eingeschränkten Anwendbarkeit des speziellen SIMP Verfahrens auf exakt passende dreidimensionale Vorbilder entgegenwirkt, ist die Kombination mehrerer Vorbilder miteinander, um die Wirkflächen des technischen Problems zusammen abzudecken. Durch geschickte Wahl mehrerer Geometrien ist es möglich sehr komplexe technische Fragestellungen zu erschließen. Jedoch stellt sich die Frage ob bei einer Kombination mehrerer Vorbilder die Lastpfade der biologischen Strukturen noch optimierte Pfade darstellen, da diese nicht den evolutiven Auswahlprozessen der Natur unterliegen und folglich evtl. nicht optimale Lösungen hervorbringen.

Die Topologieoptimierung hat ihr Hauptanwendungsgebiet bei dreidimensionalen Gussbauteilen, da hierbei die Volumenelemente des Bauraumes sehr gut in ihrer Dichte variiert werden können. Im Stand der Technik werden für flächige Bauteile meist andere Verfahren, sog. Topographieoptimierungsverfahren angewendet, welche ein Blech z. B. versicken können. Folglich ist das Anwendungsgebiet der Topologieoptimierung im biologischen Bauraum ebenso auf Problemstellungen im dreidimensionalen Raum limitiert. Eine Anwendung des Verfahrens auf quasi zweidimensionale Problemfälle führt zu nicht sinnvollen Ergebnissen. Eine Ausnahme bildet eine Topologieoptimierung auf Flächen, welche ebenfalls möglich ist. Da die biologischen Bauräume jedoch immer dreidimensionale Gebilde sind, ist diese Art der Topologieoptimierung im Rahmen dieser Arbeit nicht anwendbar. Der Aufbau der Diatomeen ist wie eingangs aufgezeigt meist schachtelförmig, wobei nur die Valven eine strukturierte Bauweise aufweisen. Die Valven sind meist als Flächentragwerke zu verstehen und folglich als Ganzes betrachtet zweidimensionale Bauweisen. Daher eignen sich die Diatomeen als natürliches Vorbild für die Topologieoptimierung nur bedingt. Radiolarien stellen im Gegensatz dazu gute Vorbilder dar,

da diese dreidimensionale Bauweisen besitzen. Der Schwerpunkt des Verfahrens ist daher in Verbindung mit Radiolarien zu sehen.

Die Vorbereitung des Bauraumes für die SIMP Optimierung stellt eine zeit- und rechenaufwändige Arbeit dar. Zunächst muss das biologische Vorbild digitalisiert, bereinigt, skaliert und ausgerichtet werden. Die Digitalisierung und Bereinigung kann im Vorfeld geschehen und im Wissenspeicher abgelegt sein. Die Skalierung und Ausrichtung muss allerdings je nach Anwendungsfall im dortigen Bauraum erfolgen. Anschließend müssen für jedes Element die minimalen Distanzen bestimmt werden, was die Vernetzungseinheit des Bauraumes aufgrund der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität begrenzt. Im Gegensatz zur klassischen Topologieoptimierung, bei der diese Vorarbeiten nicht nötig sind, begrenzt auch hier die Verwendung der biologischen Vorbilder die effiziente Anwendung des Ansatzes. Eine rechenzeitoptimierte Ausarbeitung der Algorithmen, welche in dieser Arbeit verwendet wurden, führt hier jedoch zu einer Verbesserung und sollte angestrebt werden.

Eine vereinfachte Variation der in dieser Arbeit beschriebenen Algorithmen stellt eine klassische Topologieoptimierung innerhalb des unveränderten Bauraumes des digitalisierten biologischen Vorbildes dar (siehe (a) in Abb. 6.13), da hierbei keine Nächste-Nachbarn-Suche durchgeführt werden muss. Hierzu müssten lediglich die digitalisierten Scandaten in ein für FE-Berechnungen geeignetes Netz überführt werden und anschließend optimiert werden. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass die Topologieoptimierung keinerlei Möglichkeit hätte Kraftpfade neben dem biologischen Vorbild zu finden und somit evtl. wichtige konstruktive Elemente nicht finden würde. Ein höheres Gewicht und damit eine geringere Leistungsfähigkeit der Leichtbaukonstruktion wäre die Folge.

Die nachgeschaltete Dimensionierung der Konzepte mit Hilfe von Parameteroptimierungen stellt eine leistungsstarke Möglichkeit dar die biologischen Konzepte auf den technischen Lastfall zu spezialisieren. Der Grad der Optimierung ist hierbei abhängig von der Wahl der Parameter, sowie dem korrekten Anwenden der Optimierungsalgorithmen. Hierfür ist spezielles Wissen im Bereich Parameteroptimierung notwendig.

Zusammenfassend kann das Verfahren als Möglichkeit betrachtet werden, neue und unkonventionelle Konzepte zu entwickeln, welche sich von klassischen Bauweisen sowohl durch ihre Wirkprinzipien wie auch geometrischen Ausformungen abheben (vgl. Abb. 7.13). Nicht immer ist garantiert, dass ein biologisches Vorbild gefunden werden kann und dass die Leistungsfähigkeit der Entwürfe diejenige der klassischen Bauweisen übertrifft, jedoch stellt die Vielzahl an möglichen alternativen Konzepten eine herausragende Möglichkeit dar auf etwaige Fertigungsrestriktionen und zur Verfügung stehende Materialien Rücksicht nehmen zu können. Insbesondere bei Kostenoptimierungen sind alternative Bauweisen hilfreich um neue Ansätze finden zu können. Neben den technischen Argumenten spielt ebenfalls die Einzigartigkeit der Entwürfe eine Rolle hinsichtlich einer wirtschaftlichen Verwertung als Alleinstellungsmerkmal. Die zweite Arbeitsthese, welche besagt, dass mit Hilfe einer abgewandelten Topologieoptimierung der Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien zu technischen Leichtbaulösungen möglich ist, kann folglich als validiert betrachtet werden. Die anschließende Spezialisierung

hinsichtlich der mechanischen Randbedingungen kann, wie in Abschnitt 7.3 gezeigt, mit parametrischer Geometrieoptimierung erfolgen.

8.3 Diskussion der systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau

Das in Kapitel 7 anhand eines realen Anwendungsfalles aufgezeigte Vorgehen zeigt das Potential und die notwendigen Arbeitsschritte um die in dieser Arbeit untersuchte Vorgehensweise (vgl. Abb.4.1) anzuwenden.

Wie gezeigt werden konnte, ist die Vorgehensweise für bionischen Leichtbau funktional und systematisiert, um folglich ein prozesssicheres Vorgehen zu gewährleisten. Die erzeugten Entwürfe ermöglichen Gewichtseinsparung bei gleicher Leistungsfähigkeit. Zudem ermöglichen sie alternative Bauweisen und zeigen dem Bearbeiter neue Konstruktionsansätze auf.

Bei dem dargestellten Anwendungsbeispiel einer Gründungsstruktur handelt es sich um einen Spezialfall, bei dem das biologische Vorbild (Radiolarien) in weiten Teilen mit dem technischen Problem (Tripod) geometrisch ähnlich ist. Die Anwendung der funktionalen Ähnlichkeitssuche, sowie der systematische Transfer führen in diesem Fall zu guten Ergebnissen und können als validierte Leichtbauwerkzeuge verstanden werden. Diese Ausgangssituation ist beim Bearbeiten von allgemeineren Problemstellungen meist nicht der Fall. Folgerichtig kann oft nicht das komplette biologische Exoskelett als Vorbild verwendet werden, sodass die Konzepte aus einer Kombination mehrerer biologischer Konstruktionsprinzipien bestehen können. Hierbei sollte die Metasuche innerhalb des Wissensspeichers bevorzugt benutzt werden. Die funktionalen Ähnlichkeitssuche hingegen wird bei einzelnen Konstruktionsprinzipien keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern (vgl. Abschnitt 8.1). Bei der Übertragung von einzelnen Konstruktionsprinzipien können die aufgezeigten Methoden, welche auf Basis der Topologieoptimierung arbeiten (vgl. Arbeitsschritt 4 in Abb. 4.1), evtl. übersprungen werden. Arbeitsschritt 5 (Spezialisierung mit Hilfe parametrischer Optimierung) ermöglicht hierbei eine Anpassung der Konstruktionsprinzipien an die Randbedingungen.

Bei den aufgezeigten Hilfsmitteln und Vorgehensweisen handelt es sich nicht um ein allein-stehendes Programm, wie beispielsweise die SKO Methode, bei der jeder beliebige Bauraum anhand der Wirkflächen optimiert werden kann. Die aufgezeigte Vorgehensweise stellt vielmehr eine Methodik dar, welche mit unterstützenden Hilfsmitteln (Prozessschritte, Wissensspeicher, Ähnlichkeitssuche, automatisierter Transfer, etc.) die konstruktiven Detaillösungen bzw. Bauweisen der Planktonorganismen auf technische Probleme überträgt.

Beim Ausarbeiten der bionischen Gründungsstruktur konnte festgestellt werden, dass der einmalige Aufwand, der benötigt wird, um die biologischen Vorbilder mikroskopisch zu untersuchen, vorzubereiten und einzuscannen, um sie im Wissensspeicher abzulegen, relativ hoch ist. Diese Arbeit sollte für Projekte bereits im Vorhinein erfolgt sein, um die Vorgehensweise als effizientes Leichtbauverfahren anwenden zu können und die für das Screening wichtige Quantität an Vorbildern zu gewährleisten. Ebenfalls ist der systematische Transfer (Arbeitsschritt

4) sehr zeit- und rechenintensiv. Die weiteren Arbeitsschritte 5 und 6 (Spezialisierung mit Hilfe parametrischer Optimierung und Umsetzung in Entwürfen) sind mit dem im Stand der Technik verwendeten Methoden vergleichbar und ähnlich zeitintensiv. Da für eine optimierte Vorgehensweise mehrere Konzepte parallel bearbeitet werden sollten (wie beispielsweise die sieben Konzepte in Abschnitt 7.2), ist diese Arbeit jedoch ebenfalls zeitaufwendiger als klassische Vorgehensweisen. Je nachdem ob ein geeignetes biologisches Vorbild zu Beginn des Prozesses in Arbeitsschritt 2 ausgewählt wurde, zeigt das Ergebnis weniger oder mehr Leichtbaupotential. Die gegen Ende des Verfahrens angewendete Parameteroptimierung ermöglicht auch potentiell schlechteren Konzepten eine Anpassung an das jeweilige Lastkollektiv, sodass auch zu Beginn weniger starke Konzepte schlussendlich die leistungsstärksten Entwürfe sein können. Dieser Umstand macht es notwendig alle Konstruktionsweisen gleichermaßen zu optimieren und erst am Ende zu vergleichen. Dies ist mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden, stellt jedoch auch einen großen Vorteil beim Auffinden einer möglichst optimalen Leichtbaulösung dar.

Insbesondere für die Befüllung des Wissensspeichers ist Expertenwissen im Bereich Biologie nötig. Die mikroskopischen Verfahren und der Digitalisierungsvorgang erfordern Laborarbeiten und Ausrüstung. Für die Prozessschritte der Vorbildauswahl (Arbeitsschritt 2) und der Abstraktion (Arbeitsschritt 4 und 5) konnten im Rahmen dieser Arbeit systematische Hilfsmittel entwickelt werden, die das jeweilige Expertenwissen weitgehend unnötig machen, jedoch nicht vollständig ersetzen.

Die hervorgebrachten Konstruktionen, welche mit der aufgezeigten Vorgehensweise erstellt wurden, stellen meist leistungsstarke Bauweisen dar, die sich durch unkonventionelle Details (wie beispielsweise Rippenkonfigurationen, optimierte Kraftflüsse, fraktale Wabenkonstruktionen, etc.) auszeichnen. Die Anwendung des Verfahrens ist jedoch nur dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn durch klassische Hilfsmittel wie beispielsweise reiner Topologieoptimierung keine sinnvollen Ergebnisse erzielt werden können. Dies ist bei dem gezeigten Anwendungsbeispiel der Fall, da das Ergebnis, welches mit der SKO Methode erstellt wurde zu einem einfachen Dreibein führt. Aufgrund der Tatsache, dass massive Balkenquerschnitte das Ergebnis dieser Optimierung sind, welche anschließend durch Rohre umgesetzt werden sollen, besteht die Problematik des Knickversagens bei den bis zu 50 m langen Balken. Die verzweigteren Konstruktionen, welche durch den systematischen Transfer biologischer Konstruktionsprinzipien erzeugt werden konnten, umgehen diese Problematik und führen so zu realisierbaren Designs. In Anbetracht der Kosteneinsparung durch die Verwendung von Halbzeugen aus dem Pipelenebau, lässt das Ergebnis den Schluss zu, dass (unter den aufgeführten Voraussetzungen) die Vorgehensweise mit Hilfe des Wissensspeichers und in Kombination mit dem systematischen Transfer der Konstruktionsprinzipien in der Lage ist, bionische Leichtbaulösungen für technische Problemstellungen systematisch zu erzeugen. Die Annahme von isotropem Material bei den biologischen Vorbildern erscheint möglich, da insbesondere bei der Topologieoptimierung, welche die Konstruktionsprinzipien transferiert, zum jetzigen Stand der Technik meist nur isotropes Material verwendet werden kann. Da die Spannungsanalysen, welche der Topologieoptimierung zugrunde liegen, über die von-Mises Vergleichsspannung erfolgen, ist diese

Vereinfachung ebenfalls möglich. Durch die nachgeschaltete Parameteroptimierung, welche die geometrischen Konzepte unter Berücksichtigung des finalen Materials belastungsgerecht dimensioniert, wird eine nachträgliche Anpassung des isotropen Konzeptes an den jeweiligen Werkstoff möglich. Die erzielten Ergebnisse in Abschnitt 7.4 unterstützen diese These. Weiterführende Forschungsaktivitäten im Bereich Materialcharakterisierung der Schalen von Kieselalgen ist jedoch weiterhin notwendig und verspricht weiteres Potential für die Übertragung der Konstruktionsprinzipien von der Natur zur Technik. Die dritte Arbeitsthese, welche besagt, dass die Übertragung von Bauweisen aus der Biologie zu technischen Konstruktionen zu leistungsfähigen Leichtbaukonstruktionen führt und in der angepassten Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens umgesetzt werden kann, kann folglich, unter den genannten Voraussetzungen, als validiert betrachtet werden. Die in Kapitel 4 aufgezeigte systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau stellt folglich, mit den in dieser Arbeit ausgeführten Hilfsmitteln und Methoden, eine neuartige und innovative Möglichkeit dar, Leichtbauweisen nach dem Vorbild der Natur zu generieren.

9

Zusammenfassung und Ausblick

In den Ingenieurwissenschaften ist ein etablierter Prozess des leichtbaugerechten Konstruierens bekannt. Dieser enthält jedoch den potentiell kritischen Arbeitsschritt der Konzeptfindung, welcher in der Technik derzeit meist nur durch Erfahrung und mit Hilfe bestehender Konstruktionen gelöst wird. Hieraus entstehen potentiell kritische Punkte bei der Konzeptfindung, da weder mehrere Konzepte generiert werden können noch diese sich von bestehenden Konstruktionen abheben um evtl. neue, bessere Leichtbaulösungen zu erzeugen. Die Natur hat durch die Evolution sehr ausgereifte Leichtbauprinzipien hervorgebracht, welche als Vorbilder für technische Konstruktionen dienen können.

In dieser Arbeit wird vor diesem Hintergrund eine systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau entwickelt (siehe Abb. 9.1), welche das Potential der Natur nutzt und mit einer etablierten Entwicklungslogik der Ingenieurwissenschaften umgesetzt werden kann. Für die Umsetzung wird der in den Ingenieurwissenschaften etablierte Prozess für leichtbaugerechtes Konstruieren um die Arbeitsschritte 2, 4 und 5 (grün markierte Arbeitsschritte in Abb. 9.1) ergänzt und zu einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau weiterentwickelt.

Hierzu wird ein Wissensspeicher aufgesetzt, welcher biologische Vorbilder in einer für den Ingenieur nutzbaren Art und Weise bereithält. Neben mikroskopischem Bildmaterial stellen CAD-Konstruktionen und standardisierte FE-Analysen die notwendige Ergänzung zu beschreibenden Merkmalen der natürlichen Konstruktionen dar. Eine funktionale Ähnlichkeitssuche ermöglicht das automatische Auffinden des jeweils am besten geeigneten biologischen Vorbildes für einen beliebigen technischen Lastfall. Eine einfache Strukturbewertung über einen dimensionslosen Leichtbaukennwert erweitert den Wissensspeicher um eine wichtige Funktion zur Bewertung von Strukturen hinsichtlich ihres Leichtbaupotentials.

Der Abstraktionsprozess der natürlichen Bauweisen, welcher für den Transfer der biologischen Bauweisen hin zu technischen Leichtbaukonstruktionen nötig ist, wird systematisiert, indem die Kombination von verschiedenen Topologieoptimierungsmethoden und den Geometrien von gescannten biologischen Vorbildern untersucht wird. Es wird gezeigt, dass anhand der Randbedingungen eines technischen Problems wie z.B. Lagerungen, Kräfte und Bauraum, ein biologisches Vorbild abstrahiert werden kann. Eine Spezialisierung hinsichtlich des technischen Lastfalls ermöglicht weiteres Leichtbaupotential und wird in dieser Arbeit mit parametrischer Optimierung untersucht. Hierbei finden Algorithmen wie beispielsweise Response Surface oder Evolutionsstrategie Anwendung. Ein anschauliches Beispiel gibt die Konstruktion eines Flächentragwerkes nach Vorbild einer Kieselalge. Die Anwendbarkeit der vollständigen Vorgehensweise wird anhand eines Beispiels einer Offshore Gründungsstruktur für Windenergieanlagen überprüft, indem ein bionisches Jacket ausgelegt wird. Mehrere Designkonzepte zeigen das Leichtbaupotential des Verfahrens auf und validieren die Arbeitsthese dieser Arbeit.

Als weiterführendes Forschungsthema, welches sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit ableiten lässt, sind insbesondere Systematisierungsansätze auf Seiten der Mikroskopie bzw. der Digitalisierung der biologischen Vorbilder zu nennen. Hinsichtlich einer effizienten Nutzung des Wissensspeichers, ist es notwendig, den Scanprozess und die Aufbereitung der digitalen Daten wie die Ablage im Wissensspeicher zu automatisieren, um einen möglichst großen Pool an potentiellen biologischen Vorbildern (und damit Leichtbauweisen für technische Problemstellungen) bereitzustellen.

Ein generisches Verfahren, welches auf den Bauprinzipien der Natur in Form einer Gleichung basiert, könnte im Bereich der Diatomeen als Vorbilder eine allgemeinere Anwendbarkeit des Verfahrens darstellen und sollte im Detail untersucht werden. Der Bildungsprozess der Diatomeenschalen, welcher ein Gießverfahren in eine beliebig formbare Biomembran darstellt (Drum u. Pankratz, 1964), könnte hierzu näher untersucht werden. Ebenfalls könnten grundlegende

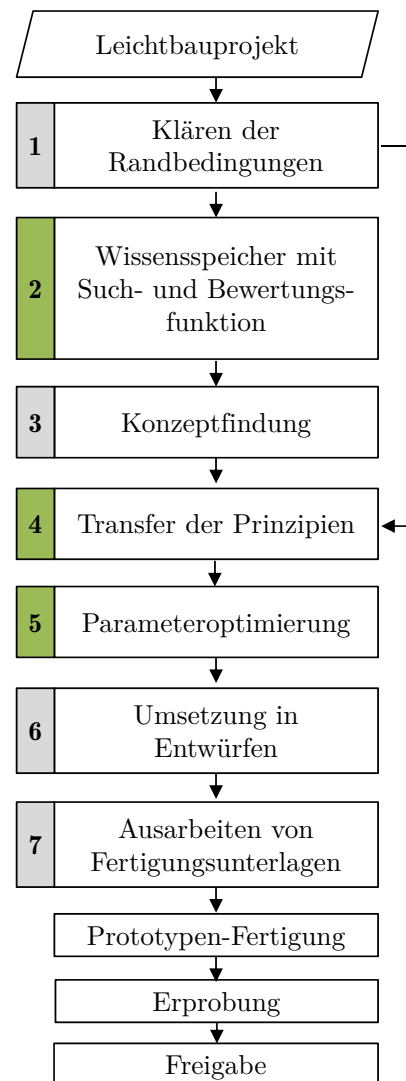


Abb. 9.1: Vereinfachte Darstellung der systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau (vgl. Abb. 4.1)

Untersuchungen der Veränderlichkeit der Schalen hinsichtlich statischer Lasten Aufschluss über die Konstruktionsregeln geben. Da die Schalen der Diatomeen bei jeder Teilung kleiner werden und erst bei der sexuellen Phase wieder ihre Ausgangsgröße erhalten (für eine detaillierte Beschreibung der Fortpflanzung von Diatomeen siehe Round u. a. (1990, S. 82-87)), wäre es z. B. denkbar Diatomeen vor ihrer sexuellen Phase in einen Käfig zu setzen, welcher kleiner als die maximale Schalengröße nach der sexuellen Phase ist. Die daraus resultierenden verformten Schalenformen könnten Aufschluss über die Konstruktionsregeln der Diatomeen geben. So könnten Bauweisen realisiert werden, welche nach den Regeln der Natur optimal an den jeweiligen Lastfall angepasst sind und nicht von bestehenden Strukturen abgeleitet werden müssen.

Weiterführende Grundlagenforschung im Bereich Materialcharakterisierung der Diatomeenschalen muss durchgeführt werden. Durch ein besseres Verständnis der anisotropen Materialzusammensetzung der Schalen können zum einen besser geeignete Vorbilder im Rahmen des Screenings gesucht werden, zum anderen könnte der Transferschritt, welcher mittels abgewandelter Topologieoptimierung erfolgt, weiter optimiert werden, um auch etwaige Faserverläufe gewinnbringend berücksichtigen zu können.

Die Anwendbarkeit des Auffindens und des aufgezeigten systematischen Transfers der Konstruktionsprinzipien kann allgemeiner Natur sein. Hierzu ist eine Erweiterung des Suchraumes innerhalb der biologischen Vorbilder sinnvoll. Neben Diatomeen und Radiolarien können auch weitere Lebewesen als Leichtbauvorbilder dienen. Die systematische Vorgehensweise lässt sich unabhängig von den verwendeten Vorbildern anwenden und kann daher als allgemeine Vorgehensweise für bionischen Leichtbau angesehen werden. Eine grundlegende Untersuchung der jeweils verwendeten biologischen Vorbilder hinsichtlich ihrer Eignung als Leichtbaukonstruktionen, insbesondere hinsichtlich des Selektionsdrucks und der etwaigen Multifunktionalität der Strukturen, ist hierfür jedoch entscheidende Voraussetzung.

Die Entwicklung der Rechenleistung in den vergangenen Jahren entspricht weiterhin dem Moore'schen Gesetz¹ und steigt stetig (Mack, 2011). Es wird daher in naher Zukunft nicht mehr nötig sein geeignete Startpunkte bzw. Vorbilder für Leichtbaukonstruktionen und deren Optimierung zu suchen. Aufgrund der hohen Rechenleistung wird es möglich sein zufällig generierte Vorbilder zu verwenden, diese zu parametrisieren, alle Varianten zu berechnen und zu validieren, egal, ob diese sinnvoll sind oder nicht.

Die Topologieoptimierung ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten das aktivste Forschungsgebiet innerhalb der Strukturoptimierung gewesen (Deaton u. Grandhi, 2014). Zukünftige Entwicklungen werden den Einsatz der in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren beeinflussen. Zukünftige Forschungen im Bereich Topologieoptimierung zielen z. B. auf die direkte Verwendung der Spannung ab, welche im Gegensatz zu den aktuellen steifigkeitsoptimierten Bauteilen in Zukunft auch festigkeitsoptimierte Bauteile erzeugen können. Ebenso stehen multidisziplinäre und multiphysikalische Anwendungsgebiete im Fokus aktueller Forschungen zur Topologieoptimierung (Deaton u. Grandhi, 2014, S.27). Ein Vorteil der in dieser Arbeit auf-

¹Verdopplung der Rechenleistung alle zwei Jahre

gezeigten Methode zum Transfer von biologischen Konstruktionsprinzipien ist die Generierung mehrerer Designs und damit die Möglichkeit die Ergebnisse an Fertigungsrestriktionen und robuste Bauweisen anzupassen. Die Berücksichtigung von ungewissen Einflussfaktoren in ein Designkonzept ist, insbesondere bei der Topologieoptimierung infolge der hohen Sensibilität der Ergebnisse einer Topologieoptimierung in Bezug auf die Randbedingungen wie Lager oder Kräfte, wichtig (Deaton u. Grandhi, 2014, S. 28). Aktuelle Forschungen im Bereich der Quantifizierung von Unsicherheiten versuchen diese Robustheit in Topologieoptimierungsproblemen zu berücksichtigen (Park u. Grandhi, 2011; Riley u. Grandhi, 2011). Ebenfalls werden Fertigungsrestriktionen vermehrt in die Topologieoptimierung integriert, sodass die Ergebnisse in Zukunft einfacher umsetzbar sein werden. Der aktuell noch großen Aufwand der Rückführung der Topologieoptimierungsergebnisse zu handhabbaren Designkonzepten wird in Zukunft durch Algorithmen vereinfacht werden, welche Bauteile wie beispielsweise Platte, runde Löcher, Balkenquerschnitte, Auszüge, etc. innerhalb der Topologieoptimierung erkennen können und diese gleich in richtige Konzepte übertragen (Deaton u. Grandhi, 2014, S.28).

Neben den Bestrebungen der Vereinfachung von Topologieoptimierungsergebnissen zu möglichst einfach fertigbaren Konstruktionen stellt die rasante Entwicklung im Bereich der additiven Fertigung eine Möglichkeit dar auch komplexe Bauteile, wie sie in der Natur vorzufinden sind, zu fertigen. Neuartige Technologien ermöglichen die Herstellung von mechanisch belastbaren und hochkomplexen Bauteilen (z. B. selektiv lasergeschweißte Keramikbauteile (SLM) (Yeong u. a., 2013) oder belastungsorientiert faserverstärkte Verbundwerkstoffe (Holmes Jr u. Riddick, 2013)). Die Abstrahierungsschritte können folglich in Zukunft vereinfacht werden bzw. werden unnötig. Da die Technologie der additiven Fertigung noch relativ jung ist, ist hier in Zukunft ein großes Potential zur Herstellung komplexer Bauteile, wie sie z. B. mit dem in dieser Arbeit untersuchten Verfahren generiert werden können, zu erwarten.

Abkürzungsverzeichnis

μ CT	.....	Mikrotomographie
ARSM	.....	Adaptive Response Surface Method
ASCII	.....	American Standard Code for Information Interchange
AWI	.....	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
BSD	.....	Berkeley Software Distribution, Lizenzierung freier Software
C	.....	höhere Programmiersprache
CAIO	.....	Computer Aided Internal Optimization
CAO	.....	Computer-Aided-Optimisation
CFK	.....	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CLSM	.....	Laser-Konfokal-Scanningmikroskopie
CMS	.....	Content Management System
DAM	.....	Digital Asset Management
DBSCAN	.....	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DoE	.....	Design of Experiments
DS	.....	Designspace, bzw. Bauraum in dem eine Topologieoptimierung stattfinden kann
EDM	.....	Engineering Data Management
ES	.....	Evolutionsstrategie
FIB/SEM	.....	Raster-Elektronen Mikroskopie mit fokussiertem Ionenstrahl
GA	.....	Genetischer Algorithmus
GFK	.....	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GPL	.....	General Public License, Lizenzierung freier Software
GRID	.....	Gitterknotendefinition eines finite Elemente Netzes
HAT	.....	Hauptachsentransformation
IGES	.....	Initial Graphics Exchange Specification
KIT	.....	Karlsruher Institut für Technologie
KLT	.....	Karhunen-Loeve-Transformation
LAT	.....	Lowest Astronomical Tide, niedrigst möglicher Gezeitenwasserstand
LDAP	.....	Lightweight Directory Access Protocol
MAM	.....	Media Asset Management
MP	.....	Mathematische Programmierung

MPL	Mozilla Public License, Lizenzierung freier Software
NASTRAN	Nasa Structural Analysis System, ein gängiger Finite-Elemente Solver
OC	Optimalitätskriterien
PC	Personal Computer, Einzelplatzrechner
PDF	Portable Document Format, plattformunabhängiges Dateiformat für Dokumente
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PHP	Etablierte Skriptsprache für serverseitige Webanwendungen
PIM	Product Information Management
PIXE	Particle-Induced X-ray Emission, bzw. Partikel-induzierte Röntgenemission, eine verbreitete Methode der Ionenstrahlanalytik
PKW	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RS	Response Surface
RSR	Reference Stress Relationship, Mineralisierungsprozess von Knochen innerhalb der SKO Methode
SIMP	Solid Isotropic Microstructure with Penalty for intermediate density
SLM	Selective Laser Melting
SP	Schwerpunkt
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
TP	Transitionpiece, Übergangselement von einer Gründungsstruktur zum Turm
VBA	Visual Basic for Applications, Skriptsprache für Microsoft Office Produkte
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRML	Virtual Reality Modeling Language
XML	Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

1.1	Tafel VIII aus „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ von Otto Lilienthal	3
1.2	Erste Gleitflugversuche von Otto Lilienthal mit kleinem Schlagflügelapparat .	3
1.3	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Diatomeenschalen und Radiolarien	4
1.4	REM-Aufnahmen von organischen Gerüststrukturen der Diatomee <i>Thalassiosira pseudonana</i>	5
1.5	Prinzipieller Aufbau einer Kieselalge	5
1.6	Darstellung der Nordsee-Copepoden <i>Centropages hamatus</i> und <i>Temora longicornis</i>	6
1.7	REM Aufnahmen der Gnathobasen von weiblichen <i>Centropages hamatus</i> . . .	7
1.8	CLSM Aufnahmen der Gnathobasen von weiblichen <i>Centropages hamatus</i> . .	8
1.9	REM Fraßspur von Copepoden an Diatomeenschalen	9
1.10	Flussdiagramm des Verfahrens zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodell- daten für eine technische Leichtbaustruktur	10
1.11	Struktureller Aufbau der Arbeit	11
2.1	Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens	15
2.2	Notwendige Anpassungen und Ergänzungen der systematischen Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens für eine Berücksichtigung der Konstruktionsweisen biologischer Vorbilder	20
3.1	Typische Michell-Struktur mit reinen Zug- und Druckstäben	29
3.2	Merkmale der Topologieoptimierungsverfahren	31
3.3	Ablauf einer Topologieoptimierung	32
3.4	Einfluss der Bestrafungsexponenten auf die Elementsteifigkeit in Abhängigkeit des Dichtefaktors	33
3.5	Produktdesign mit solidThinking Inspire	34
3.6	Feines Netz von Knochenbälkchen, welche entlang der Kraftlinien ausgerichtet sind	34
3.7	Veranschaulichung einer (1,5) – ES	41
3.8	Fazit des Standes der Technik für die Problemstellung dieser Arbeit	43

4.1	Konzept der für bionischen Leichtbau angepassten Vorgehensweise des Konstruierens	47
5.1	Schematisches Vorgehen der funktionalen Ähnlichkeitssuche in sieben Schritten	54
5.2	Wirkpunkte und Wirkflächen innerhalb mariner Planktonstrukturen für die Übertragung auf technische Strukturen	55
5.3	Beispielhafte Strukturen mit vernetzten Wirkflächen und -punkten	56
5.4	Eindimensionales Prinzip der Lösung des Gewichtungsproblems zwischen Wirkpunkten und -flächen	58
5.5	Anwendung des DBSCAN Algorithmus	59
5.6	Beispiel zweier Punktemengen	62
5.7	Diagonalsymmetrischen Ähnlichkeitsmatrix mit euklidischen Distanzmaß . . .	63
5.8	Mit Hilfe einer MDS visuell aufbereitete Landkarte funktional ähnlich gruppierter Strukturen, welche mit Hilfe des euklidischen Distanzmaßes berechnet wurden	64
5.9	Verbesserte Darstellung der Landkarte mit euklidischem Distanzmaß ohne die Abhängigkeit zu Struktur B3	64
5.10	Vergleich der unterschiedlichen Distanzmaße	65
5.11	Spannungs-Dehnungs Diagramm mit $R_{p0,2}$ -Grenze	67
5.12	Einfacher Zug-Lastfall für die geschlossen beschreibbare LBK-Berechnung nach Klein	69
5.13	Arbeitsumgebung der Leichtbaudatenbank	77
5.14	Übersicht der Lastfälle für Balkentragwerke	80
5.15	Übersicht der Lastfälle für Flächentragwerke	80
5.16	FE Berechnung als Ressource innerhalb des Wissensspeichers	81
5.17	Beispielaufnahme verschiedener natürlicher Vorbilder innerhalb des Wissensspeichers	82
5.18	Einfache Suche nach Inhalten	83
5.19	CAD Ressource innerhalb des Wissensspeichers mit Wirkflächen für die funktionale Ähnlichkeitssuche	84
5.20	Im Wissensspeicher integrierte, visuell aufbereitete Ähnlichkeitskarte	85
5.21	Ergebnisanzeige als Vorschaubilder	86
5.22	Ergebnisanzeige als Liste für den strukturmechanischen Vergleich	87
6.1	Verschiedene Beispiele von Leichtbauprinzipien, wie sie bei Diatomeen vorzufinden sind	90
6.2	Prinzip des systematischen Transfers von Konstruktionsprinzipien	91
6.3	Die fünf Arbeitsschritte der modifizierten SKO-Methode zur Übertragung von biologischen Konstruktionsprinzipien in die Technik	93
6.4	Rohmaterial des Friedrich-Hustedt-Zentrums für Diatomeenforschung	93
6.5	Auflösungsbereiche und Sichtfelder verschiedener Mikroskoptechniken	94

6.6	Schema des Prinzips des Konfokalmikroskops	95
6.7	2D Bauraum mit hinterlegter Radiolarie <i>Clathrocorys teuscheri</i> als biologisches Vorbild	98
6.8	Ergebnisse und weiterführende Berechnungen der modifizierten SKO Methode unter Einfluss der Anzahl der initialen Iterationen	98
6.9	Beispiel einer modifizierten SKO Berechnung unter Berücksichtigung der Elementabstände zum natürlichen Vorbild	99
6.10	Variation von λ für die Berechnung nach Gl. 6.2	100
6.11	Variation von λ und deren Einfluss auf die modifizierte SKO Methode nach Gl. 6.3 (vSKO2)	101
6.12	Drei Arbeitsschritte zur belastungsgerechten Abstrahierung eines biologischen Vorbildes mit Hilfe von Topologieoptimierung	102
6.13	Ergebnisse der Topologieoptimierung innerhalb des DSS+	103
6.14	CLSM Aufnahmen der Diatomee <i>Asterolampra sp.</i>	105
6.15	Darstellung des Bauraumes (DSS+) auf Basis von <i>Asterolampra sp.</i> , welcher mit Hexaederelementen vernetzt wurde.	106
6.16	Topologieoptimierung mit 10% Restvolumen des Bauraumes und minimierter mittlerer Nachgiebigkeit	107
6.17	Lastfall des abstrahierten parametrischen Modells	107
6.18	Übersicht der parametrischen Optimierung in ANSYS	109
6.19	Response Surface zeigt den Zusammenhang zwischen Masse, Strebenanzahl und Radius der äußeren Streben	109
6.20	Sensitivitätsanalyse zeigt den statistischen Einfluss der Parameter auf die Zielgrößen Masse und Verschiebung	110
6.21	Evolutionsstrategie als Optimierungsalgorithmus auf Basis der RS. Bestes Design gefunden bei der 346. Iteration	111
6.22	Anpassung der lokalen RS innerhalb der ARSM Methode und Verlauf der ARSM als Optimierungsalgorithmus mit Startwert des besten Designs der Evolutionsstrategie	112
6.23	Ergebnis der Optimierung mittels RS und EA und ARSM	112
7.1	Darstellung aktueller Offshore Gründungsstrukturen für unterschiedliche Wassertiefen und Anlagengrößen	115
7.2	Tripod-Fundamente auf der ABC-Halbinsel in Bremerhaven	116
7.3	Systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau nach dem Vorbild von marinen Planktonorganismen	117
7.4	Wirkflächen des originalen Tripod-Fundaments	118
7.5	Exemplarische Diatomeen und Radiolarienstrukturen innerhalb des Wissensspeichers als Datenbasis für die funktionale Ähnlichkeitssuche	119
7.6	Ergebnis der funktionalen Ähnlichkeitssuche mit Euklidischen Distanzmaß . .	120

7.7	Dreidimensionaler Bauraum des Vorbildes <i>Clathrocorys teuscheri</i> für verschiedene Grenzwerte bei der Bauraumaufdickung und Ergebnisse der SIMP-Optimierung innerhalb der jeweiligen natürlichen Bauräume	121
7.8	Konstruktionsprinzipien der sieben verschiedenen natürlichen Vorbilder mit aufgedicktem Bauraum	122
7.9	Ergebnisse der Topologieoptimierung innerhalb des natürlichen Bauraumes der Radiolarien unter Berücksichtigung aller Lastfälle	123
7.10	Arbeitsschritte vom Ergebnis der Topologieoptimierung über ein Linienmodell in CATIA zum parametrisierten Balkenmodell in ANSYS	124
7.11	Exemplarisches Optimierungssetup innerhalb des ANSYS Workbench	125
7.12	Evolutionsstrategie als Werkzeug für die Parameteroptimierung des <i>Pterosce-</i> <i>nium pinnatum</i> Konzeptes	126
7.13	Maßstabsgerechte Verformungsplots der unterschiedlichen Gründungsstruktur- konzepte anhand des Lastfalles LC1	127
7.14	Bionisches Jacket mit Gussknoten als Verbindungselemente zwischen den Rohrabschnitten und einem Transitionpiece zur Anbindung an den Turmflansch	129
7.15	Von Mises Spannungsplots des bionischen Jackets mit 50x überhöhter Verformung	130
9.1	Vereinfachte Darstellung der systematische Vorgehensweise für bionischen Leichtbau	142

Tabellenverzeichnis

3.1	Klassische Versuchspläne (DoE) mit der jeweiligen Anzahl der Stützstellen . .	39
5.1	Beispielhafte Werte der Fließgrenze verschiedener Werkstoffe	67
5.2	Beispielhafte LBK Zahlenwerte für ein Bauteil unter Zugbeanspruchung . . .	69
5.3	Vergleich der Softwaregattungen zur Umsetzung des Basissystems	76
5.4	Standardlastfälle für Stab- und Balkentragwerke	79
5.5	Standardlastfälle für Flächentragwerke	79
5.6	Metadaten des Ressourcentyps FE Berechnung	81
6.1	Einflussgrößen auf das E-Modul der modifizierten SKO-Methode	92
6.2	Parameter des abstrahierten Modells	108
6.3	Optimierte Parameterwerte des abstrahierten Modells aus unterschiedlichen Optimierungsverfahren	112
7.1	Qualitative Schnittlasten am Turmflansch auf einer Höhe von 16,6 m LAT für die Auslegung einer 5 MW Offshore Gründungsstruktur für den Standort „Alpha Ventus“	123
7.2	Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse der Radiolarienkonzepte . . .	126
7.3	Zusammenfassung der maximalen von Mises Spannungen und Verformungen des bionischen Jackets	130

Literaturverzeichnis

- [Aberle u. a. 2007] ABERLE, N. ; LENGFELLNER, K. ; SOMMER, U.: Spring bloom succession, grazing impact and herbivore selectivity of ciliate communities in response to winter warming. In: *Oecologia* 150 (2007), S. 668–681
- [Armbrust 2009] ARMBRUST, E.V.: The life of diatoms in the world's oceans. In: *Nature* 459 (2009), S. 185–192
- [Barthlott 1990] BARTHLOTT, W.: Scanning electron microscopy of the epidermal surface in plants. In: *Scanning electron microscopy in taxonomy and functional morphology. Systematics association special volume* 41 (1990), Nr. 41, S. 69–94
- [Baumgartner 1992] BAUMGARTNER, L.: SKO (soft kill option): the biological way to find an optimum structure topology. In: *International journal of fatigue: materials, structures, components* 1992 (1992), Nr. 6, S. 387–393
- [Bendsøe u. Kikuchi 1988] BENDSØE, M.P. ; KIKUCHI, N.: Generating Optimal Topologies in Optimal Design using a Homogenization Method. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 71 (1988), S. 197–224
- [Bendsøe u. Mota 1993] BENDSØE, M.P. ; MOTA, S.: *Topology Design of Structures*. Kluwer Academic Publishers, 1993
- [Bendsøe u. Sigmund 2003] BENDSØE, M.P. ; SIGMUND, O.: *Topology Optimization - Theory, Methods and Applications*. Springer-Verlag, 2003
- [Bertram 2010] BERTRAM, A.: *Untersuchung biomechanischer Aspekte von Fraßstrategien mit dem Schwerpunkt auf Copepoden*, Universität Bremen, Diplomarbeit, 2010
- [Bletzinger u. a. 2005] BLETZINGER, K.-U. ; WÜCHNER, R. ; DAOUD, F. ; CAMPRUBÍ, N.: Computational methods for form finding and optimization of shells and membranes. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 194 (2005), S. 30–33
- [Bray u. Curtis 1957] BRAY, J.R. ; CURTIS, J.T.: An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. In: *Ecological Monographs* 27 (1957), S. 325–349
- [Brownlee u. Taylor 2001] BROWNLEE, C. ; TAYLOR, A.R.: *Algal Calcification and Silification*. John Wiley & Sons, 2001 <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/19/01/015601>.

-
- [Brunner u. a. 2009] BRUNNER, E. ; RICHTHAMMER, P. ; EHRLICH, H. ; PAASCH, S. ; SIMON, P. ; UEBERLEIN, S. ; PÉE, K.H. van: Chitin-based organic networks: an integral part of cell wall biosilica in the diatom *Thalassiosira pseudonana*. In: *Angew. Chem. Int. Ed.* 48 (2009), S. 9724–9727
- [Darwin 1859] DARWIN, C.: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, 1859
- [Deaton u. Grandhi 2014] DEATON, Joshua D. ; GRANDHI, Ramana V.: A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 49 (2014), Nr. 1, S. 1–38
- [Descles u. a. 2008] DESCLES, J. ; VARTANIAN, M. ; EL HARRAK, A.: New tools for labeling silica in living diatoms. In: *New Phytol.* 177 (2008), S. 822–829
- [Dillinger 2003] DILLINGER, R.: *Jugendstil im Meer - Warum Kieselalgen so stabil und vielfältig sind*. Version: 2003. <http://www.fz-juelich.de/portal/index.php?jahr=2003&index=163&cmd=show&mid=125>
- [Drechsler 2006] DRECHSLER, K.: *Begleitunterlagen zur Vorlesung Leichtbau*. Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau, 2006
- [Drum u. Pankratz 1964] DRUM, R.W. ; PANKRATZ, H.S.: Post mitotic fine structure of *Gomphonema parvulum*. In: *J. Ultrastruct. Res.* 10 (1964), S. 217–223
- [Dynardo GmbH 2013] DYNARDO GMBH: *Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis*. Juni 2013
- [Epstein 1997] EPSTEIN, S.S.: Microbial food webs in marine sediments. II. Seasonal changes in trophic interactions in a sandy tidal flat community. In: *Microb. Ecol.* 34 (1997), S. 199–209
- [Ester u. a. 1996] ESTER, M. ; KRIEGEL, H.P. ; SANDER, J. ; XU, X.: *A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise*. Menlo Park, Calif. : AAAI Press, 1996 (Proceedings of the Second International Conference on KnowledgeDiscovery and Data Mining). – ISBN 1577350049
- [Etman u. a. 1996] ETMAN, L. ; ADRIAENS, J. ; SLAGMAAT, M. van ; SCHOOF, A.: Crashworthiness design optimization using multipoint sequential linear programming. In: *Structural Optimization* 12 (1996), S. 222–228
- [Feyerabend 1990] FEYERABEND, F.: *Methodische Gewichtsreduzierung - am Beispiel von Industrierobotern*, Universität-GH-Paderborn, Diss., 1990
- [Friedrichs u. a. 2012] FRIEDRICHS, L. ; MAIER, M. ; HAMM, C.: A new method for exact three-dimensional reconstructions of diatom frustules. In: *Journal of Microscopy* (2012). <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2818.2012.03664.x>. – DOI 10.1111/j.1365–2818.2012.03664.x

- [Fry u. Wainright 1991] FRY, B. ; WAINRIGHT, S.: Diatom sources of ^{13}C -rich carbon in marine food webs. In: *Mar. Ecol. Prog.* 76 (1991), S. 149–157
- [Gauch 1982] GAUCH, H.G.: *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge University Press, New York, 1982
- [Gibbs-Smith 1978] GIBBS-SMITH, C.: *Die Erfindungen von Leonardo da Vinci*. Belser AG, 1978
- [Grabowski u. Rude 1990] GRABOWSKI, H. ; RUDE, S.: Methodisches Entwerfen auf der Basis zukünftiger CAD-Systeme. In: *VDI-Berichte* 812 (1990), S. 203–226
- [Gründig 1988] GRÜNDIG, L.: Minimal surfaces for finding forms of structural membranes. In: *Computers & Structures* 30 (1988), S. 679–683
- [Hamm 2003a] HAMM, C.: *Verfahren zur Ermittlung von konstruktiven Erstmodellldaten für eine technische Leichtbaustruktur*. DE10356682A1, 11 2003
- [Hamm 2003b] HAMM, C.: *Wunderschöne Kieselalgen: Muster für stabile Konstruktionen*. Version: 2003. http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/pressemitteilungen/detail/item/beautiful_diatoms_pattern_for_stable_construction/?cHash=e523a346a1
- [Hamm 2005a] HAMM, C.: Kieselalgen als Muster für Technische Konstruktionen. In: *BIO-Spektrum* 1/05 (2005), 41-43. http://www.biokon.net/bionik/download/HammChristian_BiokeramischeVerbundwerkstoffe.pdf
- [Hamm 2005b] HAMM, C.: The Evolution of Advanced Mechanical Defenses and Potential Technological Applications of Diatom Shells. In: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 5 (2005), Nr. 1, S. 108–119
- [Hamm 2010] HAMM, C.: *Offshore Foundation nach dem Verfahren ELiSE (OFE)*. Version: 2010. http://www.bionische-innovationen.de/download/Projektblatt_ofe.pdf
- [Hamm u. a. 2003] HAMM, C. ; MERKEL, R. ; SPRINGER, O. ; JURKOJC, P. ; MAIER, C. ; PRECHTEL, K. ; SMETACEK, V.: Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection. In: *Nature* 421 (2003), S. 841–843
- [Hamm u. a. 2007] HAMM, C. ; MIELKE, R. ; KARA, C. ; LÜDEMANN, U. ; CLEFF, M. ; PHILIPP, B.: *Ammolight - Fraktale Leichtbauschalen*. Version: 2007. http://www.rle.de/fileadmin/www/images/nova/Bionik_Ammolight.pdf
- [Hamm u. Smetacek 2007] HAMM, C. ; SMETACEK, V.: Armor: Why, When and How? In: *Evolution of Primary Producers in the Sea 2007* (2007), Nr. Bd. 2007, S. 311–332
- [Hassani u. Hinton 1998] HASSANI, B ; HINTON, E: A review on homogenization and topology optimization: I. Homogenization theory for media with periodic structure. II. Analytical and

-
- numerical solution of homogenization equations. III. Topology optimization using optimality criteria. In: *Computers and Structures* 69 (1998), S. I. 707–717, II. 719–738, III. 739–756
- [Hauck 2006] HAUCK, C.: *Beitrag zur methodischen, rechnerunterstützten Konzeption und Prinzipienmodellierung flächiger Leichtbaukomponenten*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2006
- [Heczko u. a. 2002] HECZKO, M. ; KEIM, D.A. ; SAUPE, D. ; VRANIC, D.V.: Verfahren zur Ähnlichkeitssuche auf 3D-Objekten. In: *Datenbank-Spektrum* 2 (2002), 54-63. <http://kops.uib.uni-konstanz.de/volltexte/2008/6981>
- [Helmcke u. Krieger 1964] HELMCKE, J.G. ; KRIEGER, W.: Diatomeenschalen im elektronenmikroskopischen Bild. In: *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 49 (1964), 639–640. <http://dx.doi.org/10.1002/iroh.19640490407>
- [Heuss u. a. 2012] HEUSS, R. ; MÜLLER, N. ; SINTERN, W. van ; STARKE, A. ; TSCHIESNER, A.: *Advanced Industries - Lightweight, heavy impact*. <http://www.afbw.eu/system/files/McKinsey-StudieLeichtbauinderAutomobilindustrie-Januar2012.pdf>. Version: Januar 2012
- [Hildebrand u. a. 2009] HILDEBRAND, M. ; KIM, S. ; SHI, D. ; SCOTT, K. ; SUBRAMANIAM, S.: 3D imaging of diatoms with ion-abrasion scanning electronmicroscopy. In: *J. Struct. Biol.* 166 (2009), S. 316–328
- [Holmes Jr u. Riddick 2013] HOLMES JR, Larry R. ; RIDDICK, Jaret C.: Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure. In: *JOM* (2013), S. 1–5
- [Hörnig 2010] HÖRNIG, M.: *Untersuchungen zur Funktion von Leichtbauschalen mariner Planktonorganismen*, Universität Bremen, Diplomarbeit, 2010
- [Hörnlein 1994] HÖRNLEIN, H.: Topologieoptimierung von Stabstrukturen. In: *Optimierungsstrategien mit der Finite Element Methode* Bd. Optimierungsstrategien mit der Finite Element Methode, 1994
- [Huber-Betzer 1990] HUBER-BETZER, H.: Engineering optimization in design processes. In: *Proceedings of the international conference, Karlsruhe Nuclear Research Center, Germany* Bd. 63. Berlin : Springer, September 1990. – ISBN 3-540-53589-60-387-53589-6
- [Hutchins u. Bruland 1998] HUTCHINS, D.A. ; BRULAND, K.W.: Iron-limited diatom growth and Si:N uptake ratios in a coastal upwelling regime. In: *Nature* 393 (1998), S. 561–564
- [Iijima 1991] IIJIMA, S.: Helical microtubules of graphitic carbon. In: *Nature* 354 (1991), November, S. 56–58. <http://dx.doi.org/10.1038/354056a0>. – DOI 10.1038/354056a0

- [ISO/IEC 14772 1997] ISO/IEC 14772: *Information technology - Computer graphics and image processing - The Virtual Reality Modeling Language (VRML) - Part 1: Functional specification and UTF-8 encoding*. <http://www.web3d.org/x3d/specifications/vrml/ISO-IEC-14772-VRML97/>. Version: 1997
- [Jiao u. a. 2010] JIAO, H. ; ZHANG, Y. ; CHEN, W.: The Lightweight Design of Low RCS Pylon Based on Structural Bionics. In: *Journal of Bionic Engineering* 7 (2010), Nr. 2, S. 182–190
- [Jorden 1986] JORDEN, W.: *Beanspruchungsgerechtes Konstruieren*. Paderborn : Vorlesungsmanuskript, 1986
- [Kirsch 1990] KIRSCH, U.: On the relationship between optimum structural and geometries. In: *Journal of Structural Optimization* 2 (1990), S. 39–45
- [Klein 2013] KLEIN, B.: *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10., überarb. u. erw. Aufl. Braunschweig : Springer Vieweg, 2013 (Viewegs Fachbücher der Technik). – ISBN 3528441151
- [Knippers u. Speck 2012] KNIPPERS, Jan ; SPECK, Thomas: Design and construction principles in nature and architecture. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 7 (2012), Nr. 1, 015002. <http://stacks.iop.org/1748-3190/7/i=1/a=015002>
- [Kober 2011] KOBER, M.: *Ein Beitrag zur strukturmechanischen Optimierung realer Bauteile in metallischer und Faserverbundbauweise unter Verwendung von wirkebenenbasierten Bruchkriterien*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Diss., 2011
- [Koumousis 1993] KOUMOUSIS, V.K.: Layout and Sizing Design of Civil Engineering Structures in Accordance with the Eurocodes. In: *Topology Design of Structures*, 1993, S. 103–116
- [Krebs 1989] KREBS, C.J.: *Ecological Methodology*. Harper-Collins, New-York, 1989
- [Kröger u. a. 2000] KRÖGER, N. ; DEUTZMANN, R. ; BERGSDORF, C. ; SUMPER, M.: Species-specific polyamines from diatoms control silica morphology. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 97 (2000), S. 14133–14138
- [Kröger u. a. 1999] KRÖGER, N. ; DEUTZMANN, R. ; SUMPER, M.: Polycationic peptides from diatom biosilica that direct silica nanosphere formation. In: *Science* 286 (1999), S. 1129–1132
- [Kruskal 1964] KRUSKAL, J.B.: Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a non metric hypothesis. In: *Psychometrika* 29 (1964), S. 1–27
- [Kull 1990] KULL, U.: Vegetationsverhältnisse in Trockengebieten und die Leichtbauweise von Pflanzen. In: *Jahreshefte der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg* 145 (1990), 5–33. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2014/9102>

-
- [Lance u. Williams 1967] LANCE, G.N. ; WILLIAMS, W.T.: Mixed-data classificatory programs, I. Agglomerative Systems. In: *Australian Computer Journal* 1 (1967), S. 15–20
- [Lesny 2009] LESNY, K.: *Gründung von Offshore-Windenergieanlagen - Werkzeuge für Planung und Bemessung*. VGE Verlag GmbH, 2009
- [Lienhard u. a. 2011] LIENHARD, J ; SCHLEICHER, S ; POPPINGA, S ; MASSELTHER, T ; MILWICH, M ; SPECK, T ; KNIPPERS, J: Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 6 (2011), Nr. 4, S. 045001
- [Lilienthal 1889] LILIENTHAL, O.: *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst*. Gaertner, 1889
- [Lindby u. Santos 1999] LINDBY, T. ; SANTOS, J. L. T.: Shape optimization of three-dimensional shell structures with the shape parametrization of a CAD system. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 18 (1999), Nr. 2, S. 126–133. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01195987>. – DOI 10.1007/BF01195987. – ISSN 1615–147X
- [Linkwitz 1999] LINKWITZ, K.: About formfinding of double-curved structures. In: *Engineering Structures* 21 (1999), S. 709–718
- [Lloyd 1982] LLOYD, S.P.: Least squares quantization in PCM. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 28 (1982), S. 129–137
- [Ma u. a. 2008] MA, J.F. ; CHEN, W.Y. ; ZHAO, L. ; ZHAO, D.H.: Elastic Buckling of Bionic Cylindrical Shells Based on Bamboo. In: *Journal of Bionic Engineering* 5 (2008), Nr. 3, S. 231–238
- [Mack 2011] MACK, C.A.: Fifty Years of Moore’s Law. In: *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on* 24 (2011), Nr. 2, S. 202–207. <http://dx.doi.org/10.1109/TSM.2010.2096437>. – DOI 10.1109/TSM.2010.2096437. – ISSN 0894–6507
- [Maier u. Hamm 2011] MAIER, M. ; HAMM, C.: ELiSE 3D - A database-driven engineering and design tool. In: CULLEY, S.J. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED11* Bd. 9. The Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, Denmark : The Design Society, August 2011, S. 50–60
- [Maier u. a. 2012] MAIER, M. ; SCHULZ, J. ; THOBEN, K.D.: Verfahren zur funktionalen Ähnlichkeitssuche technischer Bauteile in 3D-Datenbanken. In: *Datenbank Spektrum* 12 (2012), S. 131–140. <http://dx.doi.org/10.1007/s13222-012-0086-6>. – DOI 10.1007/s13222-012-0086-6
- [Maier u. a. 2013] MAIER, M. ; SIEGEL, D. ; THOBEN, K.-D. ; NIEBUHR, N. ; HAMM, C.: Transfer of Natural Micro Structures to Bionic Lightweight Design Proposals. In: *Journal of Bionic Engineering* 10 (2013), Nr. 4, 469 - 478. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s13222-012-0086-6>

- 1016/S1672-6529(13)60241-3. – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60241-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60241-3). – ISSN 1672–6529
- [Malik u. a. 1999] MALIK, J. ; CARSON, C. ; BELONGIE, S.: Region-Based Image Retrieval. In: *DAGM-Symposium*, 1999, S. 152–154
- [Mann 1999] MANN, D.G.: The species concept in diatoms. In: *Phycologia* 38 (1999), S. 437–495
- [Marchetti u. Cassar 2009] MARCHETTI, A. ; CASSAR, N.: Diatom elemental and morphological changes in response to iron limitation: a brief review with potential paleoceanographic applications. In: *Geobiology* 7 (2009), S. 419–431
- [Marinello u. a. 2008] MARINELLO, F. ; BARIANI, P. ; SAVIO, E. ; HORSEWELL, A. ; CHIFFRE, L.D.: Critical factors in SEM 3D stereo microscopy. In: *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008), S. 065705. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/19/6/065705>. – DOI 10.1088/0957-0233/19/6/065705
- [Mattheck 1997] MATTHECK, C.: *Design in der Natur: Der Baum als Lehrmeister*. Rombach GmbH Druck- und Verlagshaus, 1997
- [Mattheck 2006] MATTHECK, C.: Teacher tree: The evolution of notch shape optimization from complex to simple. In: *Engineering Fracture Mechanics* 73 (2006), S. 1732–1742
- [Mattheck 2010] MATTHECK, C.: *Denkwerkzeuge nach der Natur*. Karlsruher Inst. für Technologie - Campus Nord, 2010
- [Matthiesen 2002] MATTHIESEN, S.: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*, Universität Karlsruhe, Diss., Oktober 2002
- [Melaragno 1998] MELARAGNO, M.: *Preliminary design of modern bridges for architects and engineers*. New York : Dekker, 1998 (Civil and environmental engineering). – ISBN 0-8247-0184-4
- [Michell 1904] MICHELL, A.G.M.: LVIII. The limits of economy of material in frame-structures. In: *Philosophical Magazine Series 6* 8 (1904), Nr. 47, 589-597. <http://dx.doi.org/10.1080/14786440409463229>. – DOI 10.1080/14786440409463229
- [Michels u. Schnack-Schiel 2005] MICHELS, J. ; SCHNACK-SCHIEL, S.B.: Feeding in dominant Antarctic Copepods - does the morphology of the mandibular gnathobases relate to diet? In: *Marine Biology* 146 (2005), S. 483–495
- [Michels u. a. 2012] MICHELS, J. ; VOGT, J. ; GORB, S.N.: Tools for crushing diatoms - opal teeth in copepods feature a rubber-like bearing composed of resilin. In: *Sci. Rep.* 2 (2012), Juni. <http://dx.doi.org/10.1038/srep00465>. – DOI 10.1038/srep00465

-
- [Milwich u. a. 2006] MILWICH, Markus ; SPECK, Thomas ; SPECK, Olga ; STEGMAIER, Thomas ; PLANCK, Heinrich: Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom. In: *American Journal of Botany* 93 (2006), Nr. 10, S. 1455–1465
- [Minke 1970] MINKE, G.: *Zur Effizienz von Tragwerken*. Stuttgart , Bern, Univ. Stuttgart, Diss., 1970
- [Moncrieff 2005] MONCRIEFF, E.: Systems for Lightweight Structure Design: the State-of-the-Art and Current Developments. Version: 2005. http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-3317-6_2. In: OÑATE, Eugenio (Hrsg.) ; KRÖPLIN, Bern (Hrsg.): *Textile Composites and Inflatable Structures* Bd. 3. Springer Netherlands, 2005. – DOI 10.1007/1-4020-3317-6_2. – ISBN 978-1-4020-3316-2, 17-28
- [Nachtigall 1997] NACHTIGALL, W.: *Bionik - Design für funktionelles Gestalten*. Springer Verlag, 1997
- [Nachtigall 2008] NACHTIGALL, W.: *Bionik: Lernen von der Natur*. C. H. Beck oHG, 2008
- [Nagasaki 2008] NAGASAKI, K: Dinoflagellates, diatoms, and their viruses. In: *The Journal of Microbiology* 46 (2008), S. 235–243
- [Nahrendorf u. a. 2007] NAHRENDORF, M. ; BADEA, C. ; HEDLUND, L.W. ; FIGUEIREDO, J.L. ; SOSNOVIK, D.E. ; JOHNSON, G.A. ; WEISSLEDER, R.: High-resolution imaging of murine myocardial infarction with delayed-enhancement cine micro-CT. In: *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 292 (2007), S. H3172–H3178
- [Nelson u. a. 1995] NELSON, D.M. ; TRÉGUER, P. ; BRZEZINSKI, M.A. ; LEYNAERT, A. ; QUÉGUINER, B.: Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. In: *Global Biogeochem. Cycles* 9 (1995), S. 359–372
- [Niebuhr 2010] NIEBUHR, N.: *Konstruktion von Offshore-Gründungsstrukturen nach biologischem Leichtbauverfahren*, University of technology, business and design - Hochschule Wismar, Diplomarbeit, 2010
- [O'Connell 2006] O'CONNELL, M.: *Carbon Nanotubes - Properties and Applications*. Taylor & Francis Group, 2006
- [Ohm u. a. 1999] OHM, J.R. ; BUNJAMIN, F. ; LIEBSCH, W. ; MAKAI, B. ; MULLER, K. ; SMOLIC, A. ; ZIER, D.: A multi-feature description scheme for image and video database retrieval. In: *Multimedia Signal Processing, 1999 IEEE 3rd Workshop on IEEE*, 1999, S. 123–128

- [Padula u. Sandridge 1993] PADULA, S. ; SANDRIDGE, C.A.: Passive/active Strut Placement by Integer Programming. In: BENDSØE MP, Mota S. (Hrsg.): *Topology Design of Structures*, Kluwer Academic Publishers, 1993, S. 145–156
- [Park u. Grandhi 2011] PARK, I. ; GRANDHI, RV.: Quantifying multiple types of uncertainty in physics-based simulation using Bayesian model averaging. In: *The American Institute of Aeronautics and Astronautics* 49 (2011), S. 1038–1045
- [Payne 2008] PAYNE, R.M.: *A Knowledge-Based Engineering Tool for Aiding in the Conceptual Design of Composite Yachts*, University of New South Wales, Sydney, Australia, Diss., Mai 2008
- [Payne u. Kelly 2006] PAYNE, R.M. ; KELLY, D.: Knowledge-based Engineering and Yacht Design. In: *High Performance Yacht Design Conference* University of Auckland, NZ, 2006, S. 14–16
- [Pickett-Heaps 1998] PICKETT-HEAPS, J.D.: Cell division and morphogenesis of the centric diatom *Chaetoceros decipiens* (Bacillariophyceae) II. Electron microscopy and a new paradigm for tip growth. In: *J. Phycol.* 34 (1998), S. 995–1004
- [Poll u. a. 1999] POLL, W.H. ; VRIELING, E.G. ; GIESKES, W.W.C.: Location and expression of frustulins in the pennate diatoms *Cylindrotheca fusiformis*, *Navicula pelliculosa*, and *Navicula salinarum* (Bacillariophyceae). In: *J. Phycol.* 35 (1999), S. 1044–1053
- [Ponn u. Lindemann 2011] PONN, J. ; LINDEMANN, U.: Gewichtsoptimierte Produkte. Version: 2011. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20580-4_9. In: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Springer Berlin Heidelberg, 2011 (VDI-Buch). – DOI 10.1007/978-3-642-20580-4_9. – ISBN 978-3-642-20579-8, S. 209–224
- [Poulsen u. a. 2003] POULSEN, N. ; SUMPER, M. ; KRÖGER, N: Biosilica formation in diatoms: characterization of native silaffin-2 and its role in silica morphogenesis. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100 (2003), S. 12075–12080
- [Prager 1974] PRAGER, W.: A note on discretized Michell structures. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3 (1974), S. 349–355
- [Ravela u. Manmatha 1998] RAVELA, S. ; MANMATHA, R.: On Computing Global Appearance Similarity in Images. In: *Proc. 4th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV 98)*, 1998
- [Rechenberg 1973] RECHENBERG, I.: *Evolutionsstrategie Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. (1973)
- [Rechenberg 1994] RECHENBERG, I.: *Evolutionsstrategie '94*. Frommann Holzboog, 1994

-
- [Riley u. Grandhi 2011] RILEY, ME. ; GRANDHI, RV.: Quantification of model-form and predictive uncertainty for multi-physics simulations. *Comput Struct* 89:. In: *Computers & Structures* 89 (2011), S. 1206–1213
- [Ringertz 1986] RINGERTZ, U.T.: A Branch and Bound - Algorithm for Topology Optimization of Truss Structures. In: *Engineering Optimization* 10 (1986), S. 111–124
- [Roskam 2005] ROSKAM, J.: *Airplane design*. 4. Ottawa and Kan : Roskam Aviation and Engineering Corp., 2005. – ISBN 9781884885426
- [Round u. a. 1990] ROUND, R.E. ; CRAWFORD, R.M. ; MANN, D.G.: *The diatoms*. Press Syndicate of the University of Cambridge, 1990
- [Sauter u. a. 2000] SAUTER, J. ; FRICKE, H. ; GÜNGÖR, Z. ; HIMMLER, G. ; HOUGARDY, P. ; LAUBER, B. ; MÜLLER, O. ; NEITHARDT, W. ; SCHIRRMACHER, R.: Integrierte Topologie- und Gestaltoptimierung im virtuellen Produktentstehungsprozess. In: *VDI Berichte* 1559 (2000). http://www.ipek.uni-karlsruhe.de/medien/veroeffentlichungen/vdi_2000/2000-09-14_vdi_wuerzburg_final.pdf
- [Schaur 1979] SCHAUR, E.: *Mitteilungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke (II), Universität Stuttgart*. Bd. 21: *Grundlagen: Form, Kraft, Masse; mit einem Beitrag und einer Diskussion über das Ästhetische*. Stuttgart : Krämer, 1979. – ISBN 3–7828–2021–5
- [Schubert 2003] SCHUBERT, E.: *Untersuchungen zum Leichtbau mit Hilfe lasergestützter Mischbauweisen*. BIAS Verlag, 2003. – ISBN 9783933762139
- [Schumacher 2005] SCHUMACHER, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, 2005
- [Sherr u. Sherr 2007] SHERR, E.B. ; SHERR, B.F.: Heterotrophic dinoflagellates: a significant component of microzooplankton biomass and major grazers of diatoms in the sea. In: *Mar. Ecol. Prog.* 352 (2007), S. 187–197
- [Smetacek 1999] SMETACEK, V.: Diatoms and the ocean carbon cycle. In: *Protist* 150 (1999), S. 25–32
- [Smetacek 2001] SMETACEK, V.: A watery arms race. In: *Nature* 411 (2001), Nr. 6839, S. 745–745
- [SolidThinking inc. 2012] SOLIDTHINKING INC.: *SolidThinking Inspire Produktbroschüre*. http://www.solidthinking.com/pdf/en-US/sTinspired90brochure_Letter.pdf. Version: 2012, Abruf: 07.01.2013
- [Spath u. a. 2002] SPATH, D. ; NEITHARDT, W. ; BANGERT, C.: Optimized design with topology and shape optimization. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 216 (2002), S. 1187–1191

- [Speck u. Harder 2006] SPECK, T ; HARDER, D.: Bionics or Biomimetics: Taking a leaf out of nature's book. In: *BIOKON Bionic Competence-Network - Creative transfer of biological principles into engineering* (2006), S. 4–6
- [Speck u. a. 2006] SPECK, T. ; HARDER, D. ; MILWICH, M. ; SPECK, O. ; STEGMAIER, T.: Die Natur als Innovationsquelle. In: *Technische Textilien* (2006), S. 83–101
- [Speck u. a. 2012] SPECK, T. ; SPECK, O. ; BARGEL, H. ; NEINHUIS, C.: *Bionik - Faszinierende Lösungen der Natur für die Technik der Zukunft*. Lavori Verlag, 2012
- [Stander u. Graig 2002] STANDER, N. ; GRAIG, K.: On the robustness of a simple domain reduction scheme for simulation-based optimization. In: *Engineering Computations* 19 (2002), S. 431–450
- [Sumper 2002] SUMPER, M.: A phase separation model for the nanopatterning of diatom biosilica. In: *Science* 295 (2002), S. 2430–2433
- [Sumper u. Brunner 2008] SUMPER, M. ; BRUNNER, E: Silica biomineralisation in diatoms: the model organism *Thalassiosira pseudonana*. In: *ChemBioChem* 9 (2008), S. 1187–1194
- [Sumper u. Kröger 2004] SUMPER, M. ; KRÖGER, N.: Silica formation in diatoms: the function of long-chain polyamines and silaffins. In: *J. Mater. Chem.* 14 (2004), S. 2059–2065
- [Takeda 1998] TAKEDA, S.: Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic waters. In: *Nature* 393 (1998), S. 774–777
- [VDI 2221 1993] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. 5 1993
- [VDI 2222 Blatt 1 1997] VDI 2222 BLATT 1: *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. 6 1997
- [VDI 2223 2004] VDI 2223: *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Januar 2004
- [VDI 6220 Blatt 1 2012] VDI 6220 BLATT 1: *Bionik - Konzepte und Strategie*. 12 2012
- [VDI 6224 Blatt 2 2012] VDI 6224 BLATT 2: *Bionische Optimierung*. 8 2012
- [Wallace u. Jakiela 1993] WALLACE, D.R. ; JAKIELA, M.J.: Automated product concept design: unifying aesthetics and engineering. In: *Computer Graphics and Applications, IEEE* 13 (1993), july, Nr. 4, S. 66 –75. <http://dx.doi.org/10.1109/38.219453>. – DOI 10.1109/38.219453. – ISSN 0272–1716
- [Wüchner u. Bletzinger 2005] WÜCHNER, R. ; BLETZINGER, K.-U.: Stress-adapted numerical form finding of pre-stressed surfaces by the updated reference strategy. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 64 (2005), S. 143–166

-
- [Wiedemann 1984] WIEDEMANN, J.: Gewichts- und kostenorientierte Zielmodelle in Einsatzkriterien, Konstruktionsprinzipien und Probleme des Leichtbaus. In: *Vortrag Technische Akademie Esslingen*, 1984
- [Wiedemann 2007] WIEDEMANN, J.: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (Klassiker der Technik)
- [Wilken u. a. 2011] WILKEN, S. ; HOFFMANN, B. ; HERSCH, N. ; KIRCHGESSNER, N. ; DIELUWEIT, S. ; RUBNER, W. ; HOFFMANN, L.J. ; MERKEL, R. ; PEEKEN, I.: Diatom frustules show increased mechanical strength and altered valve morphology under iron limitation. In: *Limnology and oceanography* 56 (2011), Nr. 4, S. 1399–1410
- [Xing u. a. 2012] XING, D.H. ; CHEN, W. ; ZHAO, L. ; MA, J.F.: Structural bionic design for high-speed machine tool working table based on distribution rules of leaf veins. In: *Science China Technological Sciences* 55 (2012), Nr. 8, S. 2091–2098
- [Yeong u. a. 2013] YEONG, WY ; YAP, CY ; MAPAR, M ; CHUA, CK: State-of-the-art review on selective laser melting of ceramics. In: *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013* CRC Press, 2013, S. 65
- [Zhao u. a. 2010] ZHAO, L. ; MA, J. ; WANG, T. ; XING, D.: Lightweight Design of Mechanical Structures based on Structural Bionic METHodology. In: *Journal of Bionic Engineering* 7 (2010), S. 224–231. [http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6529\(09\)60239-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6529(09)60239-0). – DOI 10.1016/S1672–6529(09)60239–0
- [Zimmer 2000] ZIMMER, J.: *Verfahren zur Konstruktion eines Bauteils und Wischanlagenbauteil*. DE10053299A1, 10 2000

Studentische Arbeiten

In der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind:

- **Etienne Babnik**, Entwicklung einer biologisch inspirierten Grid-Versteifung für zukünftige Flugzeugschalen, 2014
- **Isabelle Ciomber**, Kerbspannungsreduzierung durch Geometriemodifikation nach Vorbild pennater Diatomeen, 2013
- **Patrick Haufe**, Leichtbauoptimierung von Strukturen für Hochleistungsrennyachten auf der Basis von pennaten Diatomeen Schalen, 2011
- **Patrick Haufe**, Analyse des Leichtbaupotentials von parametrischen fraktalen Waben unter statischer Belastung mittels numerischer Methoden, 2013
- **Robert Naguschewski**, Leichtbau-Optimierung an Wabenkreisplatten nach Vorbild von Diatomeen, 2012
- **David Seseke**, Vergleich biologisch inspirierter und optimierter Balkenstrukturen, 2014
- **Paul Sommer**, Biologisch inspirierte Flächenversteifungen nach dem Vorbild der Diatomeen, 2014
- **Malte Wiedmann**, Parametrische Strukturoptimierung von Gründungsstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen, 2014

Liste der wissenschaftlichen Veröffentlichungen

Im Rahmen dieser Dissertation wurden folgende wissenschaftlichen Arbeiten veröffentlicht:

1. **Maier M.; Hamm C.:** ELiSE3D - A database-driven engineering and design tool. In: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED11 Bd. 9. The Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, Denmark: The Design Society (2011) S. 50-60
2. **Maier, M.; Schulz, J.; Thoben, K.D.:** Verfahren zur funktionalen Ähnlichkeitssuche technischer Bauteile in 3D-Datenbanken. In: Datenbank Spektrum 12 (2012), S. 131-140
3. **Maier, M.; Siegel, D.; Thoben, K.D.; Niebuhr, N.; Hamm, C.:** Transfer of Natural Micro Structures to Bionic Lightweight Design Proposals. In: Journal of Bionic Engineering 10 (2013), Nr. 4, S. 469-478
4. **Maier, M.; Niebuhr, N.; Hamm, C.; Thoben, K.D.:** Beitrag zur Konstruktionsmethodik des bionischen Leichtbaus - Exemplarisch dargestellt am Beispiel der Leichtbaustrukturen mariner Planktonorganismen. In: Lightweight Design 3 (2015), S. 34-39

Bei den Veröffentlichungen Nr. 2 und 3 handelt es sich um begutachtete Veröffentlichungen in Zeitschriften mit Review-Verfahren.

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Name Moritz Maier
Anschrift Schillerstr. 48
27570 Bremerhaven
Geburstag 23.05.1983
Geburtsort Heidenheim an der Brenz



Schulbildung und Studium

1993-2002 Max-Planck-Gymnasium in Heidenheim
2003-2009 Luft & Raumfahrttechnik Studium an der Universität Stuttgart
Studienarbeit: Institut für Raumfahrtsysteme: Untersuchung zur effizienten Beleuchtung von Photobioreaktoren in Lebenserhaltungssystemen
Diplomarbeit: Institut für Flugzeugbau: Gewichtsoptimierung eines textilen RAM-Air Flügels unter Berücksichtigung der angreifenden Kräfte
2009-2015 Doktorand, Universität Bremen, FB4

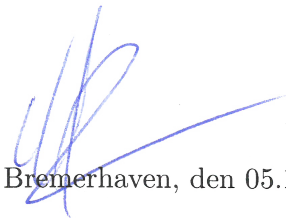
Berufserfahrung und Qualifikationen

1993-2002 Christliche Pfadfinderschaft Deutschlands
1998-2001 CMC - Centrum for Marketing and Communication: Fachrichtung „Design und Programmierung“
2000-2008 Luminosity Webdesign | Webhosting GbR: Geschäftsführung
2002-2003 Zivildienst (Dialyse Heidenheim)
2003 Paul HARTMANN AG: Praktikum bei MF Marketing und Marktforschung
2004 Dreamland GmbH - Agentur für neue Medien: Freelancer im Bereich Programmierung
2005 Internationaler Bund, Stuttgart: IT-Betreuung
2005-2006 Airbus S.A.S.: 6-monatiges Auslandspraktikum in TLS Frankreich
2006-2011 P3 Ingenieurgesellschaft mbH: Beratung im Bereich Programmierung und Datenbanken (u.a. für Porsche AG, Daimler AG)
2009-2012 IMARE - Institut für Marine Ressourcen GmbH: Stellv. Abteilungsleiter Marine Strukturen und Nanomaterialien
Seit 2011 Weser-Metall GmbH: Freelancer im Bereich Softwareentwicklung
Seit 2012 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung: Bionischer Leichtbau, Gruppenleiter Forschung und Entwicklung

17. September 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Dissertation selbstständig ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche einzeln kenntlich gemacht. Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden und auch nicht veröffentlicht worden. Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.



Bremerhaven, den 05.12.2014

