



Ansätze zur Entwicklung von
Tiefsee-Membranhalterungen nach Vorbild von
diffusiven und druckfesten Porengeometrien
unterschiedlicher Diatomeen

Approaches to developing
deep sea membrane holders after model of
diffusive and pressure-resistant pore geometries
of different diatoms

Bachelor-Thesis

Simone Andresen

Matrikel-Nummer: 355749

Abgabe: 17.12.2015

Gutachterin und Gutachter:

Prof. Dr. Susanna Labisch

Dr. Christian Hamm

Zusammenfassung

Effektives und nachhaltiges Umweltmonitoring ist grundlegend für umweltschützende Maßnahmen und Forschungsarbeiten. Die dabei zur Identifizierung und Quantifizierung von Partikeln verwendeten Massenspektrometer weisen u.a. ein Probeneinlasssystem auf, welches für ein optimales Registrieren der Partikel in der Tiefsee sowohl sehr druckfest, als auch sehr permeabel sein muss.

In dieser Arbeit werden in diesem Zusammenhang Porenstrukturen von Diatomeen (Kieselalgen) untersucht, die aufgrund der Notwendigkeit des Stofftransports und der Funktion ihres Exoskeletts eine hohe Permeabilität und Druckfestigkeit aufweisen. Mit Hilfe der Finite Elemente Methode werden die konstruierten Strukturen hinsichtlich ihrer Diffusionseigenschaften und der Durchbiegung bei Druckbelastung sowohl untereinander, als auch mit aktuell verwendeten Membranhalterungen aus gesinterten Strukturen und Stahlfedern verglichen.

Die Ergebnisse zeigen in Bezug auf die Auslegung einer optimalen Probeneinlassstruktur, dass durch die bionischen Strukturen ein Kompromiss zwischen Diffusion und Durchbiegung ermöglicht werden kann. Auf Grundlage der Resultate werden die Einflüsse unterschiedlicher Strukturelemente auf die Diffusion und die Steifigkeit diskutiert. Dabei sind für die Struktur einer innovativen Membranhalterung sowohl die Auslegung einer bestmöglichen Porengröße der Stützstruktur für die aufliegende Membran, als auch die Integration versteifender Elemente von großer Bedeutung.

Abschließend wird ein erster Ansatz zur Entwicklung einer optimierten Membranhalterung für Probeneinlasssysteme in der Tiefsee vorgestellt.

Schlagwörter: *Areole, Bionik, Durchbiegung, Finite Elemente Methode, Frustel, Probeneinlasssystem, Techno-Pull-Prozess*

Abstract

Effective and sustainable environmental monitoring is fundamental for environmental protection measures and research. The mass spectrometer used in these cases for identification and quantification of particles is inter alia made of a sample inlet system (SIS), which has to be both very pressure-resistant, and very permeable for an optimal registration of particles in the deep sea.

In this work, pore structures of diatoms are examined, which also have a high permeability and compressive strength due to the need of mass transfer and the function of their exoskeleton. Using the finite element method, the 3D-modelled structures are compared regarding their diffusion properties and the deflection at pressure load both among themselves, and with the currently used SIS - membrane holders of sintered structures and steel springs.

With respect to the design of an optimal sample inlet structure, the results show that the bionic structures allow a compromise between diffusion and deflection. Based on the results the effects of different structural elements on the diffusion and the stiffness are discussed. Both the design of the best possible pore size of the support structure for the membrane, and the integration of stiffening elements are of great importance for the structure of an innovative membrane holder.

Finally a first approach to the development of an optimized membrane holder for sample inlet systems in the deep sea is presented.

Keywords: *areola, biomimicry, deflection, finite element method, frustule, sample inlet system, techno-pull-process*

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung	Gleichungen
Lateinische Kleinbuchstaben			
c	mol m^{-3}	Konzentration	-
$c_2 - c_1$	mol m^{-3}	Konzentrationsunterschied	(3) (10)
f	-	charakteristischer Exponent	(4)
j	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Diffusionsstromdichte	(10)
l	m	Länge	(6) (7)
p	Pa	Druck	(7) (8)
q	N m^{-1}	Streckenlast	(6) (7)
r	m	Radius	(8)
w	m	Durchbiegung	(5) (6)
w_{max}	m	maximale Durchbiegung	(8)
w^*	-	dimensionslose Durchbiegung	(5)
x	m	Ortskoordinate	(6)
Lateinische Großbuchstaben			
A	m^2	Fläche	(2) (3) (7)
A_B	m^2	Bezugsgröße der Fläche für die Entdimensionierung	(2)
A^*	-	dimensionslose Fläche	(2)
D	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Diffusionskoeffizient	(3) (10)
E	Pa	Elastizitätsmodul des soliden Materials	(4) (6) (9)
E_P	Pa	Elastizitätsmodul des porösen Materials	(4)
I	m^3	Trägheitsmoment der Schnittfläche je Einheit der Schnittlänge	(9)
J	mol s^{-1}	Diffusionsstrom	(1) (3)
J_B	mol s^{-1}	Bezugsgröße des Diffusionsstroms (notwendig für die Entdimensionierung)	(1)
J_y	m^4	Flächenträgheitsmoment	(6)
J^*	-	dimensionsloser Diffusionsstrom	(1)
K	N m	Plattensteifigkeit	(8) (9)
P	-	Porosität	(4)
P_c	-	kritische Porosität	(4)
W_B	m	Bezugsgröße der Durchbiegung für die Entdimensionierung	(5)
Griechische Buchstaben			
ρ	kg m^{-3}	Dichte	-
μ	-	Querkontraktionszahl	(9)
Sonstige			
Δx	m	Höhe des Modells	(3) (10)

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Bionische Verfahren.....	1
1.2	Einführung in das technische Problem.....	1
1.3	Aktueller Stand der Technik	2
1.4	Diatomeen: Vorbilder aus der Natur	3
1.5	Finite Elemente Methode	4
1.6	Arbeitshypothese.....	4
2	Material und Methode	5
2.1	Biologische Vorbilder	5
2.2	Konstruktion.....	7
2.3	Diffusion	8
2.4	Durchbiegung der Gesamtstruktur	11
2.5	Durchbiegung der Membran und Stützstruktur.....	15
3	Ergebnisse	18
3.1	Konstruktion.....	18
3.2	Diffusion	19
3.3	Durchbiegung der Gesamtstruktur	25
3.4	Durchbiegung der Membran und Stützstruktur.....	27
3.5	Übersichtsdarstellung der Ergebnisse	29
4	Diskussion und Ausblick	31
4.1	Diffusion	31
4.2	Durchbiegung der Gesamtstruktur	34
4.3	Durchbiegung der Membran und Stützstruktur.....	35
4.4	Ausblick und Bedeutung der Ergebnisse für das technische Problem.....	38
4.5	Weitere Anwendungsbereiche	41
5	Fazit	41
6	Literaturverzeichnis	42
6.1	Literatur.....	42
6.2	Patente	43
6.3	Sonstige Quellen	43

Anhang

1 Einleitung

1.1 Bionische Verfahren

Die Bionik stellt eine Wissenschaftsdisziplin dar, die sich systematisch mit der Umsetzung biologischer Systeme in die Technik beschäftigt. Dabei werden Verfahren, Strukturen und Bewegungsabläufe abstrahiert, um sie anschließend in der Technik anwenden zu können (Nachtigall 2002).

Für die Umsetzung von Prinzipien der Natur in die Technik sind stets Abstraktions- und Modifikationsschritte notwendig. Es wird zwischen zwei bionischen Vorgehensweisen unterschieden: In dem „Bio-Push-Prozess“ führen abstrahierte Ergebnisse der biologischen Grundlagenforschung zu verschiedenen Anwendungen in der Technik. Dem gegenüber steht der „Techno-Pull-Prozess“. Dieser zeichnet sich durch die Präzision von Problemstellungen in der Anwendung aus, für die Alternativen bzw. Lösungen in der Natur gesucht werden (Kesel 2011).

Im Folgenden wird nach dem „Techno-Pull-Prozess“ ein technisches Problem erläutert, für das daraufhin in der Natur eine Lösung gefunden wird.

1.2 Einführung in das technische Problem

Effektives und nachhaltiges Umweltmonitoring ist grundlegend für umweltschützende Maßnahmen und Forschungsarbeiten. Biologische Produktivität und biogeochemische Ströme werden durch eine Vielfalt an Mikro- und Makronährstoffen, sowie Giftstoffen stark beeinflusst (Fraústo, Williams 2001). Die Identifizierung und Quantifizierung von gelösten Gasen und leichtflüchtigen organischen Komponenten im aquatischen Ökosystem können wichtige Informationen über dynamische, biogeochemische Prozesse liefern (Hemond, Camilli 2002).

Das Umweltmonitoring wird vor allem durch die Güte der zur Verfügung stehenden Daten und Messgrößen bestimmt. Um systematisch umweltrelevante Stoffe zu erfassen, ist eine hohe Qualität der eingesetzten Analysesysteme von großer Bedeutung. Dabei ermöglichen Sensoren, die direkt bzw. online in aquatischen Systemen eingesetzt werden, eine kontinuierliche, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Detektion von Schadstoffen. Verwendet werden hierbei Unterwasser-Massenspektrometer (Hemond, Camilli 2002; Kibelka et al. 2004; Wenner et al. 2004).

Die Sensoren, die aktuell beispielsweise für die Detektion von klimarelevanten Treibhausgasen wie Methan oder CO₂ eingesetzt werden, verfügen u.a. über Probeneinlasssysteme (SIS, sample inlet system) (Abb. 1). Diese müssen einerseits sehr druckfest sein, um eine hohe, maximale Einsatztiefe zu garantieren, andererseits zum Erreichen einer minimalen Nachweisgrenze der gelösten Substanzen sehr permeabel. Die heute produzierten SIS erfüllen jedoch nur eine dieser beiden Anforderungen zufriedenstellend und limitieren so die Detektion von Schadstoffen (Wenner et al. 2004).

In diesem Zusammenhang sollen innovative Probeneinlasssysteme für Sensoren zur kontinuierlichen Umweltüberwachung entwickelt werden (Hamm 2015). Das modular einsetzbare Probeneinlasssystem soll mit der Entwicklung einer innovativen Membranhalterung erstmals sowohl eine hinreichende mechanische Festigkeit, als auch eine hohe Gaspermeabilität aufweisen. In Kombination mit einer Anpassung der permeablen, druckfesten Struktur an einem Sensor gilt es außerdem, durch ein innovatives Temperaturmanagement den Energieverbrauch und die Nachweisgrenze des Sensorsystems zu verbessern.

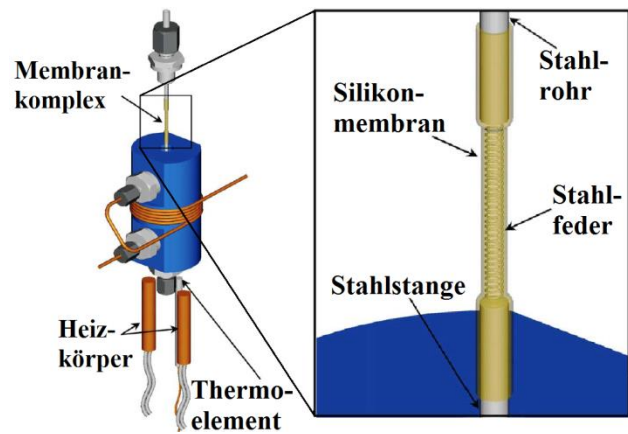


Abbildung 1: Schematische Detailzeichnung des Membrangehäuses (links) und dem Probeneinlasssystem mit der Silikonmembran und der in diesem Fall als Membranhalterung verwendeten, inneren Druckfeder (rechts) (nach R. Hildebrand, Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, in Wenner et al. 2004).

Das neue Probeneinlasssystem soll eine schnelle Detektion von geringsten Konzentrationen umweltrelevanter Stoffe und Messgrößen in großen Einsatziefen ermöglichen. Dies ist beispielsweise im Falle von Schiffshavarien von großer Bedeutung, um diese schnell zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Ein weiteres Einsatzgebiet stellt die Analyse von Klimaveränderungen dar, in denen die Freisetzung von u.a. Methan aus dem Meeresboden und den Sedimenten in Feuchtgebieten eine entscheidende Rolle spielt, die mit einer hohen Sensitivität der Messgeräte hoch auflösend detektiert werden kann (Hamm 2015).

1.3 Aktueller Stand der Technik

Die meisten kommerziell erwerblichen Messinstrumente zur Ermittlung von Spurengasen und leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen beinhalten ein Probeneinlasssystem und einen angeschlossenen Sensor. Die wässrige Matrix, in der die zu detektierenden Substanzen gelöst sind, wird durch einen Probeneinlass über die Außenseite einer Membran aus Polydimethylsiloxan gepumpt. Die hydrophobe Membran sorgt für die alleinige Permeabilität der zu untersuchenden Substanzen und separiert diese so von der Matrix. Im angeschlossenen System werden die Substanzen anschließend quantifiziert. Aufgrund des hohen Drucks in tiefen Gewässern und des Normaldrucks oder sogar Vakuums im Innern des Probeneinlasssystems, wirkt ein hoher Druckunterschied auf die Membran. Folglich ist eine Stützstruktur, die eine hohe Druckfestigkeit aufweist, sowie gleichzeitig permeabel ist, unausweichlich (Wenner et al. 2004).

Aktuell bestehen die leistungsfähigsten, in der Anwendung bereits etablierten Membranhalterungen zu Gunsten hoher Druckfestigkeit aus vergleichsweise dicken, porös gesinteren Strukturen (Abb. 2) mit unterschiedlichen Geometrien. Neben planaren Strukturen (z. B. CONTROS Systems and Solutions GmbH) finden sich auch zylindrische Formen

(US 2014/0283626 A1). Diese werden für den Einsatz in tieferen Gewässern verwendet und sind druckfest (Hamm 2015). Der Nachteil besteht darin, dass während des Sinterprozesses selbst geringe Temperaturgradienten zu starken Ergebnisunterschieden in der Porosität führen, weshalb die Qualität des Herstellungsprozesses schwer zu reproduzieren ist. Weiter führt die Porenstruktur

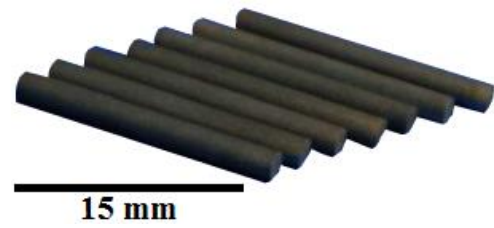


Abbildung 2: Gesinterte, zylindrische Membranhalterungen aus Edelstahl (nach Gentz, Weißgärber 2011).

des gesinterten Materials zu einer unzureichenden Diffusion der zu detektierenden Gase und damit zu einer zeitlichen Differenz zwischen dem Transfer der Gase durch die Membran und der eigentlichen Messung (Hamm 2015).

Des Weiteren werden auch Stahlfedern als Membranhalterungen verwendet (Schlüter, Gentz 2008). Diese weisen aufgrund ihrer Wickelstruktur (Abb. 1) eine hohe Porosität auf. Jedoch ist ihre Druckfestigkeit nur gering und die Einsatztiefe folglich sehr begrenzt.

Somit ist die Entwicklung einer neuen Membranhalterung, die sich durch eine hinreichende Druckfestigkeit, wie auch eine hohe Porosität auszeichnet, für ein exakteres Umweltmonitoring von großer Notwendigkeit.

1.4 Diatomeen: Vorbilder aus der Natur

Diatomeen (Kieselalgen) sind unizelluläre, eukariotische Mikroorganismen. Es wird von 100.000 limnischen und marinen Spezies ausgegangen, die in vielen faszinierenden, hochkomplexen Formen auftreten (Round et al. 1990). Die photosynthetisch aktiven Organismen weisen Größen von 5 bis 500 μm auf (Hürlimann et al. 2007). Im Allgemeinen wird zwischen radial-symmetrischen Centrales und langgestreckten, bilateral-symmetrischen Pennales unterschieden (Bäuerlein 2003).

Das wichtigste morphologische Merkmal der Diatomeen ist ihre feste, silifizierte Zellhülle, die Frustel. Diese sorgt mit ihren Bestandteilen für eine vollständige, schützende Umhüllung des Protoplasten (Abb. 3). Weiter führen organische Substanzen zu einem präzisen Aneinanderfügen von Ober-/ Unterseite (Valva) und Gürtelband (Bäuerlein 2003).

Die Frustel besteht aus einer Wabenstruktur aus hexagonalen Kammern, den Areolen (Abb. 4), die aufgrund ihrer Architektur und Materialeigenschaften eine hohe Festigkeit aufweisen und Belastungen von bis zu 7 N mm^{-2} standhalten können (Hamm et al. 2003). Dies scheint das Resultat einer Koevolution der Diatomeen und ihrer häufigen Fressfeinden, den Copepoden (Ruderfußkrebse), zu sein (Friedrichs et al. 2013).

Die Areolengeometrien sind speziesspezifisch und teilweise sehr komplex (Round et al. 1990). Das Schema in Abb. 4 weist ein proximales Foramen (rundliche Öffnung) und eine distale kleine Porenstruktur auf. Dieser Aufbau jedoch nicht allgemein gültig, sondern kann auch umgekehrt vorliegen. Allen Diatomeen ist jedoch gemein, dass ihre Frustel nicht nur einen Panzer zum Schutz gegenüber Fressfeinden darstellt, sondern auch den Partikelaustausch mit der Umgebung bedingt. Das Selektieren von Partikeln ermöglicht das

Passieren bestimmter Nährstoffe, die die Zellwand und ihre Rezeptoren erreichen können. Andere, größere Partikel (Viren, Bakterien, Parasiten) werden dahingegen abgewiesen (Hale, Mitchell 2001).

Es sind bereits erste Experimente zur Permeation der Frustel von *Coscinodiscus* durchgeführt worden (Losic et al. 2006b), jedoch mangelt es noch an detaillierteren Untersuchungen.

Die hochkomplexe Diatomeenfrustel, die sich durch eine hohe Festigkeit und Permeabilität auszeichnet, stellt gleichzeitig eine Leichtbaustruktur dar und wird im weiteren Verlauf anhand ausgewählter Beispiele untersucht.

1.5 Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode (FEM) dient der numerischen Berechnung von Bauteilen, indem diese in eine endliche Anzahl von Elementen zerlegt werden (Klein 2012). So können in einem CAD-Programm (Computer Aided Design) konstruierte Festkörper in einer Simulation Belastungen ausgesetzt und die entstehenden Verformungen ermittelt werden.

1.6 Arbeitshypothese

In dieser Arbeit werden Areolengeometrien unterschiedlicher Diatomeen mit einem CAD-Programm konstruiert, wobei möglichst wenige Parameter der Geometrie abstrahiert werden. Die konstruierten Modelle werden anschließend mit der FE-Methode auf ihre Diffusion und die Durchbiegung der Gesamtstruktur der zylindrischen Membranhalterung, sowie die Durchbiegung einer aufliegenden Membran hin untersucht und miteinander verglichen. Als Referenz gelten eine in der Technik bereits vorhandene Stahlfeder, sowie eine gesinterte Membranhalterung. Es soll gezeigt werden, dass die von den Diatomeen abgeleiteten Membranhalterungen ein Kompromiss zwischen Diffusion und Durchbiegung ermöglichen. In diesem Zusammenhang sollen Ansätze zur Entwicklung einer optimalen Membranhalterung erarbeitet werden, die eine Kombination der Vorteile beider Referenzhalterungen darstellt: Eine geringe Verformung der gesinterten Struktur, sowie eine hohe Diffusion der Stahlfeder. Weiter sollen aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Areolenstrukturen Erkenntnisse über den Einfluss einzelner geometrischer Parameter auf die Diffusion und die Durchbiegung von Membran und Struktur gewonnen werden.

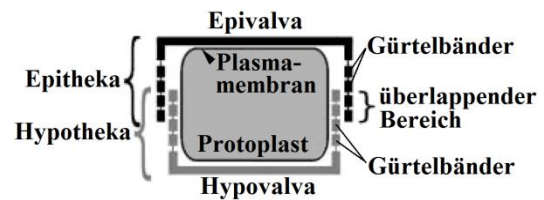


Abbildung 3: Struktur der Diatomeenzellwand, die sich aus zwei Schalen zusammensetzt und mit ihnen den Protoplasten umschließt (nach Kröger, Sumper 2000 in Bäuerlein 2003).

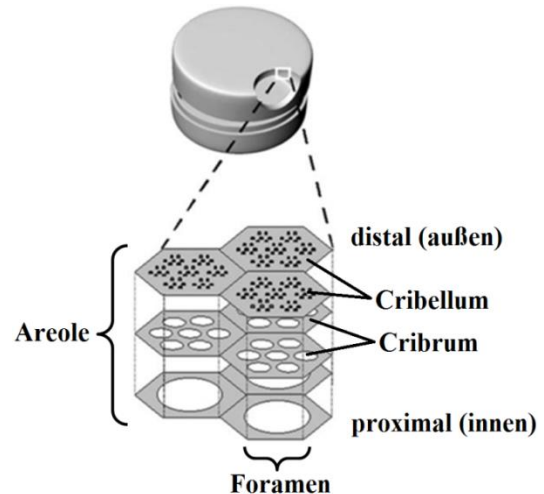


Abbildung 4: Schema der Frustel von Diatomeen der Ordnung Centrales mit einer vergrößerten Querschnittsansicht. Die Frustel besteht aus hexagonalen Kammern, den Areolen. Diese weisen in vielen Fällen auf der einen Seite (hier: proximal) eine rundliche Öffnung auf (Foramen), während die hier abgebildete, distale Seite von einer kleinen Porenstruktur begrenzt ist (oft unterteilbar in Cribrum und Cribellum) (nach Losic et al. 2007).

2 Material und Methode

2.1 Biologische Vorbilder

Es werden fünf Diatomeen der Ordnung Centrales als biologische Vorbilder herangezogen. Die gewählten Diatomeenarten sind zum einen aufgrund der hohen Unterschiede in ihren Areolenstrukturen sehr interessant. Zum anderen sind Publikationen über den Aufbau der Frustel dieser Spezies vorhanden, auf die sich im Folgenden bezogen wird.

Betrachtet wird jeweils nur das Silikatskelett nach Entfernen der organischen Komponenten. Interessant sind dabei vor allem die Nanostrukturen auf der proximalen und distalen Seite der Areole.

Exemplarisch wird für jede Diatomeenart eine Areolengeometrie konstruiert, obwohl sich die Geometrien in vielen Fällen über der Ausdehnung der Frustel leicht verändern (Round et al. 1990). Versteifungselemente, wie beispielsweise die Rippen der Frustel, werden nicht beachtet. Aufgrund der teilweise kaum vorhandenen Publikationen zu den Areolengeometrien werden fehlende Informationen zur Konstruktion eines dreidimensionalen Modells begründet ergänzt. Die Areolengeometrien der verschiedenen Arten mit ihren wichtigsten Unterscheidungsmerkmalen sind in einer morphologischen Übersicht (Tab. 1) aufgeführt. Besonderheiten werden im weiteren Verlauf beschrieben.

Tabelle 1: Die morphologische Übersicht zeigt für die Areolen der fünf untersuchten Diatomeenarten die Lokalisierung von Cribrum, Cribellum und Foramen, sowie den Aufbau der Areolenwand mit teilweise vorhandenen Öffnungen zu benachbarten Areolen oder Löchern innerhalb der Wand.

Art	Cribrum	Cribellum	Foramen	Areolenwand		
				Aufbau	Öffnung in Areolenwand: Verbindungen zwischen Areolen	Löcher innerhalb der Areolenwand: keine Verbindungen zwischen Areolen
<i>Actinocyclus subtilis</i>	distal	distal	proximal	kegelförmig, außen schmaler, innen breiter	nein	ja
<i>Actinoptychus undulatus</i>	proximal	nicht vorhanden	nicht vorhanden; Wabe ist distal einfach offen	dünn mit distal wellenartig geformten Wandhöhen	nein	nein
<i>Arachnoidiscus</i> sp.	Poren sind verbunden zu einer schlauchartigen Gesamtstruktur		proximal	dünn, konstante Dicke über der Höhe	ja	nein
<i>Coscinodiscus</i> sp.	distal	distal	proximal	dünn, konstante Dicke über der Höhe	nein	nein
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	nicht vorhanden	proximal	distal	dünn, konstante Dicke über der Höhe	ja	nein

Actinocyclus subtilis: Die Geometrie wird auf Grundlage der Untersuchungen von Andersen et al. (1986) konstruiert (Abb. 5). Besonders ist die tunnelförmige, zum proximalen Ende konisch zulaufende Kammer der Areole, die aufgrund der vergleichsweise dicken Areolenwand einen geringen Querschnitt besitzt. Die ellipsenartigen Hohlräume in der Areolenwand nehmen in ihrer Größe zum distalen Ende hin ab und sind nicht mit der Kammer verbunden. Proximal schließt die Areole mit dem Foramen ab, während das distale Ende der Areole ein tunnelartiges Cribrum aufweist, das im Querschnitt die Form eines Tropfens besitzt. Innerhalb des Cribrums befindet sich das Cribellum. Es sind keine Publikationen zu der dreidimensionalen Struktur von Cribellum und Cribrum vorhanden.

Actinoptychus undulatus: Die Areolen von *A. undulatus* weisen distal lediglich eine Öffnung auf, während proximal ein Cribrum mit verhältnismäßig großen Öffnungen vorhanden ist (Abb. 6). Die Höhe der dünnen Areolenwände variiert auf der distalen Seite und beschreibt eine undulierende Kontur (Helmcke, Krieger 1953-1977; Round et al. 1990).

Arachnoidiscus sp.: Die Areolen zeichnen sich durch ihre einzigartige, distale Pore aus, die eine bäumchenartig ausgebildete Gesamtstruktur darstellt (Abb. 7). Dahingegen ist die Areole proximal durch ein Foramen geöffnet. Weiter besitzen die Areolenwände jeweils ein Loch und sind so mit der benachbarten Areole verbunden (Helmcke, Krieger 1953-1977).

Coscinodiscus sp.: Detaillierte Aufnahmen (Abb. 8b) von Losic et al. (2006a) dienen als Grundlage für die Konstruktion der Areole von *Coscinodiscus sp.* Deutlich erkennbar sind die runden Foramen auf der Innenseite der Frustel (Abb. 8a), während distal eine



Abbildung 5: Detailansicht (Querschnitt) der Valva mit den Tunnelförmigen Kammern der Areole von *Actinocyclus subtilis*. Die distale, äußere Oberfläche (oben) weist kleine Kammern unterschiedlicher Größe vor, während die Pore proximal von einem Korb (organisch) abgeschlossen wird. Die Wabenwände sind durchlöchert. Der Maßstabsbalken beträgt 1 μm (nach Andersen et al. 1986).

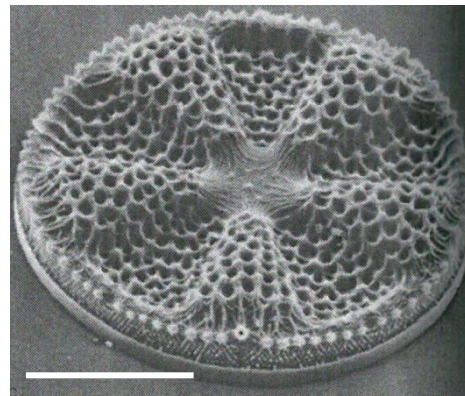


Abbildung 6: Außensicht auf die Frustel von *Actinoptychus undulatus*. Erkennbar sind die gewellten Areolenwände. Der Maßstabsbalken beträgt 10 μm (nach Round et al. 1990).

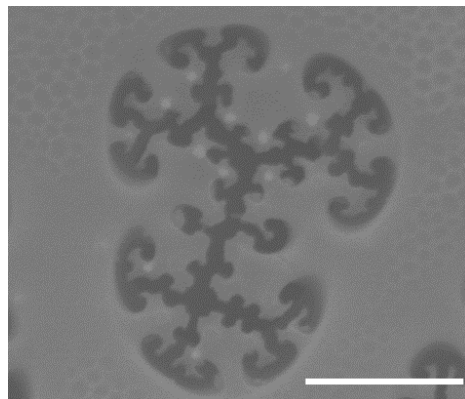


Abbildung 7: REM-Aufnahme einer Areole von *Arachnoidiscus sp.* (Außenansicht). Die Probe wurde vorbereitet wie in Friedrichs et al. (2012) beschrieben. Der Maßstabsbalken beträgt 1 μm (nach AWI/Friedrichs, L. 2007).

Nanostruktur kleiner Poren vorhanden ist. Diese Poren des Cribrum und Cribellum liegen übereinander und sind um mehrere Nanometer eingesenkt (Losic et al. 2006b). Die Anordnung des Cribrum wird der Abb. 8c entnommen.

***Thalassiosira eccentrica*:** Die Areolen von *T. eccentrica* werden in mehreren Publikationen beschrieben und denen von *Coscinodiscus* sp. gegenübergestellt (Losic et al. 2006a, 2006b, 2007; Schmid, Volcani 1983). Sie weisen distal ein Foramen auf, während die Areole proximal durch das Cribrum begrenzt wird (Abb. 9). Die Areolenwände verbinden mit jeweils einem Loch die Areolen untereinander (Bach, Burkhardt 1984).

2.2 Konstruktion

Die Geometrien werden mit der CAD-Software SolidWorks 2008 und 2015 (Dessault Systèmes SolidWorks Corp., Waltham, Massachusetts, USA) erstellt. Die Höhen der Areolen sind dabei jeweils auf 1 μm normiert. Die Grundstruktur stellt ein regelmäßiges Sechseck der Breite 1 μm dar, das dann jeweils modifiziert wird. Die Konstruktion erfolgt mit einer 1000-fachen Vergrößerung, so dass die Breite und die Tiefe einer Areole jeweils 1 mm betragen. Mit Hilfe der Software ImageJ (version 1.48i, National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA) werden die geometrischen Strukturen jeweils im Verhältnis zu der festgelegten Länge und Breite ermittelt, wobei die publizierten, bereits erwähnten Untersuchungen als Grundlage dienen.

Für das abstrahierte Modelle der Stahlfeder (Abb. 10) wird ein Ausschnitt dieser Feder in eine Sechseckstruktur konstruiert. Der Durch-

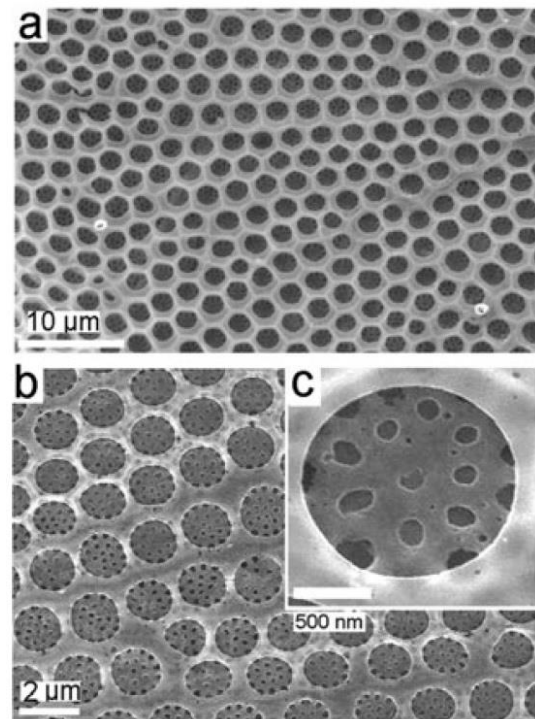


Abbildung 8: Ansichten der inneren Membran der Frustel von *Coscinodiscus* sp. (REM-Aufnahmen), von (a) bis (c) nimmt die Auflösung zu (nach Losic et al. 2006a).

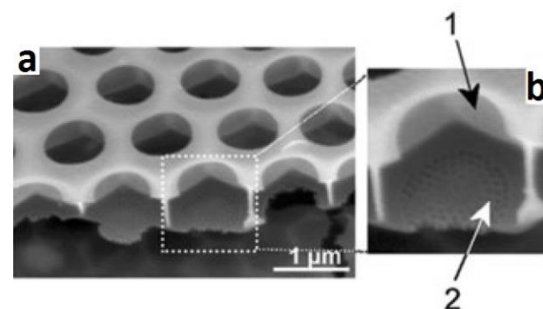


Abbildung 9: REM-Aufnahme der Schale von *Thalassiosira eccentrica*. (a) Sicht auf die Außenseite mit den großen Foramen. (b) Detailansicht einer Wabe mit dem äußeren Foramen (1) und dem inneren Cribrum (2) (nach Losic et al. 2006a).

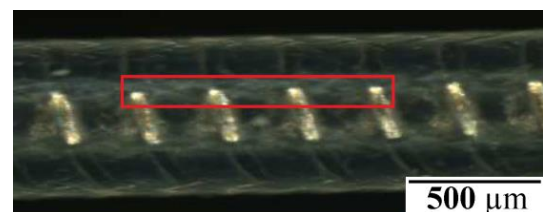


Abbildung 10: Stahlfeder, die bereits als Membranhalterung für Probeneinlasssysteme verwendet wird. Der rot umrahmte Ausschnitt wird in dieser Arbeit modelliert und berechnet (nach Gentz, Schlüter 2011).

messer des Stahlfederdrahts, sowie die Abstände der Drähte zu einander werden in Anlehnung an Gentz und Schlüter (2011) übernommen.

2.3 Diffusion

Die Diffusion gehört, wie die Wärmeleitung, zu Transportphänomenen, bei denen ein Gradient einer gewissen Größe den Transport einer anderen Größe auslöst (Meschede 2010). Analog zur Diffusion, bei der ein Konzentrationsgradient zu einem Massenstrom führt, wird bei der Wärmeleitung durch einen Temperaturgradienten ein Wärmestrom erzeugt. Demzufolge liegen beiden Phänomenen die gleichen mathematischen Gleichungen zugrunde, weshalb im Folgenden die Diffusion als Wärmeleitung durch das jeweilige Negativmodell berechnet wird (Methodik nach CADFEM GmbH). Dazu werden zunächst die Negativmodelle konstruiert, in denen der Areolenhohlraum, durch den diffundiert wird, als Festkörper dargestellt ist.

Konstruktion der Diffusionsmodelle

Die Grundlage der Diffusionsmodelle bildet eine mittig angeordnete Areole, an deren sechs Seitenwänden sich jeweils eine weitere Areole befindet. So werden mögliche Einflüsse durch die Öffnungen in den Areolenwänden mit berücksichtigt. Analog dazu wird für das Stahlfedermodell die konstruierte Sechseckstruktur mittig platziert, sowie angrenzend sechs weitere ebendieser Sechseckstrukturen. Es ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, die Diffusionseigenschaften der gesinterten Struktur mit ihrem inkonsistent komplexen Metallgefüge numerisch zu berechnen, weshalb auf diese Konstruktion verzichtet wird.

Die Diffusion wird als Wärmeleitung durch mit Hilfe von SolidWorks erstellte Negativkörper der Modelle simuliert. Auf die distalen und proximalen Areolenöffnungen des Modells wird jeweils eine dünne Scheibe (Ausgangsgeometrie) mit einer Höhe von 0,05 mm konstruiert, um einheitliche Ausgangsflächen zu erreichen (Abb. 11a).

Zum Vergleich mit einer analytischen Berechnung des Diffusionsstroms wird mit SolidWorks ein Modell aus sieben porenfreien Sechseckwaben erstellt, das in seiner Wabenmaße und -anordnung den Diffusionsmodellen der Areolen entspricht. Dieses Modell stellt so die Diffusion durch einen sechseckigen Hohlraum dar (Hohlraummodell ohne Ausgangsstrukturen). Anschließend werden analog zu den Areolenmodellen Ausgangsstrukturen hinzugefügt, um so numerisch den maximal möglichen Diffusionsstrom ermitteln zu können.

Von allen Diffusionsmodellen werden die Fläche des kleinsten Querschnitts und die Tiefe ebendieser Fläche, sowie das Gesamtvolumen des Modells ausgelesen. Alle Modelle werden als STEP-Dateien abgespeichert und anschließend in ANSYS (ANSYS Workbench 16.1, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA) als Geometrie importiert.

Vernetzung

Die Diffusionsmodelle der Areolen und der Stahlfeder werden in Abhängigkeit von ihrer Geometrie vernetzt. Nach einer automatischen Vernetzung von ANSYS erfolgt im Rahmen einer Gitterstudie eine manuelle Netzverfeinerung in mehreren Schritten. Dabei werden Bereiche kleiner Strukturen feiner vernetzt als große Strukturteile. Analog zu FE-Analysen an biologischen Strukturen einer Forschungsgruppe um Pegg et al. (2013) gilt die Vernetzung als hinreichend, sobald sich die Ergebnisse um weniger als 5 % von den Ergebnissen der folgenden drei feineren Vernetzungen unterscheiden.

Für das Hohlraummodell erfolgt eine einmalige Vernetzung, für die keine Gitterstudie durchgeführt wird. Die Anzahl an Elementen und Knoten, die Elementtypen und die Anzahl an Freiheitsgraden für die Diffusionsmodelle, die jeweils hinreichend vernetzt sind, werden in Tab. 2 exemplarisch aufgelistet.

Alle Diffusionsmodelle hinreichender Vernetzung, sowie detaillierte Angaben zu den Vernetzungsstufen im Rahmen der Gitterstudie können dem Anhang I.i entnommen werden.

Tabelle 2: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Diffusionsmodelle der hinreichenden Vernetzungsstufe. Für den Zylinder wird keine Gitterstudie durchgeführt.

Diffusionsmodell	Vernetzungsstufe	Elemente	Knoten	Anzahl an Freiheitsgraden	Elementtyp
<i>Actinocyclus subtilis</i>	6	8255861	11942052	35826156	SOLID87
<i>Actinoptychus undulatus</i>	6	3052639	4448374	13345122	SOLID87
<i>Arachnoidiscus</i> sp.	3	3061163	4416667	13250001	SOLID87
<i>Coscinodiscus</i> sp.	4	4425547	6737264	20211792	SOLID87
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	5	4596700	6796684	20390052	SOLID87
Stahlfeder	3	1391637	2006234	6018702	SOLID87
Hohlraummodell	-	108031	212184	636552	SOLID87
Hohlraummodell ohne Ausgangsstruktur	-	84909	170064	510192	SOLID87

Materialeigenschaften und Randbedingungen

Den Modellen wird ein fiktives Material mit einem Diffusionskoeffizienten D von $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ zugeordnet. In den Diffusionsmodellen der Areolen werden auf den Außenflächen der Ausgangsgeometrien jeweils konstante Konzentrationen c von 1 mol m^{-3} (distal) und 0 mol m^{-3} (proximal) definiert (Abb. 11a). Analog dazu liegen an den runden Außenflächen des Zylindermodells ebenfalls Konzentrationen von 1 mol m^{-3} und 0 mol m^{-3} vor. Es findet kein Konzentrationsaustausch mit der Umgebung statt.

Berechnungseinstellungen

Die numerischen Berechnungen werden mit dem Modul der thermisch-transienten bzw. thermisch-stationären Analyse von ANSYS durchgeführt.

Das Lösen der Diffusionsmodelle der Areolen mit der ersten Vernetzungsstufe erfolgt zunächst instationär, wobei die notwendige Anzahl an Lastschritten für eine stationäre Lö-

sung jeweils ermittelt wird. Anschließend wird die erste Vernetzungsstufe ebenfalls stationär berechnet.

Im weiteren Verlauf werden für jede feinere Vernetzung im Rahmen der Gitterstudie nur noch stationäre Rechnungen durchgeführt. Das Hohlraummodell wird lediglich stationär gerechnet.

Als Ergebnis werden sowohl die Diffusionsstromdichte im gesamten Modell, als auch der Diffusionsstrom an der äußeren Fläche der Ausgangsgeometrie ausgegeben.

Für die Darstellung der Konzentrationsverteilung in den Diffusionsmodellen wird sowohl bei den Areolengeometrien, als auch bei dem Hohlraum- und Stahlfedermodell ein mittlerer Pfad parallel zur Z-Achse durch das Modell definiert (Abb. 11b). Für diesen aus zwei Punkten (Anhang I.i.c) bestehenden Pfad werden die Konzentrationswerte ermittelt.

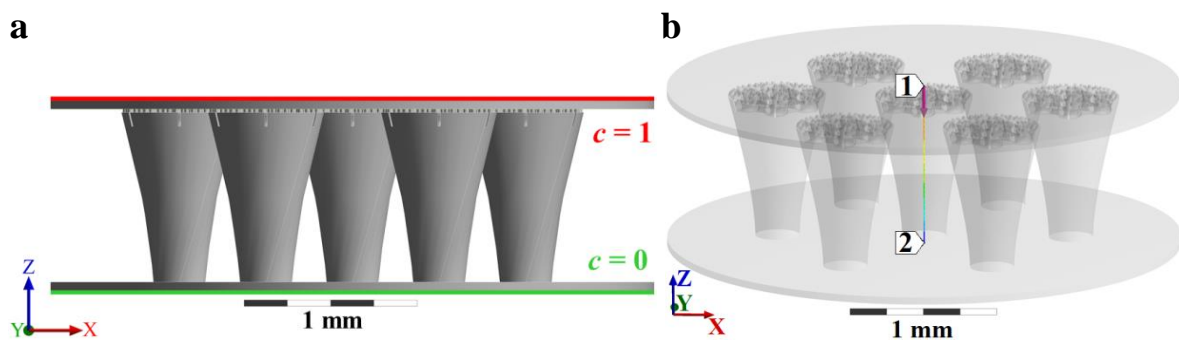


Abbildung 11: (a) Exemplarische Darstellung der Randbedingungen für die Diffusionsberechnung am Modell von *Actinocyclus subtilis*. Das Negativmodell von sieben Areolenstrukturen ist an den Enden von jeweils einer Ausgangsstruktur (Kreisplatte) bedeckt, auf deren Außenflächen die Konzentrationen c von 1 mol m^{-3} (distal) und 0 mol m^{-3} (proximal) definiert werden; (b) Mittige Lage des Pfades im Diffusionsmodell, hier exemplarisch dargestellt am Modell von *A. subtilis*. Der Pfad beginnt am Punkt 1 in verläuft in Richtung des Pfeils zum Punkt 2.

Entdimensionierung und Ergebnisdarstellung

Für einen übersichtlichen Vergleich der Diffusionsmodelle der Areolen untereinander und mit dem Referenzmodell der Stahlfeder wird eine Entdimensionierung vorgenommen. Im Folgenden sind alle mit * versehenen Größen dimensionslos.

Der resultierende Diffusionsstrom jeder Diffusionsrechnung wird jeweils auf den Diffusionsstrom des Stahlfedermodells bezogen, so dass gilt:

$$J^* = \frac{J}{J_B} \quad (1)$$

mit dem dimensionslosen Diffusionsstrom J^* und dem Diffusionsstrom J (SI-Einheit mol s^{-1}) des jeweiligen Diffusionsmodell der Areolen, sowie der Bezugsgröße J_B (SI-Einheit mol s^{-1}), die den Diffusionsstrom des Stahlfedermodells darstellt.

Zur Abschätzung des Einflusses der unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften der Areolen auf den Diffusionsstrom wird dieser zunächst ebenfalls mit dem Diffusionsstrom des Hohlraummodells als Bezugsgröße entdimensioniert. Der dimensionslose Diffusions-

strom wird anschließend in Abhängigkeit von einer dimensionslosen Fläche A^* dargestellt, für die gilt

$$A^* = \frac{A}{A_B} \quad (2)$$

mit der kleinsten Querschnittsfläche A des Diffusionsmodells (SI-Einheit m^2). Die Bezugsgröße A_B (SI-Einheit m^2) stellt die kleinste Querschnittsfläche des Hohlraummodells dar, die somit der maximal möglichen Diffusionsfläche entspricht.

Im Anschluss werden die Ergebnisse des Diffusionsstroms neben der kleinsten Querschnittsfläche des Diffusionsmodells auch auf das Diffusionsvolumen und die Tiefe der kleinsten Porenstruktur bezogen. Die Resultate werden analog zur Gleichung (1) mit Hilfe des resultierenden Werts des Stahlfedermodells entdimensioniert.

Analytische Rechnung

Zur Einschätzung der Belastbarkeit der numerischen Modelle wird der Diffusionsstrom des Hohlraummodells ohne Ausgangsgeometrie zusätzlich analytisch berechnet. Nach dem Fickschen Gesetz gilt für den Diffusionsstrom J in eindimensionaler Betrachtung

$$J = -D A \frac{c_2 - c_1}{\Delta x} \quad (3)$$

mit dem Diffusionskoeffizienten D (SI-Einheit $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), dem Konzentrationsunterschied $c_2 - c_1$ (SI-Einheit mol m^{-3}), der Querschnittsfläche A (SI-Einheit m^2) und der Höhe des Modells Δx (SI-Einheit m) (Baehr, Stephan 2010).

2.4 Durchbiegung der Gesamtstruktur

Die neu entwickelte, zylindrische Membranhalterung (Abb. 12a) stellt eine Wabenstruktur dar. Die zusätzlichen, inneren Stützstrukturen, die am Ende an einem Heizstab zusammenlaufen, werden im weiteren Verlauf vernachlässigt. Zum Vergleich der Verformungen der Areolenstrukturen unter Druckbelastung wird jeweils ein Ausschnitt aus der Halterung simuliert.

Konstruktion der Modelle

Mit Hilfe von SolidWorks werden die fünf bereits konstruierten Areolengeometrien (Abschnitt 2.2) jeweils zu einer Wabenstruktur aus 2×6 Waben zusammengesetzt, die in der folgenden Rechnung an einer Seite gespiegelt wird. So wird jeweils vereinfacht ein Ausschnitt aus der zylindrischen Membranhalterung dargestellt (Abb. 12). Die Geometrien von *T. eccentrica* und *A. undulatus* werden für die Konstruktion an der Horizontalen gespiegelt, so dass sich die jeweils feinere, proximale Struktur der Areole an der Außenseite (distal) der Membranhalterung befindet, wo in der technischen Umsetzung die Membran aufliegen würde. Durch das so erzielte, optimale Stützen der Membran wird eine kleinstmögliche Membranverformung erreicht. Für die Berechnung des Modells von *Arachnoidiscus* sp. wird die Geometrie bereinigt bzw. belastungsirrelevante Strukturelemente entfernt.

Für das Referenzmodell, das die bereits angewendete, gesinterte Membranhalterung darstellt, wird mit SolidWorks eine Struktur aus 2 x 6 Waben ohne Hohlräume konstruiert, wobei jede Wabe eine Länge und Breite von jeweils 1 mm besitzt. Aufgrund sehr geringer Drucksteifigkeiten von Federn wird die Stahlfeder hier nicht betrachtet.

Anschließend wird zum Vergleich mit einer analytischen Rechnung ein Balken mit einer Länge von 6 mm, einer Höhe von 1 mm und einer Breite von 2,07 mm erstellt, der in seinen Maßen denen der 2 x 6 - Wabenstruktur entspricht.

Alle Modelle werden als STEP-Dateien in ANSYS importiert.

Vernetzung

Analog zur Vernetzung der Diffusionsmodelle werden die 2 x 6 - Wabenmodelle zunächst möglichst grob vernetzt. Anschließend erfolgt ebenfalls eine manuelle Gitterstudie, bis die als hinreichend festgelegte Vernetzung (Tab. 3) erreicht wird. Das Balkenmodell wird mit den hinreichenden Vernetzungseinstellungen der geometrisch ähnlichen gesinterten Struktur vernetzt. Alle Modelle hinreichender Vernetzung und die Eigenschaften der Vernetzungsstufen der Gitterstudie sind im Anhang I.ii zu finden.

Tabelle 3: Für die Modelle, die einen Ausschnitt aus der Membranhalterung darstellen, sind die Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie die Elementtypen der als hinreichen definierten Vernetzungsstufe aufgelistet. Für das Balkenmodell wird keine Gitterstudie durchgeführt.

Modell	Vernetzungsstufe	Elemente	Knoten	Anzahl an Freiheitsgraden	Elementtyp
<i>Actinocyclus subtilis</i>	4	3229136	5068116	15204348	SOLID187
<i>Actinoptychus undulatus</i>	5	4072558	5930927	17792781	SOLID187
<i>Arachnoidiscus</i> sp.	4	1701038	2645774	7937322	SOLID187
<i>Coscinodiscus</i> sp.	3	5494988	8342491	25027473	SOLID187
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	5	3306709	4983132	14949396	SOLID187
Gesinterte Struktur	3	16884	75506	226518	SOLID186
Balken	-	18492	82036	246108	SOLID186

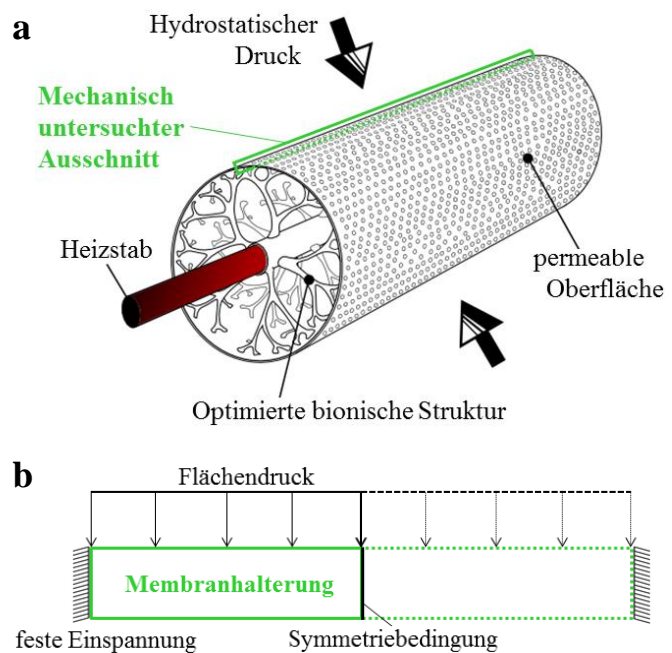


Abbildung 12: (a) Schematischer Aufbau der neu zu entwickelnden, zylindrischen Membranhalterung des Probeneinlasssystems nach Hamm (2015). Der grün umrahmte Bereich wird abstrahiert in einer numerischen Rechnung druckbelastet. Die Randbedingungen dazu sind in (b) dargestellt.

Materialeigenschaften und Randbedingungen

Den fünf Modellen aus den Areolengeometrien wird das in der ANSYS-Materialdatenbank vorhandene Material „Baustahl“ mit einer Dichte ρ von 7850 kg m^{-3} , einem Elastizitätsmodul E von $2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$ (isotrop) und einer Querkontraktionszahl μ von 0,3 zugeordnet.

Das Referenzmodell stellt die in der Technik bereits verwendete, gesinterte Membranhalterung aus X2CrNiMo17-12-2 (Werkstoffnummer: 1.4404) dar (Gentz, Weißgärber 2011). Die bei einer Sintertemperatur von 1200 °C auftretende, durchschnittliche Porosität P von 48,3 % führt zu einer Materialdichte von 1531 kg m^{-3} . Für die Querkontraktionszahl wird vereinfacht 0,3 angenommen. Der isotrope Elastizitätsmodul E_P des porösen Materials beträgt nach Kováčik (1999) näherungsweise

$$E_P = E \cdot \left(1 - \frac{P}{P_C}\right)^f \quad (4)$$

mit einem Elastizitätsmodul des soliden Materials E von 200 GPa (Deutsche Edelstahlwerke 2015). Die kritische Porosität P_C , bei der der Elastizitätsmodul null erreicht, wird vereinfacht als 100 % festgelegt, was einem vollständigen Hohlraumvolumen (0 % solides Material) entspricht. Für den charakteristischen Exponenten f kann nach Kováčik (1999) ein Betrag von 2,1 angenommen werden. Diese Materialeigenschaften werden auch für das Balkenmodell gewählt.

Unter Berücksichtigung der gewählten Materialeigenschaften wird für jedes Modell die Masse mit Hilfe von SolidWorks bestimmt.

Um bei gleichen Rechenzeiten einen größeren Ausschnitt aus der Membranhalterung simulieren zu können, wird eine Symmetriebedingung festgelegt. Zur Definition dieser Bedingung wird in jedem 2×6 -Wabenmodell einseitig die überstehende Hälfte einer Areole entfernt. Durch dieses Spiegeln am Ende der 2×6 -Wabenstruktur (Abb. 12b) wird näherungsweise die vollständige Länge der zylindrischen Halterung dargestellt. Auf der anderen Seite wird an drei Wabenseiten eine feste Einspannung definiert (Abb. 13).

Um für alle Modelle ein konvergiertes Ergebnis zu erreichen, werden diese mit einem Flächendruck von lediglich 10 MPa in negative Z-Richtung belastet.

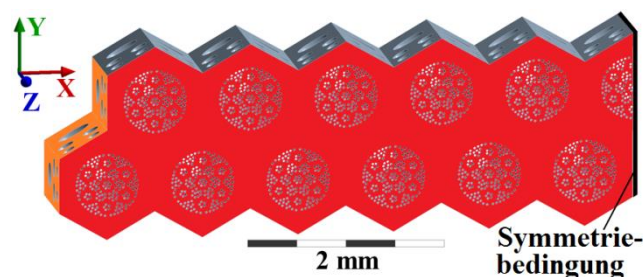


Abbildung 13: Aufsicht auf das 2×6 -Wabenmodell von *Actinocyclus subtilis*. In Orange sind die drei eingespannten Wabenwände dargestellt, in Rot die von Druck belastete Gesamtfläche. An der linken Seite ist eine Symmetriebedingung definiert.

Berechnungseinstellungen

Die Berechnungen erfolgen mit dem Modul der statisch-mechanischen Analyse von ANSYS. Wegen teilweise großer auftretender Verformungen werden einige Modelle nichtlinear gerechnet (Tab. 4).

Als Ergebnisse wird die Durchbiegung der Gesamtstruktur ausgegeben.

Tabelle 4: Für die sieben Modelle wird die jeweilige Berechnungsart dargestellt.

	<i>Actinocyclus subtilis</i>	<i>Actinoptychus undulatus</i>	<i>Arachnoidiscus sp.</i>	<i>Coscinodiscus sp.</i>	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	Gesinterte Struktur	Balken
Berechnungsart	linear	nichtlinear	nichtlinear	nichtlinear	nichtlinear	linear	linear

Entdimensionierung und Ergebnisdarstellung

Analog zu der Entdimensionierung der Diffusionsergebnisse wird die resultierende Durchbiegung w jeweils auf das Resultat für das Referenzmodell der gesinterten Struktur bezogen. Es gilt somit

$$w^* = \frac{w}{W_B} \quad (5)$$

mit der dimensionslosen Durchbiegung w^* und der Durchbiegung w (SI-Einheit m) des jeweiligen Areolenmodells, sowie der Bezugsgröße W_B (SI-Einheit m), die die Durchbiegung der gesinterten Struktur darstellt. Im nächsten Schritt wird die massenspezifische Durchbiegung angegeben, wobei diese ebenfalls mit Hilfe des Werts der gesinterten Struktur entdimensioniert wird.

Analytische Rechnung

Zur Validierung des numerischen Modells wird die Deformation des Balkenmodells analytisch abgeschätzt. Dabei gilt für die Gleichung der Biegelinie $w(x)$ eines beidseitig eingespannten Balkens

$$w(x) = \frac{q l^4}{24 E J_y} \left[\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2 \left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right] \quad (6)$$

mit der Durchbiegung w (SI-Einheit m), Streckenlast q (SI-Einheit N m^{-1}), der Länge l des Balkens (SI-Einheit m), dem Elastizitätsmodul E (SI-Einheit Pa), dem Flächenträgheitsmoment J_y (SI-Einheit m^4) und der Ortskoordinate x (SI-Einheit m) (Grote, Feldhusen 2007). Da es sich in dem hier betrachteten Fall um einen Flächendruck handelt, wird q mit der Gleichung

$$q = \frac{p A}{l} \quad (7)$$

ermittelt, wobei p den Flächendruck (SI-Einheit Pa) und A die Fläche des Balkens (SI-Einheit m^2), auf die der Druck wirkt, darstellen. Die maximale Durchbiegung erfährt der Balken in der Mitte ($x = 0,5 l$).

2.5 Durchbiegung der Membran und Stützstruktur

Die semipermeable Polydimethylsiloxane-Membran ist fundamental für die Trennung der gelösten Partikel von der Matrix. Demzufolge gilt es, eine möglichst geringe Membranverformung unter Druckbelastung zu erreichen, was im Folgenden untersucht wird.

Konstruktion der Modelle

Für die Untersuchung der Einsenkung der Membran in die Areolenstrukturen werden die in Abschnitt 2.2 konstruierten Areolengeometrien auf der distalen Seite von einer dünnen Membran mit einer Dicke von 0,02 mm (2 % der Areolenhöhe) bedeckt. Die Modelle von *A. undulatus* und *T. eccentrica* werden analog zum Abschnitt 2.4 an der Horizontalen gespiegelt, so dass die Membran auf der zuvor proximalen Seite aufliegt und durch das Cribrum bzw. das Cribellum gestützt wird. Um auch im Modell von *Coscinodiscus* sp. ein direktes Aufliegen der Membran auf der Stützstruktur zu erreichen, werden für die Membrandurchbiegung irrelevante, überstehende Strukturen entfernt.

Zur Berechnung der Membrandurchbiegung in die Zwischenräume der Stahlfeder als Referenzmodell wird analog zu Abschnitt 2.2 der in Abb. 10 sichtbare Ausschnitt der Feder modelliert und ebenfalls von einer 0,02 mm dicken Membran bedeckt (Abb. 14). Die Membrandurchbiegung bei einer gesinterten Membranhalterung kann in dieser Arbeit nicht berechnet werden. Aufgrund der sehr geringen Porengröße der gesinterten Struktur (Gentz, Weißgärber 2011) kann hier jedoch eine sehr geringe Membrandurchbiegung erwartet werden.

Anschließend wird für alle Modelle die Lochfläche der Außenfläche bestimmt, auf der die Membran platziert ist.

Da die Modelle von *T. eccentrica* und *A. subtilis*, sowie das Stahlfedermodell zwei Symmetrieachsen besitzen, wird zum Erreichen geringerer Rechenzeiten jeweils nur ein Ausschnitt des Modells gerechnet. In Analogie zum Abschnitt 2.4 werden zwei Symmetriebedingungen definiert (Abb. 14c). Des Weiteren wird im Stahlfedermodell ein irrelevanter Bereich der Membran entfernt.

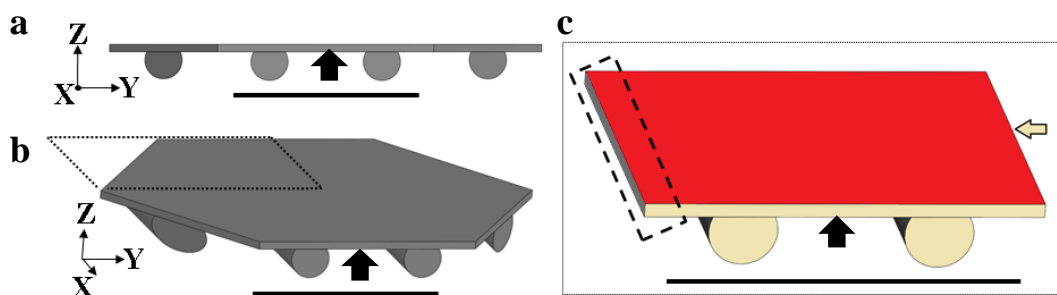


Abbildung 14: (a) und (b) stellen das konstruierte Stahlfedermodell in zwei unterschiedlichen Ansichten dar. Es besteht aus vier Drähten, auf denen die Membran aufliegt. Der schwarze Pfeil zeigt den Bereich, in dem die maximale Durchbiegung erwartet wird. (c) zeigt vergrößert den in (b) markierten Ausschnitt des Modells. Dieser Ausschnitt dient der numerischen Berechnung der Membrandurchbiegung. Dabei werden zwei Symmetriebedingungen definiert (beige), an der vorderen Fläche und der rechten Seite (beiger Pfeil). Auf die Membran wird ein Flächendruck (rot) aufgegeben. Die Drähte sind an dem hinteren Ende fest eingespannt. Der umrahmte, linke Bereich der Membran wird im Laufe der Gitterstudie aufgrund nicht erreichter Konvergenz entfernt. Die Länge der Maßstabsbalken beträgt jeweils 0,5 mm.

Für den Vergleich mit einer analytischen Abschätzung der Membrandurchbiegung wird mit SolidWorks ein Modell analog zur der konstruierten Areole von *A. undulatus* erstellt. Die vielen proximalen Poren werden jedoch durch eine große Pore mit einem Durchmesser von 0,8 mm ersetzt, die ebenfalls von einer Membran mit einer Dicke von 0,02 mm bedeckt wird. Als STEP-Dateien werden die Modelle in ANSYS importiert.

Vernetzung

In Analogie zu den vorherigen Vernetzungen werden die Modelle zunächst grob vernetzt, woraufhin anschließend die manuelle Gitterstudie bis zum Erreichen einer hinreichenden Vernetzung (Tab. 5) erfolgt. Für das Modell, dessen Ergebnis mit einer analytischen Lösung verglichen wird, wird eine feine Vernetzung in Anlehnung an die hinreichende Vernetzung von *A. undulatus* ohne Durchführen einer Gitterstudie gewählt. Alle Eigenschaften der Vernetzungsstufen, sowie die hinreichend vernetzten Modelle sind im Anhang I.iii zu finden.

Tabelle 5: Für die von einer Membran bedeckten Modelle sind die Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie die Elementtypen der Vernetzungsstufe, die als hinreichend definiert wird, aufgelistet. Für das Modell, dessen Ergebnis mit einer analytischen Rechnung verglichen wird, wird keine Gitterstudie durchgeführt.

	Verfeinerungsstufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
<i>Actinocyclus subtilis</i>	6	829433	1214969	3644907	SOLID187
<i>Actinoptychus undulatus</i>	2	2496830	3549890	10649670	SOLID187
<i>Arachnoidiscus</i> sp.	5	875124	1274932	3824796	SOLID187
<i>Coscinodiscus</i> sp.	6	3391162	4829023	14487069	SOLID187
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	8	1283510	1864724	5594172	SOLID187
Stahlfeder	6	510352	2189403	6568209	SOLID186
Modell Analytikvergleich	-	2141536	3053626	9160878	SOLID187

Materialeigenschaften und Randbedingungen

Als Material für die Membran wird das in der technischen Anwendung bisher etablierte Polydimethylsiloxane verwendet. Aufgrund fehlender Materialdaten wird in Anlehnung an Daten von Shacham-Diamand et al. (2009) ein linear-elastisches Verhalten mit einem Elastizitätsmodul von 1 MPa, einer Dichte von 965 kg m^{-3} und einer Querkontraktionszahl von 0,49 angenommen.

Den Areolengeometrien, wie auch der Stahlfeder, wird als Material der in Abschnitt 2.4 beschriebene Baustahl zugeordnet. Es wird angenommen, dass sich die Membran auf der jeweiligen Struktur in X- und Y-Richtung nicht verschiebt, so dass der Kontakt als verbunden definiert wird. Die Fläche der Membran wird mit einem Druck von 5000 Pa in negative Z-Richtung belastet, so dass für alle Rechnungen eine Konvergenz erreicht wird. Für das mit der Analytik zu vergleichende Modell wird ein Druck von 50 Pa definiert. Die Areolenstrukturen werden an den unteren Kanten fest eingespannt, das modellierte Stahlfedermodell an den Enden der Drähte (Abb. 15).

Berechnungseinstellungen

Die Berechnungen erfolgen mit dem Modul der statisch-mechanischen Analyse von ANSYS. Wegen großer auftretender Verformungen wird das Modell der Stahlfeder nichtlinear gerechnet. Des Weiteren wird der Druck in dem Stahlfedermodell in fünf Lastschritten gleichmäßig bis auf 5000 Pa erhöht, wobei mindestens fünf und maximal 50 Teilschritte angewendet werden.

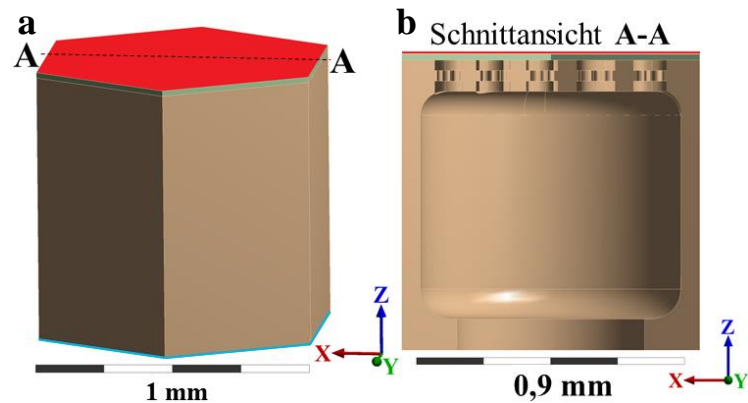


Abbildung 15: (a) Darstellung der Randbedingungen zur Bestimmung der Durchbiegung der Membran in die Poren am Beispiel von *Coscinodiscus* sp. Die Membran (grün) ist mit der Struktur (braun) fest verbunden und wird mit einem Flächendruck (rot) belastet. Die unteren Kanten des Modells (hellblau) sind fest eingespannt; (b) zeigt eine Schnittansicht des Modells.

Als Ergebnis wird jeweils die maximale Durchbiegung der unteren Membranfläche notiert, sowie die Verformung der Areolenstruktur bzw. des Stahlfedermodells.

Entdimensionierung und Ergebnisdarstellung

Die Entdimensionierung erfolgt analog zum Abschnitt 2.4 mit der Gleichung (5), wobei hier die auftretende Durchbiegung im Stahlfedermodell die Bezugsgröße w_B darstellt. Weiter werden die Ergebnisse der Membrandurchbiegung auf die jeweilige Lochfläche bezogen und anschließend erneut mit dem Wert des Stahlfedermodells als Bezugsgröße entdimensioniert.

Analytische Rechnung

In einer analytischen Rechnung soll die Durchbiegung der Membran in eine Pore abgeschätzt und mit dem numerischen Ergebnis des veränderten Modells von *A. undulatus* verglichen werden. Näherungsweise kann dieser Fall als Durchbiegung einer voll eingespannten Kreisplatte betrachtet werden. Nach Girkmann (1986) gilt so für die maximale Durchbiegung

$$w_{max} = \frac{p r^4}{64 K} \quad (8)$$

mit der maximalen Durchbiegung w_{max} (SI-Einheit m), dem Flächendruck p (SI-Einheit Pa), dem Radius r der Pore (SI-Einheit m) und der Plattensteifigkeit K (SI-Einheit N m). Letztere ist definiert als

$$K = \frac{E I}{1 - \mu^2} \quad (9)$$

mit dem Elastizitätsmodul E (SI-Einheit Pa), dem Trägheitsmoment der Schnittfläche je Einheit der Schnittlänge I (SI-Einheit m^3) und der Querkontraktionszahl μ (Girkmann 1986).

3 Ergebnisse

3.1 Konstruktion

Im Folgenden werden für jede konstruierte Areole die notwendigen Abstraktionen und Festlegungen aufgeführt. Alle konstruierten Areolen sind anschließend in Abb. 16 dargestellt. Detailliertere Angaben zu den Maßen können dem Anhang II.i entnommen werden.

A. *subtilis*: Aufgrund fehlender Informationen über die dreidimensionale Struktur von Cribrum und Cribellum wird diese abstrahiert. In Analogie zu dem kreisförmigen Foramen wird das Cribellum als runde, auf der Fläche frei verteilte Öffnungen festgelegt. Auch die Cribrumstrukturen werden als kreisförmig angenommen und in einer weiteren Abstraktion untereinander mit Querstreben verbunden, durch welche die Pore selber eine höhere Steifigkeit erhält (Klein 2009).

***Coscinodiscus* sp.:** Die Ergebnisse von Losic et al. (2006b) weisen Variabilität in der Größe des Cribellums, wie auch in der Anzahl an Cribellumöffnungen pro Cribrum auf. In Anlehnung daran wird die Cribellumgeometrie ebenfalls variabel konstruiert, wobei jede Cribrumöffnung mit fünf bis acht Cribellumporen versehen ist.

A. *undulatus*: Es sind keine detaillierten Informationen über den dreidimensionalen Aufbau der Areolenwand vorhanden. In einer vereinfachten Abstraktion wird daher in jeder Wand der sechseckigen Struktur eine Wellenform konstruiert, so dass der wellenartige Höhenverlauf der Areolenwand entsteht.

***Arachnoidiscus* sp.:** Die Tiefen von dem Foramen und der distalen Porenstruktur sind frei gewählt, da es keine publizierten Daten dazu gibt. Des Weiteren sind keine exakten Daten zu der Größe der die Areolen untereinander verbindenden Löcher in den Wänden zu finden. Somit werden die Löcher in Anlehnung an Skizzen von Helmcke, Krieger (1953-1977) als sehr groß, nahezu die gesamte Wandseite einnehmend festgelegt.

***T. eccentrica*:** Die Größe und genaue Ausbildung der Löcher in den Areolenwänden sind nicht bekannt. Sie werden analog zu den Löchern von *Arachnoidiscus* sp. konstruiert.

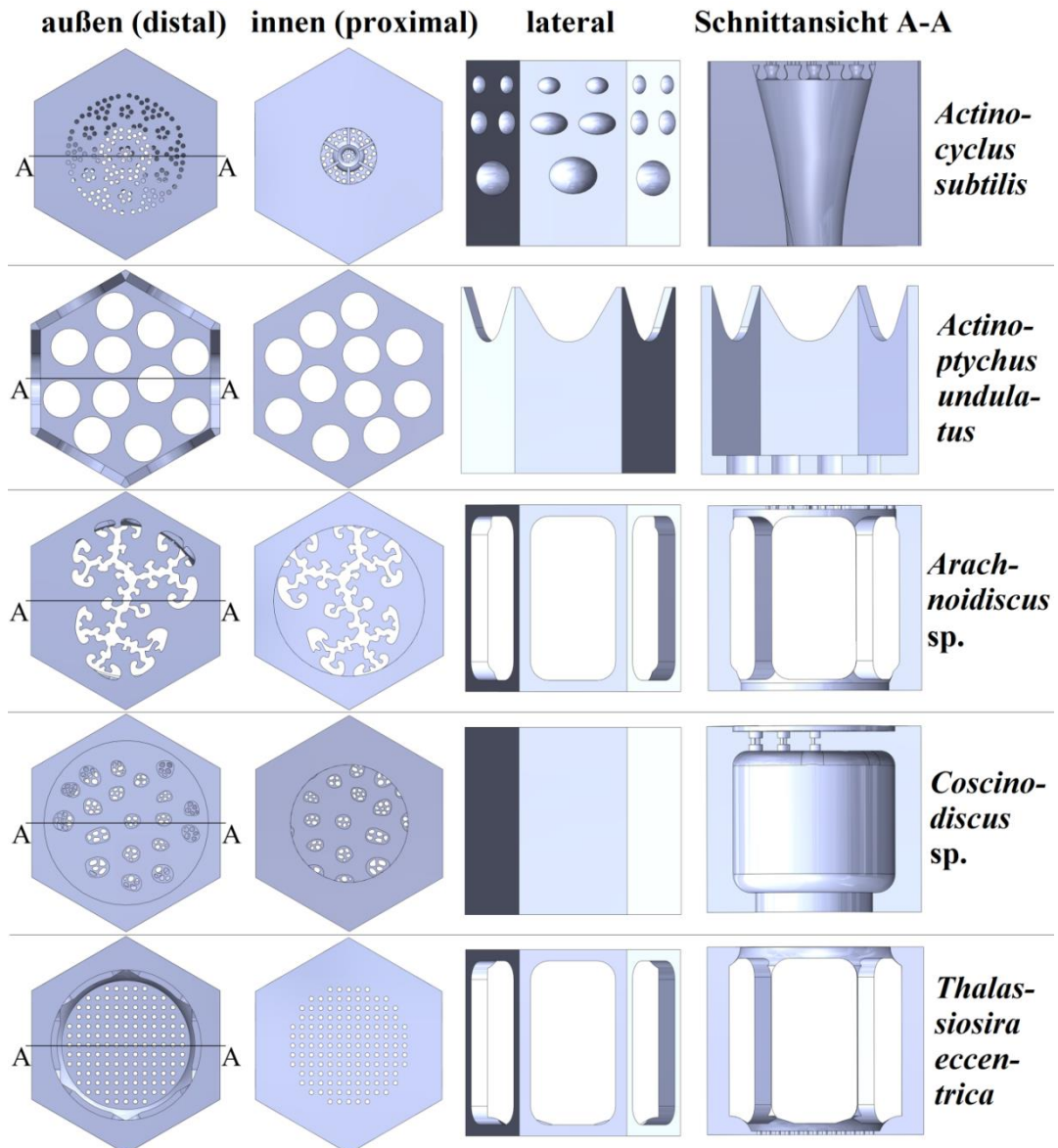


Abbildung 16: Distale, proximale, laterale und Schnittansichten der fünf konstruierten Areolen der Diatomeen.

3.2 Diffusion

Anfängliche, instationäre Rechnungen führen bei allen Diffusionsmodellen zu einer stationären Lösung, die den gleichen Wert besitzt, wie die Lösung der stationären Rechnung gleicher Vernetzung (Abb. 17a, Anhang II.ii.a).

Im Rahmen der Gitterstudie kann für jedes Diffusionsmodell eine hinreichende Vernetzung erreicht werden (Abb. 17b, Anhang II.ii.b).

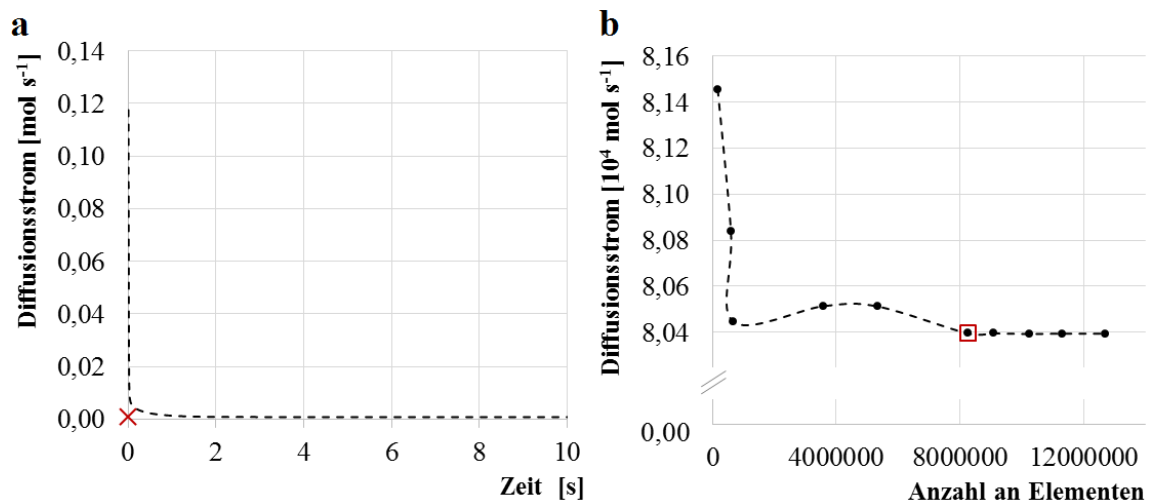


Abbildung 17: (a) Resultierender Diffusionsstrom in mol s⁻¹ an der unteren Ausgangsstruktur in Abhängigkeit von der Zeit in s von *Actinocyclus subtilis* bei einer instationären Rechnung. Der Diffusionsstrom erreicht einen stationären Wert, welcher dem Ergebnis der stationären Lösung (rotes Kreuz) bei gleicher Vernetzung entspricht; (b) Im Rahmen der Gitterstudie wird der resultierende Diffusionsstrom in 10⁴ mol s⁻¹ an der unteren Ausgangsstruktur in Abhängigkeit von der Anzahl an Elementen von *A. subtilis* dargestellt. Bei höheren Elementzahlen zeigen sich kaum noch Veränderungen in dem Diffusionsstrom. Das Ergebnis der hinreichenden Vernetzung ist rot umrahmt.

Die Betrachtung der Konzentrationsverläufe über der Höhe der Modelle (Abb. 18) zeigt einen linearen Verlauf des Hohlraummodells, unterhalb dessen die Kurven von *Arachnoidiscus* sp., *Coscinodiscus* sp. und der Stahlfeder liegen. Diese zeigen alle einen Abfall, der bei der Stahlfeder am geringsten und bei *Coscinodiscus* sp. sehr stark ausfällt, bevor die Graphen sich allmählich an die Kurve des Hohlraummodells angleichen. Im Gegensatz dazu befinden sich die Verläufe von *A. subtilis*, *A. undulatus* und *T. eccentrica* oberhalb des Graphen des Hohlraummodells. Sie distanzieren sich zunächst langsam von der Kurve des Hohlraummodells durch ihre weniger starke Neigung, bevor sie am Ende abfallen. Dieser Abfall erfolgt bei *A. subtilis* allmählich, während sich bei *T. eccentrica* und *A. undulatus* ein starkes Absenken zeigt. Letzteres ist in einem kleinen Bereich um 1,0 mm Tiefe unterbrochen.

An der Darstellung der Diffusionsstromdichte des ganzen Modells (Abb. 19, Anhang II.ii.c) sind hohe Werte im Bereich der kleinsten Porenstruktur erkennbar. Lokale Maxima treten an den Übergängen von kleinen zu großen Strukturen auf. Über die Tiefe der Struktur nimmt die Diffusionsstromdichte allmählich bis zum Erreichen des proximalen Endes der Areole zu. An den Ausgangsstrukturen beträgt die Diffusionsstromdichte 0 mol m⁻² s⁻¹.

Im Hinblick auf die resultierenden Diffusionsströme zeigt sich ein maximaler Wert im Stahlfedermodell von 0,00526 mol s⁻¹ (Abb. 20, Anhang II.ii.b). Die Diffusionsströme von *A. undulatus* und *Arachnoidiscus* sp. liegen bei 77 % und 75 % des Diffusionsstroms des Stahlfedermodells. Der niedrigste Diffusionsstrom ist mit 15 % des Federmodells bei *A. subtilis* zu finden. *Coscinodiscus* sp. und *T. eccentrica* liegen bei ca. 35 % und 60 %. Der Diffusionsstrom des Hohlraummodells ohne Ausgangsstruktur beträgt 0,00606 mol s⁻¹.

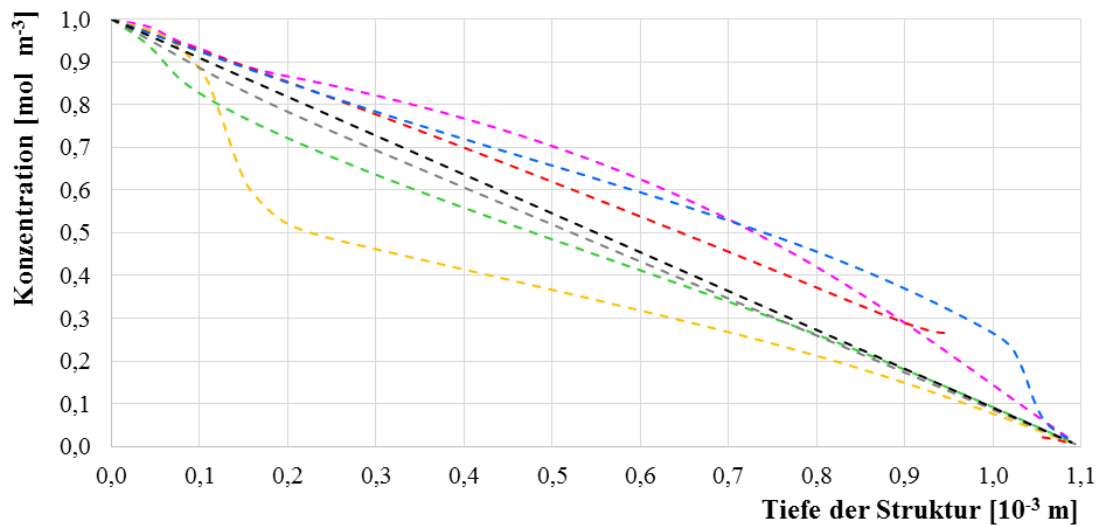


Abbildung 18: Konzentration in mol m^{-3} in Abhängigkeit von der Tiefe der Struktur bei jeweils hinreichender Vernetzung. Die Daten werden entlang eines Pfades in der Mitte der jeweiligen Struktur entnommen. Die Konzentrationen von 1 mol m^{-3} distal und 0 mol m^{-3} proximal sind fest definiert. Der Verlauf ist abhängig von der Geometrie der Struktur (schwarz: Hohlraummodell, pink: *Actinocyclus subtilis*, rot: *Actinoptychus undulatus*, grün: *Arachnoidiscus sp.*, orange: *Coscinodiscus sp.*, blau: *Thalassiosira eccentrica*, grau: Stahlfeder).

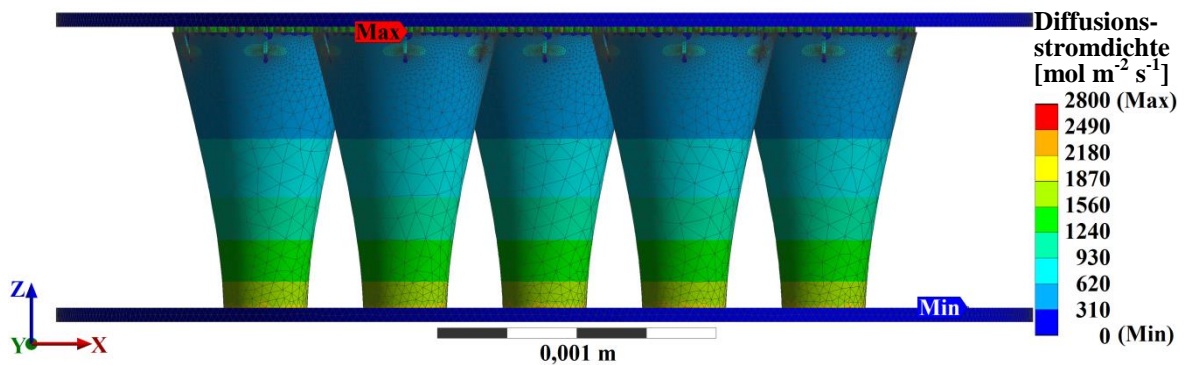


Abbildung 19: Farbliche Darstellung der Diffusionsstromdichte in $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im Modell von *Actinocyclus subtilis* bei hinreichender Vernetzung. Der Maximalwert (Max) von $2800 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ tritt am Übergang von der Ausgangsgeometrie in die kleinste Porenstruktur auf, der Minimalwert (Min) von $0 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf der Fläche der Ausgangsgeometrie (ANSYS Workbench 16.1).

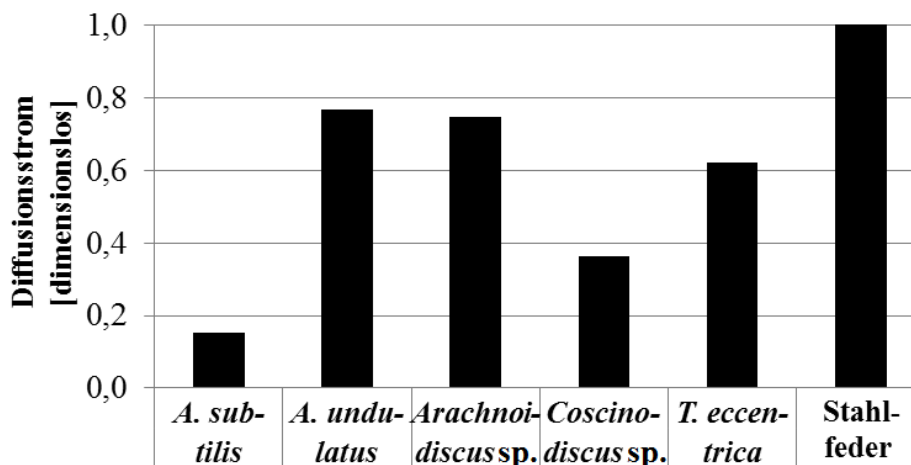


Abbildung 20: Dimensionslose Diffusionsströme der fünf Areolenmodelle und der Stahlfeder bei jeweils hinreichender Vernetzung. Die Entdimensionierung des resultierenden Diffusionsstroms wird mit dem Diffusionsstrom der Stahlfeder als Bezugsgröße durchgeführt.

Zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher geometrischer Eigenschaften der Diffusionsmodelle (Tab. 6) sind in Abb. 21 zunächst die Flächenverhältnisse aus den kleinsten Querschnittsflächen der Diffusionsmodelle zu der kleinsten Querschnittsfläche des Hohlraummodells abgebildet. Diese werden in Abhängigkeit von dem Verhältnis aus dem resultierten Diffusionsstrom jedes Modells und dem Diffusionsstrom des Hohlraummodells ($0,00553 \text{ mol s}^{-1}$, Anhang II.ii.b) dargestellt. Das Hohlraummodell ist Element einer linearen Funktion (gestrichelte Linie), für die das Flächenverhältnis gleich dem Verhältnis des Diffusionsstromes ist. Alle Areolenmodelle liegen unterhalb dieser Funktion. *A. subtilis* weist den geringsten Abstand von 0,04 zu der linearen Funktion auf, während *T. eccentrica* und *Arachnoidiscus* sp. mit einem Abstand von 0,35 am weitesten von der Kurve entfernt sind. *Coscinodiscus* sp., *A. undulatus* und die Stahlfeder zeigen einen mittleren Abstand von 0,21 zu der linearen Funktion.

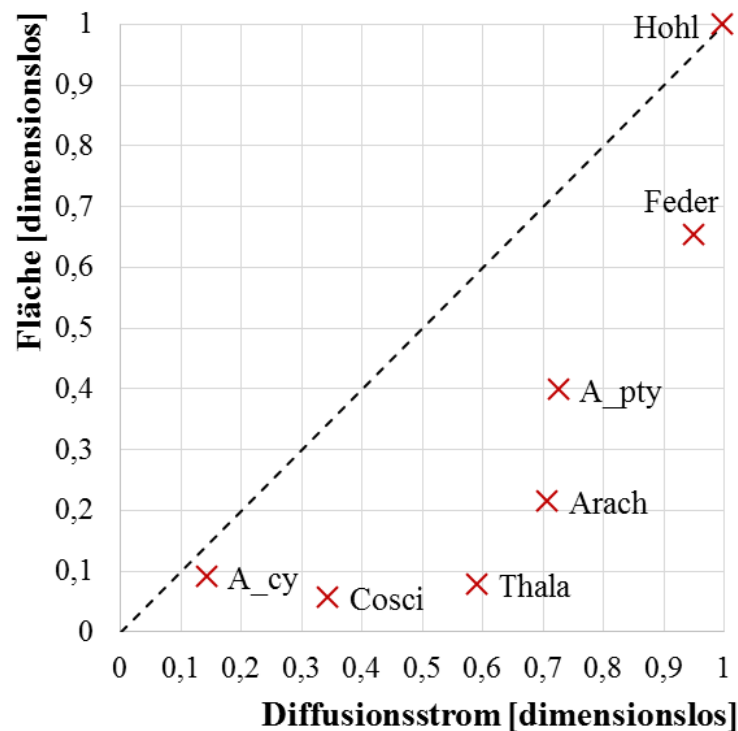


Abbildung 21: Darstellung der dimensionslosen kleinsten Querschnittsfläche des jeweiligen Diffusionsmodells in Abhängigkeit von dem dimensionslosen Diffusionsstrom. Die Entdimensionierung der kleinsten Querschnittsfläche erfolgt mit Hilfe der Querschnittsfläche des Hohlraummodells (maximal mögliche Diffusionsfläche) als Bezugsgröße. Für die Entdimensionierung des Diffusionsstroms dient der Diffusionsstrom des Hohlraummodells (maximal möglicher Diffusionsstrom) als Bezugsgröße. Für die Elemente der linearen Funktion (gestrichelte Linie) ist das Flächenverhältnis gleich dem Verhältnis des Diffusionsstroms. Alle Werte entstammen der Modelle hinreichender Vernetzung (A_cy: *Actinocyclus subtilis*, A_pty: *Actinoptychus undulatus*, Arach: *Arachnoidiscus* sp., Cosci: *Coscinodiscus* sp., Thala: *Thalassiosira eccentrica*, Feder: Stahlfeder, Hohl: Hohlraum).

Tabelle 6: Geometrische Eigenschaften der Diffusionsmodelle.

Modell	Kleinste Querschnittsfläche [mm ²]	Tiefe der kleinsten Struktur [mm]	Diffusionsraum [mm ³]
<i>Actinocyclus subtilis</i>	0,55	0,02	2,07
<i>Actinoptychus undulatus</i>	2,42	0,10	5,83
<i>Arachnoidiscus</i> sp.	1,30	0,02	6,43
<i>Coscinodiscus</i> sp.	0,35	0,11	4,51
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	0,47	0,02	6,36
Stahlfeder	3,96	0,08	6,89
Hohlraum	6,06	-	-

Wird der Diffusionsstrom auf die kleinste Querschnittsfläche (Tab. 6) bezogen (Abb. 22a), so verändern sich im Vergleich zu Abb. 20 die Verhältnisse der Werte zueinander stark. Die flächenspezifischen Diffusionsströme aller Areolenmodelle sind größer als das Ergebnis des Stahlfedermodells. Bei *T. eccentrica* wird der höchste Wert von über 500 % des flächenspezifischen Diffusionsstromes des Stahlfedermodells erreicht, während *Coscinodiscus* sp. und *Arachnoidiscus* sp. Werte von ca. 420 % und 230 % aufweisen. *A. subtilis* und *A. undulatus* liegen leicht über dem Ergebnis des Stahlfedermodells.

In Abb. 22b ist der Diffusionsstrom bezogen auf die Tiefe der kleinsten Struktur dargestellt. Während *Arachnoidiscus* sp. und *T. eccentrica* mit ca. 280 % und 240 % des Stahlfedermodells die höchsten Werte aufweisen, ist der Wert von *Coscinodiscus* sp. im Vergleich zu Abb. 20 auf ca. 25 % gesunken. *A. subtilis* und *A. undulatus* liegen beide bei ca. 60 % des Stahlfedermodells.

Der Bezug des Diffusionsstroms auf das Diffusionsvolumen des jeweiligen Modells (Tab. 6) führt zu weniger starken Veränderungen in den Werten im Vergleich zu der Darstellung des Diffusionsstroms (Abb. 20 und 22c). Die Werte der volumenspezifischen Diffusionsströme aller Areolenmodelle liegen ebenfalls unterhalb des Stahlfedermodells, doch sie steigen in ihren Werten an. So erreicht *A. subtilis* ca. 50 % des Stahlfederwertes, *A. undulatus* sogar 90 %. Die Werte der anderen Areolenmodelle liegen dazwischen.

Analytische Rechnung der Diffusion

Für das Hohlraummodell ohne Ausgangsgeometrie mit einer Höhe von 1 mm, einer Querschnittsfläche von 6,06 mm² und einem Diffusionskoeffizienten von 1 m² s⁻¹, sowie einem Konzentrationsunterschied zwischen den Außenflächen der Geometrie von -1 mol m⁻³ beträgt der Diffusionsstrom nach Gleichung (3) 0,00606 mol s⁻¹.

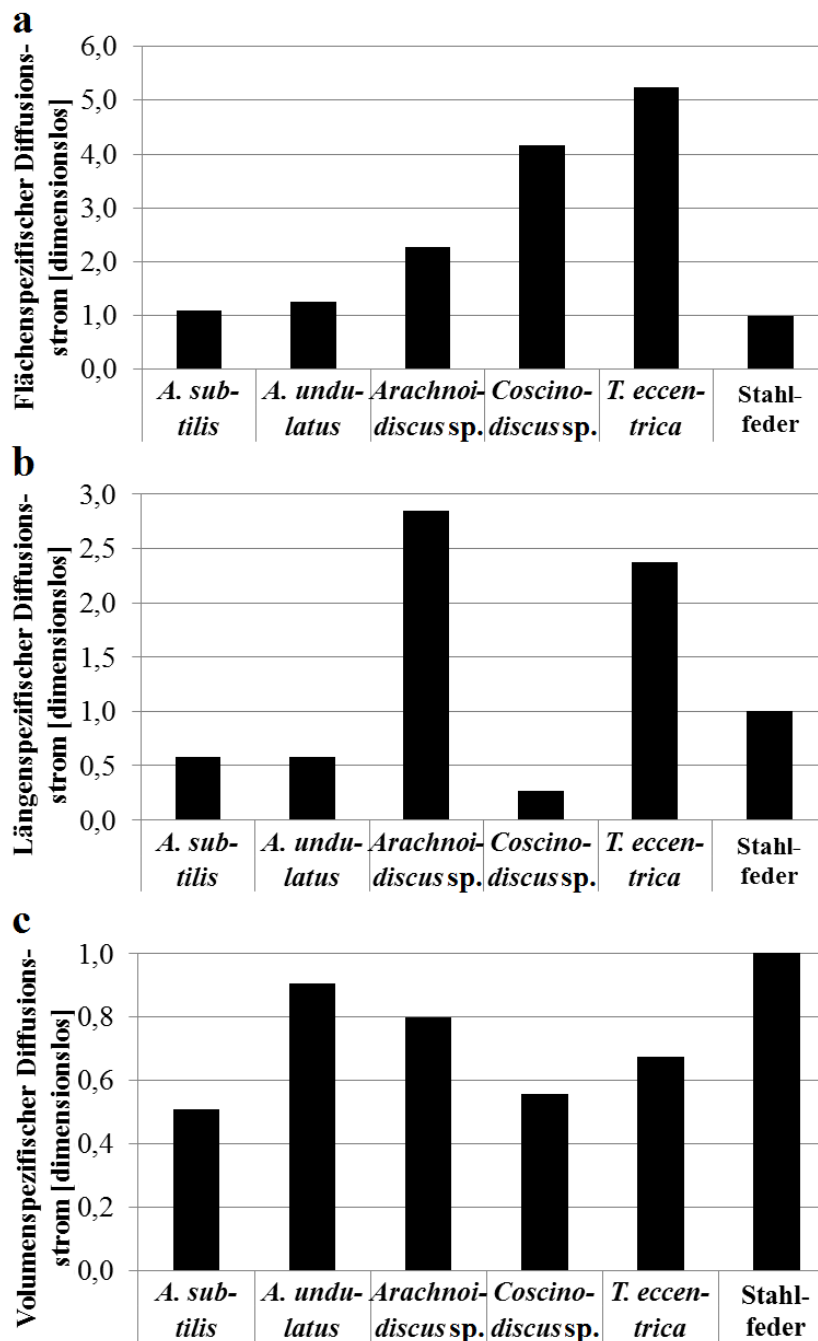


Abbildung 22: (a) Flächenspezifische Diffusionsströme (dimensionslos) der fünf Areolenmodelle und der Stahlfeder bei jeweils hinreichender Vernetzung. Es wird jeweils der Quotient aus dem resultierenden Diffusionsstrom und der kleinsten Querschnittsfläche gebildet. Die Entdimensionierung wird mit Hilfe des Quotienten aus Diffusionsstrom und kleinster Querschnittsfläche der Stahlfeder als Bezugsgröße durchgeführt; (b) Längenspezifische Diffusionsströme (dimensionslos) der fünf Areolenmodelle und der Stahlfeder bei jeweils hinreichender Vernetzung, wobei jeweils der Quotient aus dem resultierenden Diffusionsstrom und der Tiefe der kleinsten Porenstruktur gebildet wird. Die Entdimensionierung erfolgt mit Hilfe des Quotienten aus Diffusionsstrom und Tiefe der kleinsten Porenstruktur der Stahlfeder als Bezugsgröße; (c) Volumenspezifische Diffusionsströme (dimensionslos) der fünf Areolenmodelle und der Stahlfeder bei jeweils hinreichender Vernetzung. Es wird jeweils der Quotient aus dem resultierenden Diffusionsstrom und dem Diffusionsvolumen gebildet. Die Entdimensionierung erfolgt mit Hilfe des Quotienten aus Diffusionsstrom und Diffusionsvolumen der Stahlfeder als Bezugsgröße.

3.3 Durchbiegung der Gesamtstruktur

Im Rahmen der Gitterstudie wird für alle Modelle eine hinreichende Vernetzung ermittelt (Anhang II.iii.a). Das E-Modul der gesinterten Struktur beträgt nach Gleichung (4) 50,04 GPa.

Die maximalen Durchbiegungen der Ausschnitte aus den Membranhalterungen der verschiedenen Modelle unterscheiden sich sehr stark, was vergleichend in Abb. 23 veranschaulicht wird. Während *Coscinodiscus* sp. und *A. subtilis* mit ca. 89 % und 40 % der maximalen Durchbiegung der gesinterten Struktur deutlich unter dem Referenzmodell liegen, sind die Verformungen der anderen drei Areolenmodelle merklich höher (Abb. 24a, Anhang II.iii.b). *Arachnoidiscus* sp. und *T. eccentrica* weisen nahezu die siebenfache Durchbiegung der gesinterten Struktur auf. *A. undulatus* liegt bei ca. 500 % der Durchbiegung der Referenzstruktur. Die Durchbiegung des Balkens beträgt 0,14 mm.

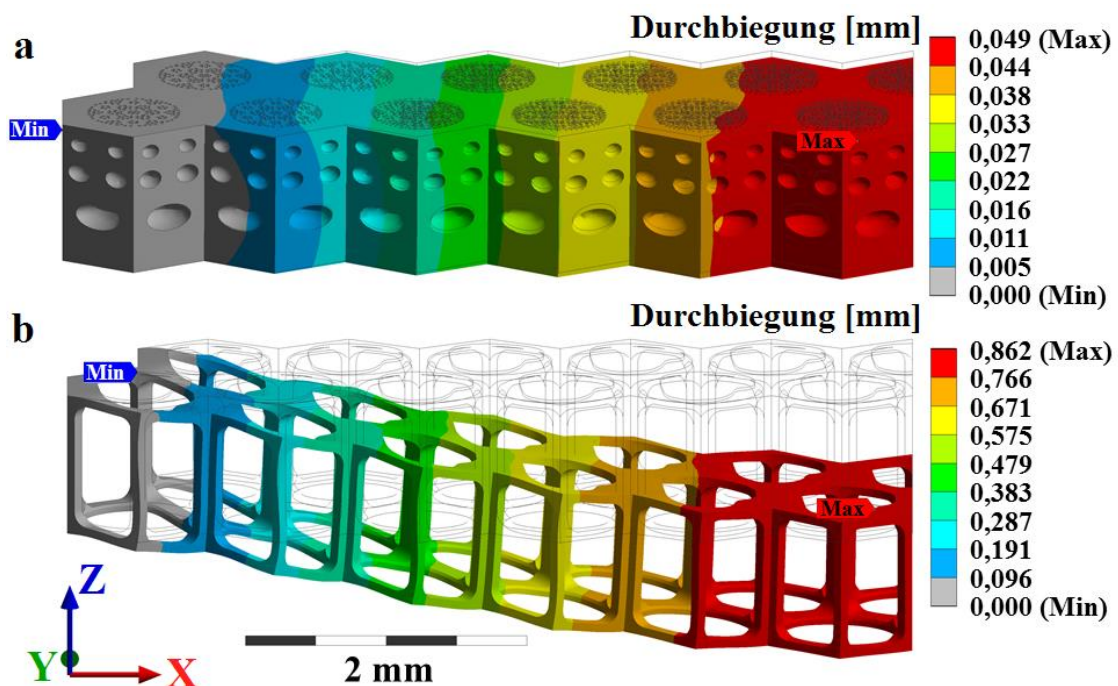


Abbildung 23: Maßstabgetreue Durchbiegungen in mm der Gesamtstrukturen von *Actinocyclus subtilis* (a) und *Arachnoidiscus* sp. (b) bei jeweils hinreichender Vernetzung. In grau ist jeweils die unverformte Struktur skizziert. Die deutlich höhere Durchbiegung bei *Arachnoidiscus* sp. im Vergleich zu *A. subtilis* ist gut erkennbar. Auf die Darstellung der Elemente wird zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet (ANSYS Workbench 16.1).

Wird die maximale Durchbiegung auf die Masse (Tab. 7) des jeweiligen Modells bezogen (Abb. 24b), so verstärken sich die Differenzen zwischen den einzelnen Werten im Vergleich zu Abb. 24a bei fast allen Areolenmodellen. Die Werte von *A. subtilis* und *Coscinodiscus* sp. betragen nun ca. 10 % bzw. 40 % des Wertes der gesinterten Struktur. *Arachnoidiscus* sp. und *T. eccentrica* liegen bei mehr als der 15fachen bzw. 12fachen massenspezifischen Durchbiegung der Referenzstruktur. Der Wert von *A. undulatus* verändert sich kaum.

Tabelle 7: Massen der verschiedenen Modelle der Gesamtstruktur

Modell	Masse [mg]
<i>Actinocyclus subtilis</i>	59,17
<i>Actinoptychus undulatus</i>	15,35
<i>Arachnoidiscus</i> sp. (ohne Cribrumstruktur)	7,15
<i>Coscinodiscus</i> sp.	32,40
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	8,61
Gesinterte Struktur	15,25

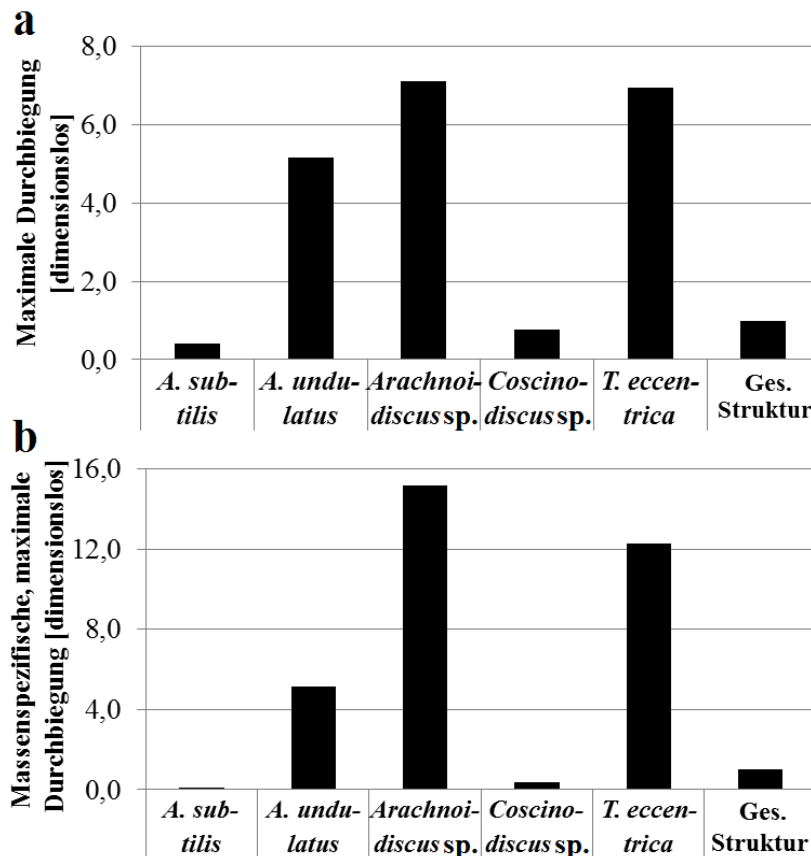


Abbildung 24: (a) Maximale Durchbiegung der Gesamtstrukturen der fünf Areolenmodelle und der gesinterte Struktur. Die Entdimensionierung wird mit der Durchbiegung der gesinterten Struktur als Bezugsgröße durchgeführt; (b) Massenspezifische, maximale Durchbiegung (dimensionslos) der fünf Areolenmodelle und der gesinterten Struktur. Es wird jeweils der Quotient aus der Strukturdurchbiegung und der Masse der Struktur gebildet. Die Entdimensionierung wird mit Hilfe des Quotienten aus Strukturdurchbiegung und Masse der gesinterten Struktur als Bezugsgröße durchgeführt.

Analytische Rechnung der Balkendurchbiegung

Mit Hilfe der Gleichungen (6) und (7) wird für die maximale Durchbiegung des Balkens ein Wert von gerundet 0,13 mm ermittelt. Dabei werden die in Anhang II.iii.c aufgelisteten Werte eingesetzt.

3.4 Durchbiegung der Membran und Stützstruktur

Die Ergebnisse der Gitterstudie, die bei allen Modellen zu einer hinreichenden Vernetzung führt, sind im Anhang II.iv.b aufgeführt.

Die maximalen Durchbiegungen der unteren Membranflächen, die auf den Areolenmodellen aufliegen, sind alle deutlich geringer als die maximale Durchbiegung der unteren Membranfläche im Stahlfedermodell (Anhang II.iv.a), wobei Letztere 28,691 μm beträgt (Abb. 25a, Anhang II.iv.c). Unter den Areolenmodellen führt die Struktur von *A. undulatus* zu der höchsten Membrandurchbiegung von ungefähr 40 % der Membrandurchbiegung des Stahlfedermodells. Die maximalen Membranendurchbiegungen von *Coscinodiscus* sp. und *Arachnoidiscus* sp. liegen unter 10 % der Referenzdurchbiegung, während sich die Membranen bei *A. subtilis* und *T. eccentrica* lediglich um weniger als 1 % der Durchbiegung der Membran im Stahlfedermodell verformen.

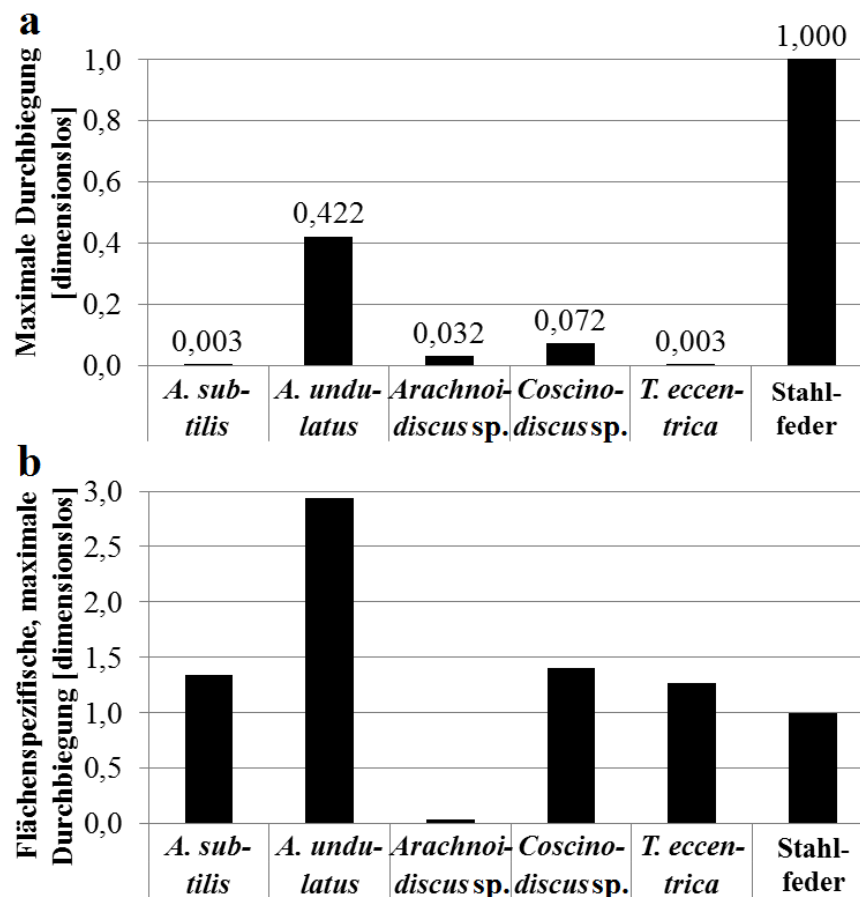


Abbildung 25: (a) Darstellung der maximalen Durchbiegung (dimensionslos) der unteren Membranfläche für die fünf Areolenmodelle und das Stahlfedermodell. Die Entdimensionierung wird mit der maximalen Membrandurchbiegung im Stahlfedermodell als Referenzgröße durchgeführt. Aufgrund hoher Unterschiede zwischen den Werten sind diese zum besseren Verständnis aufgeführt; (b) Flächenspezifische, maximale Durchbiegung (dimensionslos) der unteren Membranfläche für die fünf Areolenmodelle und das Stahlfedermodell. Es wird der Quotient aus der maximalen Membrandurchbiegung und der Fläche des größten Lochs unterhalb der Membran gebildet. Dieser Quotient des Stahlfedermodells stellt die Bezugsgröße für die Entdimensionierung dar.

Wird im Anschluss die maximale Membrandurchbiegung auf die jeweilige größte Lochfläche (Tab. 8) bezogen, so wird bei *A. undulatus* ein Maximalwert von knapp 300 % der flächenspezifischen Membrandurchbiegung im Stahlfedermodell erreicht (Abb. 25b). Die flächenspezifische Membrandurchbiegung von *Arachnoidiscus* sp. liegt bei weniger als 5 % der Referenzdurchbiegung. Die flächenspezifischen Durchbiegungen der Membranen bei *A. subtilis*, *Coscinodiscus* sp. und *T. eccentrica* betragen ungefähr 135 % der flächenspezifischen Membrandurchbiegung im Stahlfedermodell.

Vergleichend sind in Abb. 26 die Modelle der höchsten (*A. undulatus*) und niedrigsten (*T. eccentrica*) Membrandurchbiegungen dargestellt. Erkennbar ist, dass bei *A. undulatus* die Membrandicke erkennbar geringer ist, als die Höhe der Stützstruktur, während gleichzeitig der Porendurchmesser deutlich größer ist als die Membranhöhe. Bei *T. eccentrica* liegt der umgekehrte Fall vor.

Die Membrandurchbiegung in dem veränderten *A. undulatus* - Modell für den Vergleich mit der Analytik liegt bei 0,025 mm (Anhang II.iv.c).

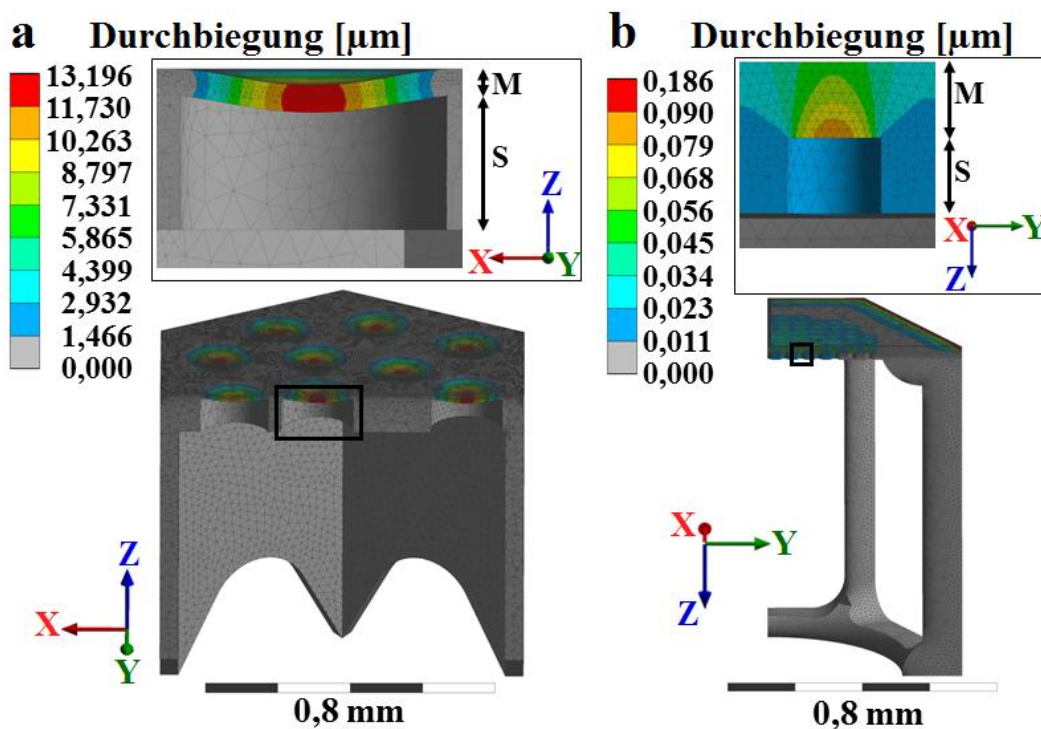


Abbildung 26: Maßstabsgetreue Verformungen von Membran und Stützstruktur in μm von *Acetinoptychus undulatus* (a) und *Thalassiosira eccentrica* (b) bei jeweils hinreichender Vernetzung. Die unteren Abbildungen zeigen jeweils einen Ausschnitt aus dem berechneten Modell. Der schwarz umrahmte Bereich einer durch eine Membran (M) bedeckten Pore wird in dem oberen Teil der Abbildung vergrößert dargestellt, wobei (S) die Höhe der Stützstruktur darstellt. (ANSYS Workbench 16.1).

Die abschließende Darstellung der Durchbiegung der Stützstruktur für die Membran (Abb. 27) zeigt eine vergleichsweise hohe Durchbiegung der *Arachnoidiscus* sp. - Struktur von nahezu der 30fachen Durchbiegung der Stahlfeder. Die Struktur von *T. eccentrica* weist eine ungefähr doppelte Durchbiegung der Referenzgeometrie auf. Die Durchbiegungen der Strukturen von *A. undulatus*, *A. subtilis* und *Coscinodiscus* sp. liegen bei weniger als 20 % der Stahlfederdurchbiegung.

Tabelle 8: Größte Lochfläche der Struktur, auf der die Membran in den sechs Modellen aufliegt.

Modell	Lochfläche [mm ²]
<i>Actinocyclus subtilis</i>	0,00045
<i>Actinoptychus undulatus</i>	0,03142
<i>Arachnoidiscus</i> sp.	0,18544
<i>Coscinodiscus</i> sp.	0,01124
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	0,00049
Stahlfeder	0,20549

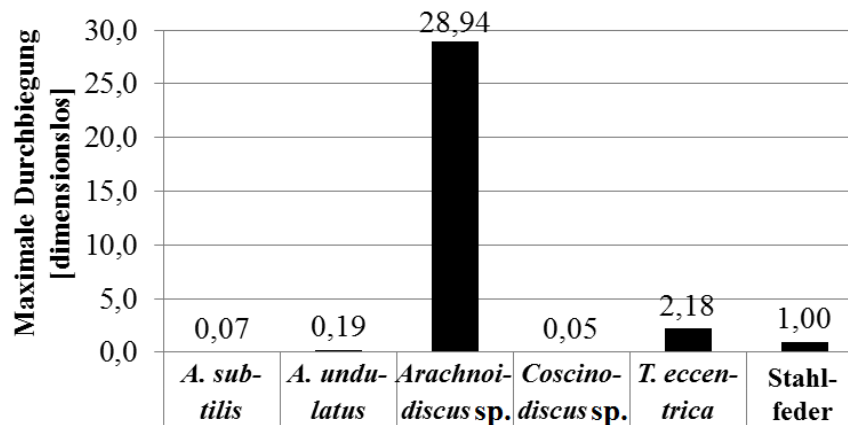


Abbildung 27: Dimensionslose, maximale Durchbiegung der Stützstruktur, auf der die Membran befestigt ist. Die maximale Durchbiegung der Stahlfeder ist die Bezugsgröße für die Entdimensionierung. Aufgrund hoher Unterschiede zwischen den Werten sind diese zum besseren Verständnis aufgeführt.

Analytische Rechnung der Membrandurchbiegung

Für die analytische Rechnung der Durchbiegung der Membran wird ein gerundeter Wert von 0,03 mm mit Hilfe der Gleichungen (8) und (9) errechnet, wobei die eingesetzten Werte dem Anhang II.iv.d zu entnehmen sind.

3.5 Übersichtsdarstellung der Ergebnisse

Abschließend werden alle Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Dabei ist in Abb. 28a zunächst die Durchbiegung der Gesamtstruktur in Abhängigkeit von dem Diffusionsstrom aufgeführt. *A. subtilis* und *Coscinodiscus* sp. liegen innerhalb des Bereiches, der von den bereits in der Technik verwendeten Strukturen gebildet wird. Sie weisen geringere Diffusionsströme als das Stahlfedermodell, aber ebenso geringere Durchbiegungen als die gesin-

terte Struktur auf. Die anderen drei Areolenmodelle liegen im Hinblick auf die Struktur-
durchbiegung deutlich oberhalb der gesinterten Struktur.

Die Betrachtung der Durchbiegungen von Membranfläche und Stützstruktur in Abhängig-
keit von dem Diffusionsstrom (Abb. 28b) zeigt ebenfalls eine teilweise hohe Streuung der
Daten. Während sich die Durchbiegungen von Membran und Stützstruktur bei *A. subtilis*,
Coscinodiscus sp. und *A. undulatus* weniger stark unterscheiden, findet sich bei
T. eccentrica ein höherer Durchbiegungswert der Struktur von mehr als 2,0. Die Durchbie-
gung der Stützstruktur von *Arachnoidiscus* sp. ist mit einem Wert von 29,0 extrem hoch.

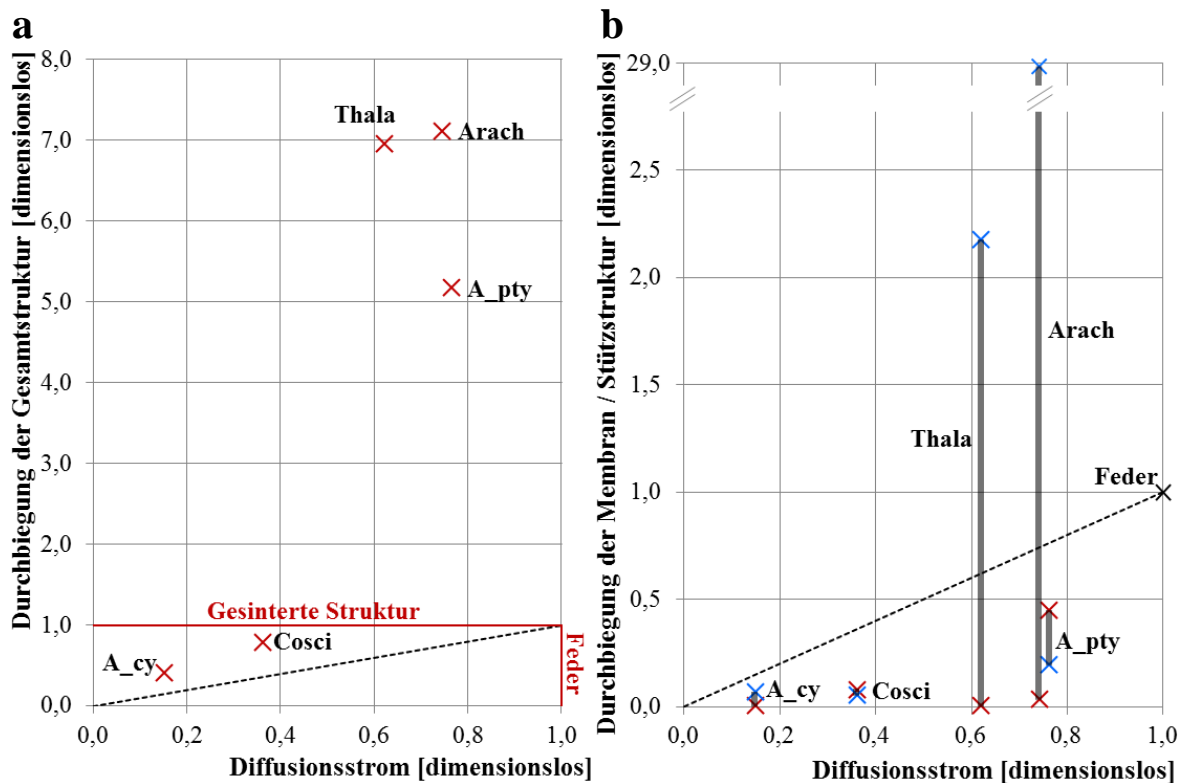


Abbildung 28: (a) Die Durchbiegung der Gesamtstruktur (dimensionslos) ist in Abhängigkeit von dem Diffusionsstrom (dimensionslos) dargestellt. Dabei sind die fünf Areolenmodelle im Vergleich zu der gesinterten Struktur und der Stahlfeder abgebildet. Für die gesinterte Struktur wird lediglich die Durchbiegung der Gesamtstruktur gezeigt, die die Bezugsgröße für die Entdimensionierung darstellt (horizontale, rote Linie). Für das Stahlfedermodell ist allein der Diffusionsstrom als Bezugsgröße für die Entdimensionierung der Diffusionsströme erkennbar (vertikale, rote Linie); (b) Dargestellt sind die Durchbiegungen von der unteren Membranfläche (dimensionslos, rotes Kreuz) und der Stützstruktur unterhalb der Membran (dimensionslos, blaues Kreuz) in Abhängigkeit von dem Diffusionsstrom (dimensionslos) für die fünf Areolenmodelle, sowie das Stahlfedermodell. Dabei sind die beiden Kreuze zur besseren Anschaulichkeit jeweils durch einen grauen Balken miteinander verbunden. Die Entdimensionierungen der Durchbiegungswerte und des Diffusionsstroms erfolgen mit Hilfe der jeweiligen Ergebnisse des Stahlfedermodells als Bezugsgröße. Die Membran- und Stützstrukturdurchbiegung der Stahlfeder betragen 1,0 und liegen übereinander (schwarzes Kreuz). Wegen der hohen Durchbiegung bei *Arachnoidiscus* sp. ist zur besseren Übersichtlichkeit ein Schnitt in der Skala der Durchbiegung erkennbar (A_cy: *Actinocyclus subtilis*, A_pty: *Actinoptychus undulatus*, Arach: *Arachnoidiscus* sp., Cosci: *Coscinodiscus* sp., Thala: *Thalassiosira eccentrica*).

Im Folgenden sind zusammenfassend die wichtigsten Ergebnisse aufgelistet.

Diffusion:

- Die resultierenden Diffusionsströme aller Areolenmodelle sind geringer als der Diffusionsstrom der Stahlfeder. Dabei wird die höchste Diffusionsleistung innerhalb der Areolenmodelle bei *Arachnoidiscus* sp. mit 75 % des Diffusionsstroms der Stahlfeder erreicht.
- Wird der Diffusionsstrom auf den jeweiligen kleinsten Diffusionsquerschnitt oder auf die Tiefe dieser kleinsten Querschnittsfläche bezogen, so verändern sich die Verhältnisse der Diffusionsströme zueinander stark. Der Bezug des Diffusionsstroms auf das jeweilige Diffusionsvolumen führt zu weniger ausgeprägten Veränderungen im Vergleich zu den Werten des dimensionslosen Diffusionsstromes.

Durchbiegung der Gesamtstruktur:

- Die Durchbiegungen der Gesamtstrukturen der unterschiedlichen Areolenmodelle variieren immens und liegen sowohl deutlich oberhalb, als auch unterhalb der gesinterten Struktur.
- Die Darstellung der massenspezifischen Durchbiegung zeigt noch größere Differenzen zwischen den Durchbiegungswerten.

Durchbiegung der Membran und Stützstruktur:

- Alle Areolenmodelle mit Ausnahme von *A. undulatus* bilden eine Stützstruktur, bei der die Membrandurchbiegung aufgrund der kleinen Poren weniger als 10 % der Durchbiegung der Membran im Stahlfedermodell beträgt.
- Im Hinblick auf die Stützstruktur unterhalb der Membran ist die vergleichsweise hohe Strukturverformung bei *Arachnoidiscus* sp. auffällig.

4 Diskussion und Ausblick

4.1 Diffusion

Der Vergleich der analytischen Lösung für den Diffusionsstrom des Hohlraummodells ohne Ausgangsstruktur mit dem numerischen Ergebnis zeigt eine exakte Übereinstimmung beider Werte. So wird nachgewiesen, dass aufgrund gleicher mathematischer Grundgleichungen die Diffusion in ANSYS analog als thermische Analyse bzw. Wärmeleitung durch einen Festkörper durchgeführt werden kann.

Die Ermittlung einer hinreichenden Vernetzung bildet ebenfalls die Grundlage für den Erhalt belastbarer Ergebnisse.

Die instationären Ergebnisse zeigen eindeutig stationäre Lösungen, die den Ergebnissen der jeweiligen stationären Rechnungen entsprechen. Aus diesem Grund werden alle folgenden Rechnungen im Rahmen der Gitterstudie begründet stationär durchgeführt.

Der Verlauf der Konzentration über der Tiefe der Struktur (Abb. 18) gibt Aufschluss über den Diffusionswiderstand der jeweiligen Struktur. Das Hohlraummodell stellt einen sechseckigen Raum dar, in dem der Diffusion keinerlei Hindernisse geboten werden. Dementsprechend nimmt die Konzentration gleichmäßig von der distalen zur proximalen Außenfläche ab.

Der Konzentrationsverlauf der Stahlfeder weicht von diesem nur geringfügig ab. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die distal befindlichen Drähte die einzigen Strukturen in dem ansonsten leeren Raum darstellen, die die Diffusion behindern. Zum anderen liegt der Konzentrationspfad direkt in der Mitte des Diffusionsmodells und somit nicht in unmittelbarer Nähe zu einem der Drähte. Dementsprechend wird der Einfluss der Drähte auf den Konzentrationsverlauf verringert.

Die Kurven von *Arachnoidiscus* sp. und *Coscinodiscus* sp. zeigen aufgrund ihres distalen, nanostrukturierten Cribrums bzw. Cribellums einen anfänglichen Abfall. Dieser erfolgt bei *Coscinodiscus* sp. aufgrund der eingesenkten Lage der Nanostruktur erst später und fällt wegen der großen Tiefe der kleinen Struktur gleichzeitig stärker aus. Im Gegensatz dazu weisen *T. eccentrica* und *A. undulatus* ihre Nanostrukturen am proximalen Ende der Areole auf, weshalb ihre Konzentrationsverläufe erst am Ende deutlich abfallen. Da der Konzentrationspfad bei *A. undulatus* durch die Struktur und nicht durch die Löcher des Cribrums verläuft, ist eine Lücke in der Kurve zu beobachten. Der Verlauf der Konzentration bei *A. subtilis* ist auf den sich stetig verkleinernden Diffusionsraum zurückzuführen.

Die Konzentrationsverläufe bedingen die Diffusionsstromdichte j (SI-Einheit $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), für die nach Baehr und Stephan (2010) gilt

$$j = -D \frac{c_2 - c_1}{\Delta x} \quad (10)$$

mit dem Diffusionskoeffizienten D (SI-Einheit $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), dem Konzentrationsunterschied $c_2 - c_1$ (SI-Einheit mol m^{-3}) und der Höhe des Modells Δx (SI-Einheit m). So sind die sehr hohen lokalen Diffusionsstromdichten, die an den Übergängen von großen zu kleinen Strukturen infolge der hohen Konzentrationsdifferenz auftreten (Abb. 19), durchaus nachvollziehbar.

Der Vergleich der Diffusionsströme zeigt zunächst schlechtere Diffusionseigenschaften aller Areolenmodelle im Vergleich zu dem Stahlfedermodell, das aktuell in der Technik verwendet wird (Abb. 20).

Die Diffusionsleistung ist u.a. abhängig von den geometrischen Eigenschaften der jeweiligen Struktur, durch die diffundiert wird. In den hier untersuchten Modellen nehmen somit die für die Diffusion relevante Querschnittsfläche und das Diffusionsvolumen Einfluss auf

die Diffusion. Übertragen auf die hier betrachteten Modelle unterscheiden sich diese trotz normierter Grundstruktur sehr in ihrer Geometrie voneinander. Zu den Unterschieden gehören die Strukturen an den distalen und / oder proximalen Enden der Areolen, das gesamte Diffusionsvolumen, der kleinste Diffusionsquerschnitt, der aus der Cribrum- bzw. Cribellumstruktur resultiert, sowie die Tiefe dieser kleinsten Nanostruktur. Die Nanostrukturen behindern die Beweglichkeit der Teilchen, wodurch sich der Diffusionskoeffizient verringert und folglich auch der Diffusionsstrom (Baehr, Stephan 2010).

Die Abschätzung des Einflusses der geometrischen Parameter auf die Diffusion ist von großer Bedeutung, um aus den so gewonnenen Erkenntnissen eine Struktur mit bestmöglichen Diffusionseigenschaften entwickeln zu können. In einem ersten Schritt wird das Flächenverhältnis aus dem kleinsten und dem in der normierten Sechseckstruktur maximal möglichen Diffusionsquerschnitt (also der Querschnittsfläche der Sechseckstruktur) gebildet. Ebenso wird das Verhältnis aus dem Diffusionsstrom und dem maximal möglichen Diffusionsstrom der Sechseckstruktur berechnet (Abb. 21). Die Bezugsgrößen entstammen dem Hohlraummodell, welches einen reinen Diffusionsraum in der normierten Sechseckstruktur darstellt. Auf der abgebildeten, linearen Funktion sind alle Modelle zu finden, deren Diffusionseigenschaften lediglich von der Querschnittsfläche abhängen, während alle anderen geometrischen Parameter über der Höhe der Struktur konstant bleiben.

Dementsprechend kann gesagt werden, dass der Einfluss der unterschiedlichen Parameter umso größer ist, je weiter das jeweilige Modell von der Geraden abweicht. Erkennbar ist somit, dass die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter bei *A. subtilis* am geringsten und bei *T. eccentrica* und *Arachnoidiscus* sp. am höchsten sind. Die anderen Modelle befinden sich zwischen diesen beiden Extremen.

Im nächsten Schritt wird der Einfluss jedes einzelnen Parameters auf die Diffusion untersucht, indem der Diffusionsstrom auf die jeweilige geometrische Eigenschaft bezogen wird. Eine daraus resultierende, große Veränderung in den Ergebnissen im Vergleich zu dem Diffusionsstrom kann als Indiz dafür aufgefasst werden, dass der geometrische Parameter einen hohen Einfluss auf die Diffusionsleistung besitzt.

Flächenspezifisch: Die Betrachtung des Diffusionsstroms bezogen auf die kleinsten Diffusionsquerschnitt (Abb. 22a) lässt folglich auf einen großen Einfluss des kleinsten Diffusionsquerschnitts schließen. Alle Areolenmodelle weisen nun höhere Werte auf als die Stahlfeder. Die flächenspezifischen Diffusionsströme von *T. eccentrica* und *Coscinodiscus* sp. betragen beispielsweise den fünf- bzw. vierfachen Wert des Stahlfedermodells. Das ist darauf zurückzuführen, dass beide Modelle die kleinsten Querschnittsflächen im Vergleich zu den anderen Modellen aufweisen, während die Stahlfeder einen sehr großen Diffusionsquerschnitt besitzt (Tab. 6).

Längenspezifisch: Neben der Diffusionsfläche der kleinsten Struktur ist auch ihre Tiefe von großer Bedeutung für die Diffusionsleistung. Dementsprechend führt der Bezug des Diffusionsstroms auf die Tiefe der kleinsten Struktur ebenfalls zu einer sehr veränderten Darstellung der Werte (Abb. 22b). Auch hier fällt der hohe Wert von *T. eccentrica* auf, wobei lediglich bei *Arachnoidiscus* sp. ein höherer Wert erreicht wird. In beiden Modellen besitzen die Cribrum- bzw. Cribellumstrukturen eine verhältnismäßig geringe Tiefe. Dagegen führt die hohe Tiefe der Nanostruktur bei *Coscinodiscus* sp. zu einem sehr geringen längenspezifischen Diffusionsstrom.

Volumenspezifisch: Der Einfluss des Diffusionsvolumens auf den Diffusionsstrom kann im Vergleich zur kleinsten Querschnittsfläche als gering aufgefasst werden (Abb. 22c). Alle Areolenmodelle weisen hier niedrigere Werte als das Stahlfedermodell auf. Deutlich erkennbar ist aber ein Anstieg des Wertes für *A. subtilis*, was mit dem verhältnismäßig deutlich geringeren Diffusionsvolumen (Tab. 6) begründet werden kann.

4.2 Durchbiegung der Gesamtstruktur

Die analytisch ermittelte Durchbiegung des Balkens liegt in der gleichen Größenordnung wie die numerische Lösung, weshalb die Ergebnisse als belastbar angenommen werden. Aufgrund ermittelter hinreichender Vernetzung können die Modelle trotz unterschiedlicher Vernetzungseinstellungen miteinander verglichen werden.

Die Durchbiegungen der Areolenmodelle liegen sowohl deutlich über der Durchbiegung der gesinterten Struktur, als auch darunter (Abb. 24a). Sehr hohe Verformungen treten bei *T. eccentrica* und *Arachnoidiscus* sp. auf. Beide Modelle besitzen große Löcher in ihren Wabenwänden bei gleichzeitig verhältnismäßig dünner Wandstärke. Dementsprechend resultieren Verformungen, die mehrfach diejenige der gesinterten Struktur übertreffen. Auch *A. undulatus* weist eine hohe Strukturdurchbiegung auf, was auf die im Mittel geringere Höhe der Wände zurückzuführen ist. Sowohl die dünnen Wände, als auch die geringe Wandhöhe resultieren in Flächenträgheitsmomenten, die im Vergleich zu den Flächenträgheitsmomenten von *Coscinodiscus* sp. und *A. subtilis* geringer ausfallen. Dies führt nach Gleichung (6) zu einer höheren Durchbiegung.

Die Durchbiegung von *Coscinodiscus* sp. liegt nur leicht über der Verformung von *A. subtilis*, obwohl letztere eine deutlich höhere Wandstärke besitzt. Dies deutet auf das zusätzliche Vorhandensein versteifender Mechanismen bei *Coscinodiscus* sp. hin, die zu einem höheren Flächenträgheitsmoment führen. Die Betrachtung des Strukturquerschnitts (Abb. 16) zeigt die Form eines doppelten T-Trägers, der nach dem Satz von Steiner zu einem vergleichsmäßig hohen Flächenträgheitsmoment führt und so der Durchbiegung entgegenwirkt (Grote, Feldhusen 2007).

Massenspezifisch: Werden die Durchbiegungsergebnisse auf die jeweilige Masse des Modells bezogen (Abb. 24b), so erhöhen sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Werten. Die stark verformten Strukturen von *Arachnoidiscus* sp. und *T. eccentrica* erreichen deutlich höhere Werte, während die Werte von *A. subtilis* und *Coscinodiscus* sp. sinken. Dies hängt bei Letzteren mit der hohen Masse zusammen (Tab. 7), während *Arachnoidiscus* sp. und *T. eccentrica* geringe Massen besitzen. Da die Masse von *A. undulatus* derjenigen der gesinterten Struktur sehr ähnelt, verändert sich der Wert dieser Areolenstruktur jedoch kaum im Vergleich zum Durchbiegungswert.

Im Zusammenhang mit den Ergebnissen der gesinterten Struktur sind die Resultate dieses Referenzmodells stets unter der Tatsache zu betrachten, dass der Struktur ein homogenes Material zugeordnet ist, dessen Elastizitätsmodul ca. 25 % des Elastizitätsmoduls der Areolenstrukturen beträgt. Da der Elastizitätsmodul nach Gleichung (6) antiproportional zur Durchbiegung ist, sind die vergleichsweise hohen Durchbiegungswerte für die gesinterte Struktur durchaus nachvollziehbar.

Abschließend ist anzumerken, dass die durchgeführten Betrachtungen zwar einen Vergleich der unterschiedlichen Strukturen untereinander ermöglichen, jedoch nicht auf die technische Problemstellung übertragen werden können. Dies ist zum einen darin begründet, dass die Wabenstruktur selber in der technischen Anwendung vermutlich von inneren Stützstrukturen unterstützt wird (Abb. 12a), die in dieser Betrachtung vernachlässigt worden sind. Der Einbau von Stützstrukturen würde zu geringeren Verformungswerten führen. Des Weiteren besitzt die Membranhalterung eine geschlossene, zylindrische Form. Da geschlossene Formen eine ca. 30fach höhere Belastbarkeit als offene Formen besitzen (Klein 2009), sind in der Realität auch aus diesem Grund geringere Verformungswerte der Waben zu erwarten.

4.3 Durchbiegung der Membran und Stützstruktur

Die Ermittlung einer hinreichenden Vernetzung für jedes Modell, sowie die Übereinstimmung der gerundeten Ergebnisse der analytischen Rechnung mit dem Resultat des numerischen Vergleichsmodells verdeutlichen die Aussagekraft der Ergebnisse.

Die Durchbiegung der Membran in die jeweilige darunter befindliche Stützstruktur ist abhängig von der Geometrie und der Größe der Poren, die die Stützstruktur aufweist. So resultiert das Stahlfedermodell, in dem die Drähte einen verhältnismäßig großen Abstand zueinander haben, in eine sehr hohe Membrandurchbiegung (Abb. 25a). Alle Areolenmodelle mit Ausnahme von *A. undulatus* bilden eine Stützstruktur, bei der die Membrandurchbiegung aufgrund der kleinen Poren weniger als 10 % der Durchbiegung im Stahlfedermodell beträgt. Im Vergleich dazu führt die Struktur von *A. undulatus* zu einer hohen Membrandurchbiegung, denn sie weist große Poren auf (Abb. 16).

Wird die Membrandurchbiegung unabhängig von der größten Lochfläche (Tab. 8) der jeweiligen Stützstruktur dargestellt, so liegen fast alle Membrandurchbiegungen der Areolenmodelle oberhalb des Referenzmodells (Abb. 25b). Die Durchbiegungen der Membranen bei *A. subtilis* und *T. eccentrica* liegen in der gleichen Größenordnung. Beide Strukturen besitzen auf ihrer Außenfläche, auf der die Membran aufliegt, eine Vielzahl an gleich großen, runden Poren. Dabei unterscheidet sich der Porendurchmesser von *A. subtilis* nur geringfügig von demjenigen bei *T. eccentrica*, weshalb die Membrandurchbiegungen nahezu übereinstimmen. Bedeutsam ist dabei außerdem, dass die Porendurchmesser nahezu der Dicke der Membran entsprechen. So wird die Durchbiegung erschwert und ist bei *T. eccentrica* in Abb. 26b beispielsweise lediglich mit Hilfe der Farbskala nachzuvollziehen. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die höchsten Membranverformungen bei *T. eccentrica* am Rand des Modells auftreten. Diese Verformungen würden aufgrund einer direkt dort anschließenden, nächsten Wabenstruktur im Realitätsfall nicht auftreten, weshalb sie in dieser Arbeit vernachlässigt werden.

Die Membrandurchbiegung bei *Coscinodiscus* sp. liegt in der gleichen Größenordnung wie *T. eccentrica*, da die nahezu rundlichen Poren gleichermaßen in der gleichen Dimension wie die Dicke der Membran liegen. Im Gegensatz dazu biegt sich die Membran bei *A. undulatus* trotz ebenfalls rundlicher Poren stark durch. Dies hängt damit zusammen, dass der Porendurchmesser um ein Vielfaches größer ist als die Dicke der Membran (Abb. 26a). Dementsprechend erfolgt ein verstärktes Durchbiegen der Membran in die Poren. Die flächenspezifischen Membrandurchbiegungen bei *Arachnoidiscus* sp. und der Stahlfeder sind weniger gut für den hier behandelten Vergleich der Strukturen geeignet. Die geschlängelte Cribrumstruktur von *Arachnoidiscus* sp. stellt eine einzelne Pore mit einer großen Lochfläche dar. Doch diese bäumchenartige Struktur verbietet der Membran trotz der großen Lochfläche eine starke Durchbiegung. In der Darstellung wird die Struktur der Lochfläche jedoch nicht betrachtet, weshalb der resultierende Wert für *Arachnoidiscus* sp. in diesem Fall nicht aussagekräftig ist. Ähnliches gilt für das Stahlfedermodell, in dem die Lochfläche zwischen den Drähten ebenfalls keine rundliche Struktur darstellt, sondern vielmehr eine längliche Rechteckform. Doch auch diese Geometrie wird in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, so dass die flächenspezifische Membrandurchbiegung geringer ausfällt, als erwartet.

Abschließend wird die Verformung der Struktur unterhalb der Membran vergleichend betrachtet (Abb. 27). Die sehr hohe Durchbiegung der Struktur von *Arachnoidiscus* sp. ist sehr auffallend. Diese bäumchenartige Struktur besitzt keinerlei Versteifungsmechanismen (Abb. 16), so dass sie sich leicht verformen lässt. Im Vergleich dazu weist die Cribellumstruktur von *T. eccentrica*, welche die gleiche Tiefe besitzt, aufgrund der regelmäßigen Anordnung kleinster Poren eine deutlich geringere Durchbiegung auf. Sehr interessant sind die äußerst geringen Strukturverformungen bei *A. subtilis* und *Coscinodiscus* sp. In Abb. 29 ist ein Längsschnitt durch die Areolenstruktur von *A. subtilis* dargestellt. Erkenn-

bar ist, dass die rundlichen Geometrien alle durch versteifende Elemente miteinander, sowie mit der Wabenwand verbunden sind. Dieses Prinzip der Versteifung führt zu einer höheren Resistenz gegenüber Drucklasten. Die Geometrie von *Coscinodiscus* sp. weist ähnliche Versteifungsmechanismen auf (Abb. 16). Die Struktur ist zum einen sehr tief im Vergleich zu den anderen Areolenstrukturen. Zum anderen besteht sie aus jeweils mehreren, kleinen Poren, die in eine größere Pore eingelagert sind. Die größeren Poren sind alle durch solides Material untereinander und mit der Wabenwand verbunden, wodurch eine hohe Steifigkeit erreicht wird. Der ebenfalls niedrige Verformungswert der Struktur von *A. undulatus* kann auf die hohe Tiefe der Struktur, sowie den relativ großen Abstand der Poren zueinander zurückgeführt werden.

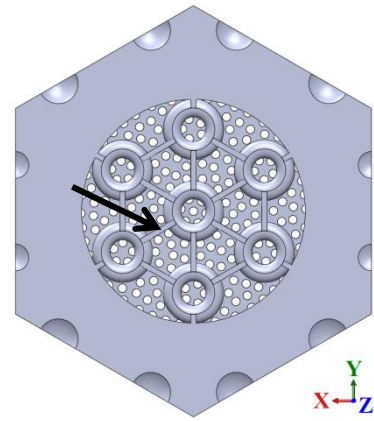


Abbildung 29: Längsschnitt durch die Areolenstruktur von *Actinocyclus subtilis* bei einer Tiefe von 0,1 mm. Erkennbar sind die versteifenden Elemente, die die großen, rundlichen Geometrien untereinander und mit der Wabenwand verbinden (schwarzer Pfeil).

Schlussendlich muss bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass das hier definierte Material der Membran nicht vollständig den realen Eigenschaften entspricht. Aufgrund fehlender Materialdaten wird ein linear elastisches Verhalten definiert, obwohl die Membran sich nichtlinear verhalten müsste. So sind die Ergebnisse zwar untereinander vergleichbar, aber können nicht auf den technischen Anwendungsfall übertragen werden.

Abschließend werden die wichtigsten Punkte der Diskussion zusammengefasst.

Diffusion:

- Die Diffusionsleistung ist umso höher, je weniger Hindernisse der Diffusion entgegengebracht werden. So weist das Stahlfedermodell den höchsten Diffusionsstrom auf.
- Die Einflüsse unterschiedlicher geometrischer Parameter auf die Diffusionsleistung sind bei *T. eccentrica* und *Arachnoidiscus* sp. am höchsten.
- Die kleinste Querschnittsfläche, sowie die Tiefe dieser Struktur haben einen hohen Einfluss auf die Diffusion, während das Diffusionsvolumen die Diffusion in einem geringeren Maße beeinflusst.

Durchbiegung der Gesamtstruktur:

- Im Zusammenhang mit der Durchbiegung der Gesamtstruktur lassen sich die hohen Verformungen bei *Arachnoidiscus* sp. und *T. eccentrica* auf die geringen Wandstärken und großen Hohlräumen in den Wänden zurückführen. Dahingegen weist *Coscinodiscus* sp. im Querschnitt einen ausgeprägten doppelten T-Träger und somit ein gleichmäßig hohes Flächenträgheitsmoment auf.

Durchbiegung der Membran und Stützstruktur:

- Eine optimale Porengröße der Stützstruktur unterhalb der Membran ist von großer Bedeutung. Dabei sollte die Porenbreite für eine geringe Membrandurchbiegung in der Größenordnung der Dicke der Membran liegen. Gleichzeitig besitzt die Porengröße jedoch einen hohen Einfluss auf die Diffusion.
- Innerhalb der Areolenmodelle tritt die geringste Membrandurchbiegung bei den kleinen, rundlichen Poren von *A. subtilis* und *T. eccentrica* auf.
- *A. subtilis* und *Coscinodiscus* sp. weisen Versteifungsmechanismen der Stützstruktur auf, die in einer deutlich geringeren Strukturverformung resultieren. Diese stellenweise Vertiefung der Porenstruktur erhöht einerseits die Steifigkeit, wobei sie andererseits die Diffusion geringfügig behindert.

4.4 Ausblick und Bedeutung der Ergebnisse für das technische Problem

Es ist gelungen, unterschiedliche Areolengeometrien zu konstruieren und im Hinblick auf ihre Diffusionseigenschaften und Steifigkeiten miteinander zu vergleichen.

Die konstruierten Strukturen sind mit Ausnahme weniger Abstraktionen in hoher Anlehnung an das biologische Vorbild konstruiert worden. Die daraus resultierende Tatsache, dass sich die Strukturen in ihrer Geometrie sehr voneinander unterscheiden, findet sich auch in den Ergebnissen wieder. Die Übersichtsdarstellungen (Abb. 28) zeigen innerhalb der Areolengeometrien teilweise weit gestreute Ergebnisse, die sowohl untereinander, als auch im Vergleich mit den Referenzmodellen aus der Technik sehr differieren.

Dennoch ist erkennbar, dass vor allem *T. eccentrica* eine sehr vielversprechende Struktur im Hinblick auf das technische Problem darstellt. Neben einem relativ hohen Diffusionsstrom besitzt die Struktur ebenfalls eine gut konzipierte Stützstruktur für die Membran, die einerseits kaum Membranverformungen ermöglicht und sich andererseits selber nur leicht verformt. Im Hinblick auf die Verformung der Gesamtstruktur treten hier jedoch vergleichsweise hohe Deformationen auf. Diese würden jedoch in der technischen Anwendung aufgrund der geschlossenen, zylindrischen Gesamtstruktur und der zusätzlichen Stützstrukturen vermutlich deutlich geringer ausfallen.

Neben *T. eccentrica* weisen auch die Untersuchungen von *Arachnoidiscus* sp. vielversprechende Ergebnisse auf. Lediglich die Verformung der Stützstruktur für die Membran ist als negativer Aspekt anzuführen, da diese bei der Simulation sehr hoch ausfällt.

Beide Areolengeometrien erweisen sich somit als gute Ausgangsmodelle für eine strukturelle Optimierung im Anwendungsfall. Der nächste Schritt, die Entwicklung einer optimierten Struktur, würde sich aus den gewonnenen Erkenntnissen über die Einflüsse und Wichtigkeit der einzelnen Strukturelemente ergeben. Wichtig dabei wäre, zur

exakten Quantifizierung der Einflüsse der geometrischen Parameter, jeweils nur einen Parameter zu ändern, während die restliche Geometrie konstant gehalten wird.

Zunächst sollen jedoch abschließend die aus den Areolenstrukturen gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und in ersten Konzepten zusammengeführt werden. Dabei zeigen die Ergebnisse sehr deutlich, dass das Erreichen einer optimalen äußeren Porenfläche von großer Bedeutung ist, da die kleinste Diffusionsfläche die Diffusion sehr beeinflusst. Je mehr Lochfläche vorhanden ist, desto größer ist die Diffusion. Dabei ist die Verwendung vieler kleiner Poren insoweit unausweichlich, als dass andernfalls eine hohe Membrandurchbiegung erfolgt.

Interessant wäre es, in weiteren Untersuchungen die Diffusionseigenschaften der Cribrumstrukturen von *T. eccentrica* mit derjenigen von *Arachnoidiscus* sp. bei gleicher Gesamtlochfläche zu vergleichen. Die bäumchenartige Geometrie von *Arachnoidiscus* sp. kann möglicherweise im Laufe der Evolution aus mehreren größeren Poren entwickelt worden sein. Da jede natürliche Struktur eine wichtige Funktion in einem Organismus besitzt, liegt somit die Frage nahe, inwiefern die bäumchenartige Nanostruktur zu besseren Diffusionseigenschaften führt und dadurch gleichzeitig die geringere Steifigkeit der Struktur kompensiert, als eine Struktur vieler, kleiner Poren. Möglicherweise würden längliche Porenstrukturen, wie etwa eine Kombination der Strukturen von *T. eccentrica* und *Arachnoidiscus* sp., eine optimale Struktur wiedergeben.

Im Hinblick auf den Vorteil der bäumchenartigen Nanostruktur im Vergleich zu beispielsweise der Porenstruktur von *Coscinodiscus* sp. muss an dieser Stelle jedoch angemerkt werden, dass die Diatomeenarten nicht den gleichen abiotischen und biotischen Faktoren ausgesetzt sind, weshalb sich die Geometrien ihrer Frusteln auch aus diesem Grund unterscheiden. *Coscinodiscus* sp. ist beispielsweise frei schwebend in der Wassersäule zu finden (Round et al. 1990) und muss u.a. den Druckbelastungen durch die Copepoden standhalten. Dahingegen lebt *Arachnoidiscus* sp. epiphytisch auf Seegräsern (Round et al. 1990). Ihre Frustel schützt die Alge gegenüber den Scherkräften der grasenden Schnecken. Die bäumchenartige Struktur ist somit ganz anderen Belastungen ausgesetzt, als die Cribrum- bzw. Cribellumstruktur von *Coscinodiscus* sp.

Neben einer möglichst großen Gesamtlochfläche am Eintritt soll die nanostrukturierte Porenfläche eine möglichst geringe Tiefe besitzen, wobei jedoch gleichzeitig eine hinreichende Steifigkeit notwendig ist. Eine stellenweise Vertiefung der Porenstruktur und die Verbindung dieser Vertiefungen untereinander und mit der Wabenwand, die bei *A. subtilis* zu finden ist (Abb. 29), stellt an dieser Stelle eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit dar. Gleichzeitig kann eine Wölbung der Porenplatte als mögliche Strukturoptimierung herangezogen werden. Auch durch diese Krümmung wird das Flächenträgheitsmoment und somit die Biegesteifigkeit erhöht (Klein 2009).

Im Hinblick auf die Wanddicke gilt es, eine hinreichende Steifigkeit der Gesamtstruktur bei gleichzeitiger Generierung eines möglichst großen Diffusionsvolumens zu erreichen. Sehr wichtig ist an dieser Stelle die Entwicklung der Wabenwand als einen doppelten T-Träger, um möglichst hohe Steifigkeiten zu erreichen. Weiter weisen die Strukturen von *T. eccentrica* und *Arachnoidiscus* sp. große Löcher in den Wänden auf. Diese dienen den Diatomeen vermutlich zur raschen Aufnahme von Nährstoffen, die nur wenige Areolen erreichen. Aus Zeitgründen ist der Einfluss der Löcher auf die Diffusion jedoch in dieser Arbeit nicht näher untersucht worden. Im technischen Anwendungsfall sind zwar keine punktuellen Teilchenkonzentrationen zu erwarten, doch Hohlquerschnitte führen nach Klein (2009) zu höheren Flächenträgheitsmomenten in Bezug auf die Masse als Vollquerschnitte. Somit wäre die Entwicklung von Wabenwänden mit Löchern durchaus interessant, zumal durch die Löcher zusätzlich das Diffusionsvolumen leicht erhöht wird. Ein erstes Konzept einer für die technische Problemstellung optimierten Areole, die die genannten strukturellen Elemente beinhaltet, ist in Abb. 30 dargestellt. Detailliertere Maße des Konzepts sind im Anhang III.i zu finden.

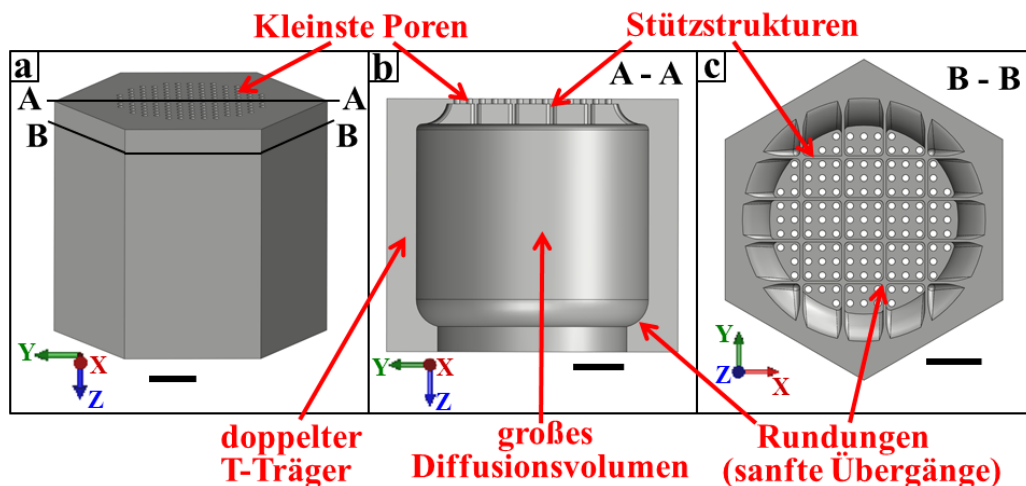


Abbildung 30: Darstellung eines ersten Konzepts zur Entwicklung einer für die technische Problemstellung optimierten Areolenstruktur, die aus Strukturelemente unterschiedlicher Areolen zusammengesetzt ist. Die in (a) skizzierten Schnittansichten der Areole sind in (b) und (c) dargestellt. Mögliche Hohlräume in den Wabenwänden oder eine Wölbung der oberen Porenplatte sind hier nicht abgebildet. Der Maßstabsbalken beträgt jeweils 0,2 mm.

Schlussendlich muss bei allen Strukturelementen angemerkt werden, dass sie vermutlich aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur bei vergleichsweise geringen Herstellungskosten Anwendung in der Technik finden werden. Die resultierende, bionisch strukturierte Membranhalterung wird vermutlich sehr komplex aufgebaut sein. Folglich besteht eine große Herausforderung in der Fertigung des Bauteils. Hierbei sei das Micro-Laser-Sintering als ein additives Herstellungsverfahren anzuführen, mit dem aktuell bereits feine Strukturen mit einer Schichtdicke von weniger als 5 μm und einem Fokusdurchmesser von weniger als 30 μm hergestellt werden (3D MicroPrint GmbH). Das resultierende Bauteil würde ein homogenes Werkstoffgefüge mit einer hohen Festigkeit aufweisen. An dieser Stelle kann

jedoch noch nicht abgeschätzt werden, wie hoch die finanziellen Mittel für die Herstellung einer solchen Struktur sein würden.

4.5 Weitere Anwendungsbereiche

Eine hoch diffusive und zugleich sehr druckfeste Membranhalterung kann in vielen Bereichen der Filtrations- und Sensortechnik, sowie der Galvanik angewendet werden (Hamm 2015). Dabei führen die guten Diffusionseigenschaften zu einer hohen Filtrationsgeschwindigkeit, während hohe Drücke einen verbesserten Durchfluss bedingen.

Ein spezielles Anwendungsgebiet stellen Wasseraufbereitungsanlagen von salinem, sowie verunreinigtem Wasser dar. In diesen Anlagen werden unter Druck Teilchen von einer wässrigen Matrix getrennt. Diese Umkehrosmose erfolgt entgegen des osmotischen Druckes. Dementsprechend wären auch hier sehr durchlässige und zugleich druckfeste Stützstrukturen für semipermeable Membranen von großer Wichtigkeit (Hamm 2015; Aquacare).

5 Fazit

Es ist gelungen, unterschiedliche Areolengeometrien von Diatomeen zu konstruieren und im Hinblick auf ihre Diffusionseigenschaften und Steifigkeiten miteinander zu vergleichen. Die einleitende Arbeitshypothese, nach der die Strukturen nach biologischem Vorbild ein Kompromiss zwischen Diffusion und Durchbiegung ermöglichen, kann bestätigt werden.

Die in den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse führen zu einem ersten Ansatz zur Entwicklung einer optimierten Struktur für die Membranhalterung. Für diese Struktur sind sowohl die Auslegung einer bestmöglichen Porengröße der Stützstruktur für die Membran, als auch die Integration versteifender Elemente von großer Bedeutung. Letztendlich wird durch die konzipierte, neue Struktur das eingangs genannte Ziel erreicht, nach dem die innovative Membranhalterung die Vorteile beider Referenzhalterungen kombinieren und somit sowohl diffusiv, als auch druckfest sein soll.

6 Literaturverzeichnis

6.1 Literatur

- Andersen, R. A., Medlin, L. K., Crawford, R. M. (1986): An investigation of the cell wall components of *Actinocyclus subtilis* (Bacillariophyceae). *Journal of Phycology* 22: 466-479.
- Bach, K., Burkhardt, B. (Hrsg.) (1984): Diatomeen I. Schalen in Natur und Technik. [Diatoms I. Shells in Nature and Technics]. Cramer Verlag: Stuttgart.
- Baehr, H. C., Stephan, K. (2010): Wärme- und Stoffübertragung. 7. Auflage. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.
- Bäuerlein, E. (2003): Biomineralisation von Einzellern: eine außergewöhnliche Membranbiochemie zur Produktion anorganischer Nano- und Mikrostrukturen. *Angewandte Chemie* 115. 6: 636-664.
- Friedrichs, L., Hörning, M., Schulze, L., Bertram, A., Jansen, S., Hamm, C. (2013): Size and biomechanic properties of diatom frustules influence food uptake by copepods. *Marine Ecology Progress Series* 481: 41-51.
- Friedrichs, L., Maier, M., Hamm, C. (2012): A new method for exact three-dimensional reconstructions of diatom frustules. *Journal of Microscopy* 248. 2: 208-217.
- Girkmann, K. (1986): Flächentragwerke. Einführung in die Elastostatik der Scheiben, Platten, Schalen und Faltwerke. 6. Auflage. Springer-Verlag: Wien, New York.
- Grote, K.-H., Feldhusen, J. (2007): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Auflage. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York.
- Hamm, C., Merkel, R., Springer, O., Jurkojc, P., Maier, C., Prectel, K., Smetacek, V. (2003): Architecture and material properties of diatom shell provides effective mechanical protection. *Nature* 421: 841-843.
- Hale, M. S., Mitchell, J. G. (2001): Functional morphology of diatom frustule microstructures: hydrodynamic control of Brownian particle diffusion and advection. *Aquatic Microbial Ecology* 24: 287-295.
- Helmcke, J.-G., Krieger, W. (1953-1977): Diatomeenschalen im elektronenmikroskopischen Bild. Parts 1-10 [1023 sets of electron micrographs]. Berlin.
- Hemond, H., Camilli, R. (2002): NERUS: engineering concept for an underwater mass spectrometer. *Trends in Analytical Chemistry* 21. 8: 526-533.
- Hürlimann, J., Kilchör, T., Dirnhofer, R., Wyler, D. (2007): Kieselalgen als mikroskopisch kleine biologische Spuren. In: Herrmann, B., Saternus, K. (Hrsg.): *Biologische Spurensuche. Band 1 Kriminalbiologie*. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg: 193-204.
- Kesel, A. B. (2011): Sind Prozesse aus der Natur auf Wirtschaftsprozesse übertragbar? In: Otto, K.-S., Speck, T. (Hrsg.) (2011): *Darwin meets Business. Evolutionäre und bionische Lösungen für die Wirtschaft*. Gabler-Verlag: Wiesbaden: 81-86.
- Kibelka, G. P. G., Short, R. T., Toler, S. K., Edkins, J. E., Byrne, R. J. (2004): Field-deployed underwater mass spectrometers for investigations of transient chemical systems. *Talanta* 64: 961-969.
- Klein, B. (2009): *Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 8. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag: Wiesbaden.
- Klein, B. (2012): *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 9. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag: Wiesbaden.
- Kováčik, J. (1999): Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials. *Journal of Materials Science Letters* 18: 1007-1010.
- Losic, D., Mitchell, J. G., Voelcker, N. H. (2006a): Fabrication of gold nanostructures by templating from porous diatom frustules. *New Journal of Chemistry* 30: 908-914.

- Losic, D., Rosengarten, G., Mitchell, J. G., Voelcker, N. H. (2006b): Pore Architecture of Diatom Frustules: Potential Nanostructured Membranes for Molecular and Particle Separations. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 6: 982-989.
- Losic, D., Pillar, R. J., Dilger, T., Mitchell, J. G., Voelcker, N. H. (2007): Atomic force microscopy (AFM) characterisation of porous silica nanostructures of two centric diatoms. *Journal of Porous Materials* 14: 61-69.
- Meschede, D. (2010): *Gerthsen Physik*. 24. Auflage. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.
- Nachtigall, W. (2002): *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.
- Pegg, E. C., Murray, D. W., Pandit, H. G., O'Connor, J. J., Gill, H. S. (2013): Fracture of mobile unicompartamental knee bearings: A parametric finite element study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 227. 11: 1213-1223.
- Round, F. E., Crawford, R. M., Mann, D. G. (1990): *The diatoms: Biology and morphology of the genera*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Schacham-Diamand, Y., Krylov, S., Shmilovich, T., Almog, R. O., Fishelson, N., Sverdlov, Y., Torchinsky, I., Rosenman, G., Inberg, A., Berkh, O. (2009): Metallization Technologies and Strategies for Plastic Based Biochips, Sensors and Actuators for Healthcare and Medical Applications. In: de Lima Monteiro, D. W., Bonnaud, O., Morimoto, N. (Hrsg.): *Microelectronics Technology and Devices - SBMicro 2009*. ECS Transactions. Vol. 23. 1: 243-254.
- Schlüter, M., Gentz, T. (2008): Application of Membrane Inlet Mass Spectrometry for Online and In Situ Analysis of Methane in Aquatic Environments. *Journal of American Society for Mass Spectrometry* 19: 1395-1402.
- Schmid, A.-M., Volcani, B. E. (1983): Wall Morphogenesis in *Coscinodiscus wailesii* Gran and Angst. I. Valve Morphology and Development of its architecture. *Journal of Phycology* 19: 387-402.
- Wenner, P. G., Bell, R. J., van Amerom, F. H. W., Toler, S. K., Edkins, J. E., Hall, M. L., Koehn, K., Short, R. T., Byrne, R. H. (2004): Environmental chemical mapping using an underwater mass spectrometer. *Trends in Analytical Chemistry* 23. 4: 288-295.

6.2 Patente

- US 2014/0283626 A1: „Tubular Membrane Gas and Volatile Compounds Sampler for Fluid Introduction at Atmospheric to High Pressure“, veröffentlicht am 25. 09. 2014, Anmelder: McMurtry, G. M., Kokubun, D.

6.3 Sonstige Quellen

- 3D MicroPrint GmbH, verfügbar unter <http://3dmicroprint.de/technologie/> (Zugriff: 28.11.2015).
- Aquacare, verfügbar unter <http://www.aquacare.de/info/tipps/d1ro-info.htm> (Zugriff: 14.12.2015).
- AWI/Friedrichs, L. (2007): REM-Aufnahmen von *Arachnoidiscus* sp. (unveröffentlicht).
- CADFEM GmbH (2013): Einführung in die Berechnung von Temperaturfeldern und in die Kupplung mit der Strukturmechanik. Umfassender und fundierter Überblick über alle in ANSYS Workbench verfügbaren Features. Seminar notes of CAFEM GmbH. ©CADFEM GmbH (ANSYS version V14.5).
- CONTROS Systems and Solutions GmbH, verfügbar unter <http://www.contros.eu/products.html> (Zugriff: 16.11.2015).

- Deutsche Edelstahlwerke (2015): Werkstoffdatenblatt X2CrNiMo 17-12-2 1.4404 vom 16.10.2015, verfügbar unter http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4404_de.pdf (Zugriff: 12.11.2015).
- Gentz, T., Schlüter, M. (2011): Unterwater cryotrap - membrane inlet system (CT-MIS) for improved in situ analysis of gases by mass spectrometry. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany. Presented at the 8th Workshop on Harsh Environment Mass Spectrometry, St Petersburg.
- Gentz, T., Weißgärber, T. (Ansprechpartner) (2011): Machbarkeitsstudie zur Herstellung von porös gesinterten Strukturen für eine Membrananwendung. Auftraggeber: Stiftung Alfred-Wegener-Institut, Auftragnehmer: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Industrieteil Dresden.
- Hamm, C. (2015): Innovative Probeneinlasssysteme für Sensoren zur kontinuierlichen Umweltüberwachung. DBU-Projektskizze Angewandte Umweltforschung. Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven, Bionischer Leichtbau.

Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei allen Personen, die mich in der Bearbeitung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank geht an Frau Prof. Dr. Susanna Labisch der Hochschule Bremen, sowie Herrn Dr. Christian Hamm des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung Bremerhaven, die meine Arbeit betreuten und mich durch konstruktive Gespräche und Anregungen unterstützten. Des Weiteren danke ich Herrn Hamm für die Ermöglichung der Kooperation im Rahmen meiner Thesis, sowie der Bereitstellung eines Arbeitsplatzes am Alfred-Wegener-Institut.

Ich möchte mich weiter sehr herzlich bei Marvin Frank und Nils Niebuhr bedanken, die mir für fachliche Ratschläge immer zur Seite standen und mich in der gesamten Zeit motivierten.

Mein Dank gilt weiter Florian Hoffmann und Christian Kehm, die mich in den 3D-Drucken der Areolenstrukturen unterstützten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und ganz besonders meinem Freund Mauricio Gélvez bedanken, die während meines Studiums und der Bearbeitung der Abschlussthesis stets hinter mir standen und mich stärkten.

Anhang

Inhalt des Anhangs

I.	Material und Methode	I
i.	Diffusion	I
a.	Modelle hinreichender Vernetzung	I
b.	Eigenschaften aller Vernetzungen	V
c.	Koordinaten des Konzentrationspfades	VI
ii.	Durchbiegung der Gesamtstruktur	VI
a.	Modelle hinreichender Vernetzung	VI
b.	Eigenschaften aller Vernetzungen	IX
iii.	Durchbiegung der Membran und Stützstruktur	X
a.	Modelle hinreichender Vernetzung	X
b.	Eigenschaften aller Vernetzungen	XII
II.	Ergebnisse	XIII
i.	Konstruktion	XIII
ii.	Diffusion	XVIII
a.	Instationäre Rechnungen	XVIII
b.	Gitterstudie	XX
c.	Diffusionsstromdichten	XX
iii.	Durchbiegung der Gesamtstruktur	XXII
a.	Gitterstudie	XXII
b.	Durchbiegungen der Modelle	XXIII
c.	Analytische Rechnung	XXIV
iv.	Durchbiegung der Membran und Stützstruktur	XXV
a.	Konstruiertes Stahlfedermodell	XXV
b.	Gitterstudie	XXVI
c.	Gesamtverformungen der Modelle	XXVI
d.	Analytische Rechnung	XXVIII
III.	Diskussion und Ausblick	XXIX
i.	Konzept einer optimierten Areolenstruktur	XXIX

I. Material und Methode

i. Diffusion

a. Modelle hinreichender Vernetzung

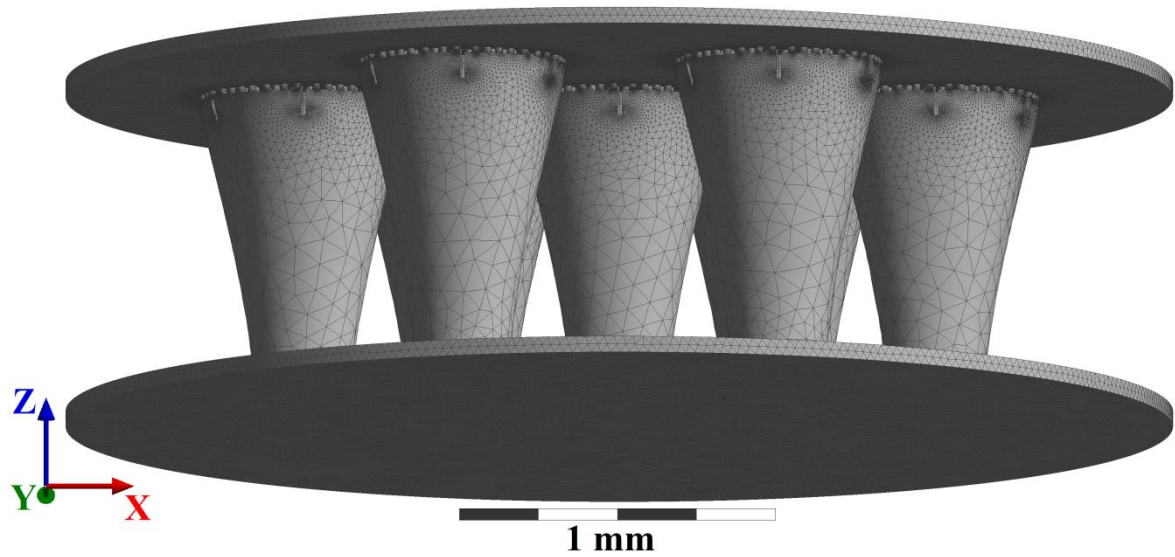


Abbildung I: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von *Actinocyclus subtilis* (ANSYS Workbench 16.1).

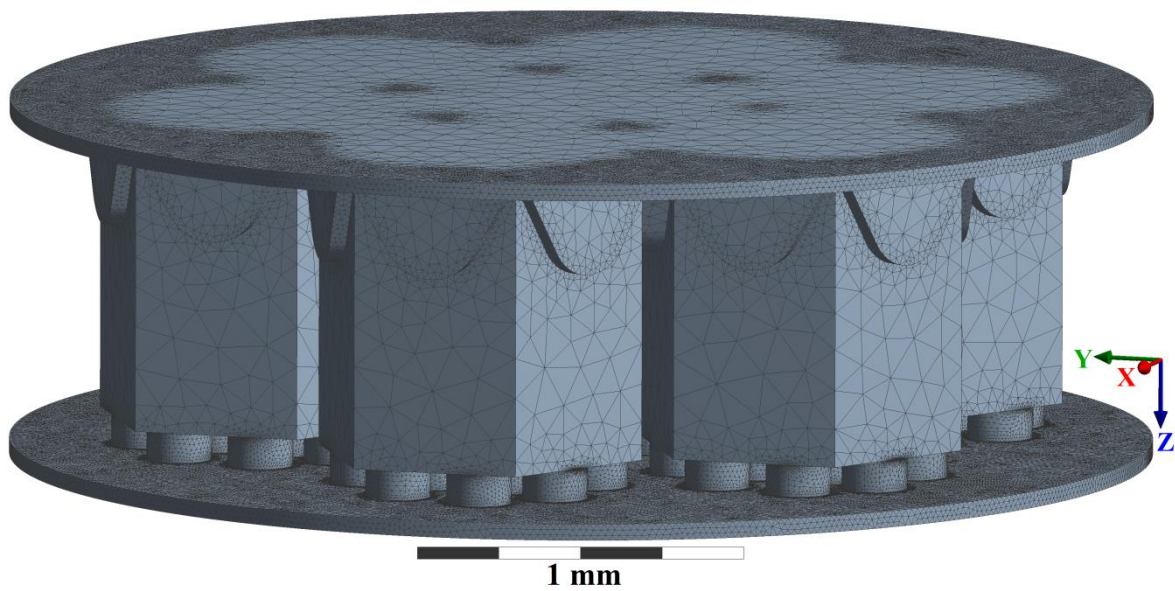


Abbildung II: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von *Actinoptychus undulatus* (ANSYS Workbench 16.1).

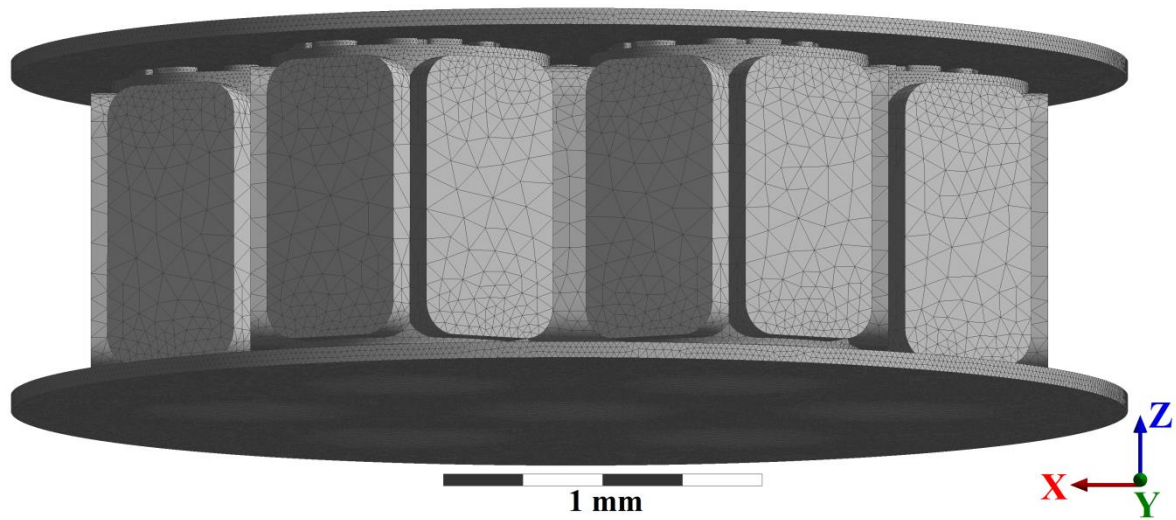


Abbildung III: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von *Arachnoidiscus* sp. (ANSYS Workbench 16.1).

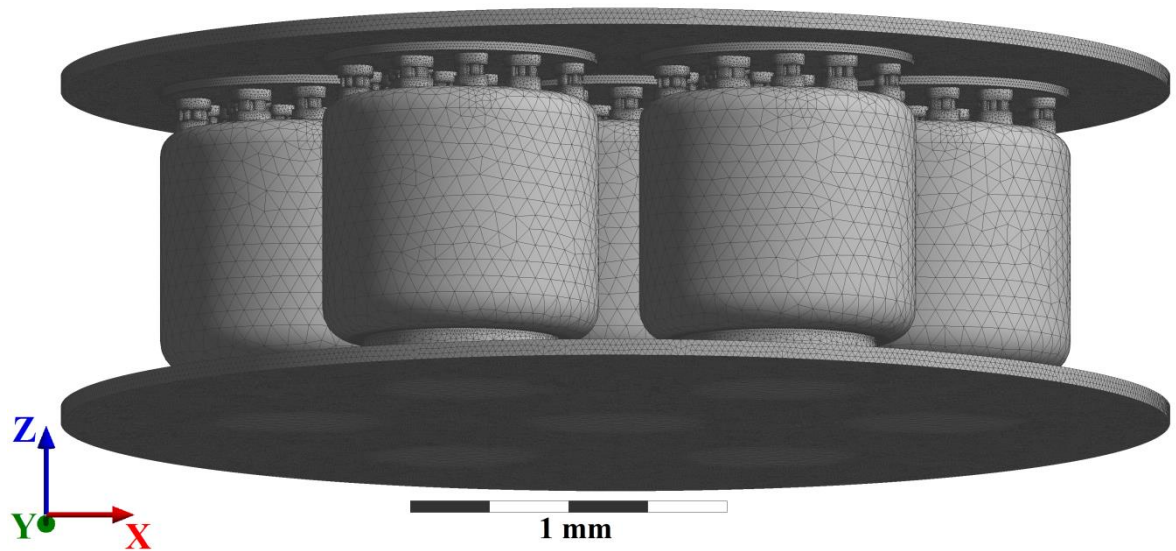


Abbildung IV: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von *Coscinodiscus* sp. (ANSYS Workbench 16.1).

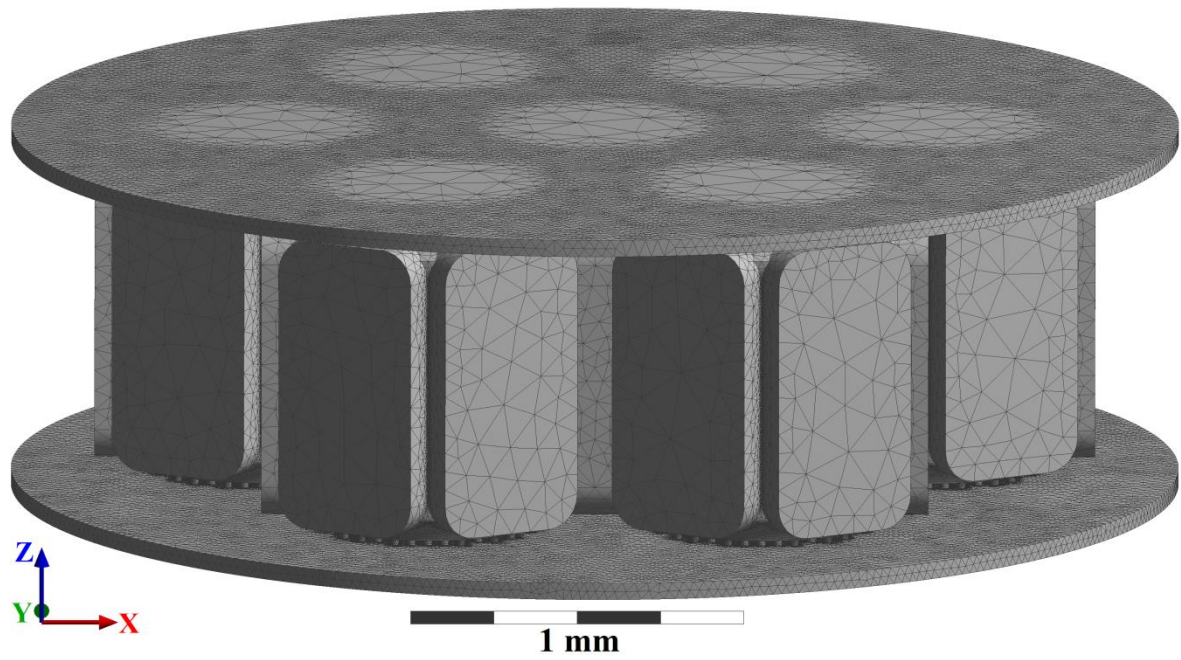


Abbildung V: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von *Thalassiosira eccentrica* (ANSYS Workbench 16.1).

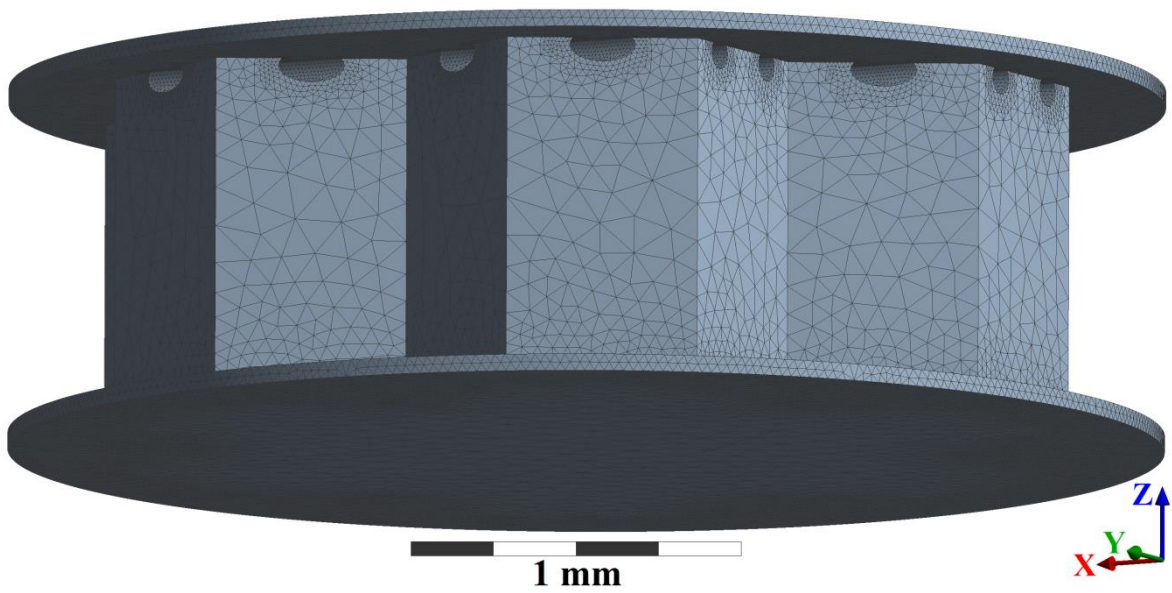


Abbildung VI: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von der Stahlfeder (ANSYS Workbench 16.1).

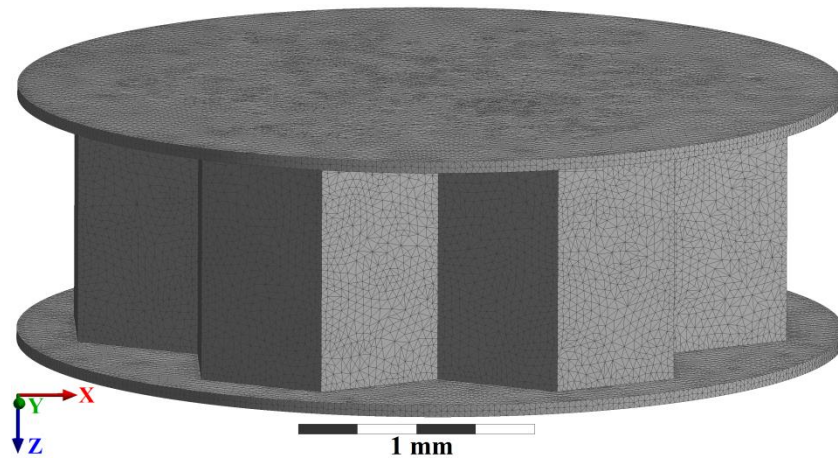


Abbildung VII: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von dem Hohlraummodell (ANSYS Workbench 16.1).

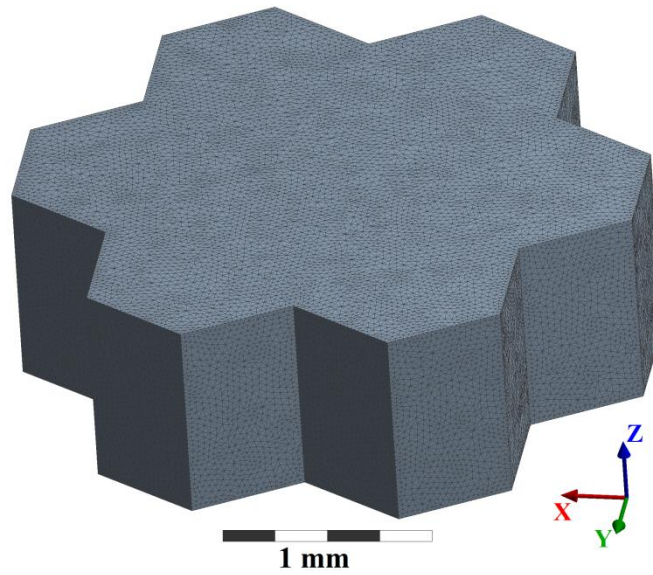


Abbildung VIII: Hinreichende Vernetzung des Diffusionsmodells von dem Hohlraummodell ohne Ausgangsgeometrie zum Vergleich mit der analytischen Rechnung (ANSYS Workbench 16.1).

b. Eigenschaften aller Vernetzungen

Tabelle I: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Diffusionsmodelle von *Actinocyclus subtilis* (links) und *Actinoptychus undulatus* (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp	Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	164009	282316	846948	SOLID87	1	11839	21290	63870	SOLID87
2	589895	958422	2875266	SOLID87	2	62756	100194	300582	SOLID87
3	671513	1100060	3300180	SOLID87	3	143364	225347	676041	SOLID87
4	3595241	5245135	15735405	SOLID87	4	217380	338096	1014288	SOLID87
5	5356204	7711216	23133648	SOLID87	5	593758	880287	2640861	SOLID87
6	8255861	11942052	35826156	SOLID87	6	3052639	4448374	13345122	SOLID87
7	9104458	13120443	39361329	SOLID87	7	3100214	4516335	13549005	SOLID87
8	10273670	14739233	44217699	SOLID87	8	3364213	4889733	14669199	SOLID87
9	11330600	16199090	48597270	SOLID87	9	3394708	4933306	14799918	SOLID87
10	12714766	18105454	54316362	SOLID87	10	5352959	7751730	23255190	SOLID87

Tabelle II: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Diffusionsmodelle von *Arachnoidiscus* sp. (links) und *Coscinodiscus* sp. (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp	Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	2587497	3826129	11478387	SOLID87	1	121928	216928	650784	SOLID87
2	3061163	4416667	13250001	SOLID87	2	1810016	2857049	8571147	SOLID87
3	4314441	6124274	18372822	SOLID87	3	3890299	5974798	17924394	SOLID87
4	5020281	7166624	21499872	SOLID87	4	4425547	6737264	20211792	SOLID87
5	5425879	7719071	23157213	SOLID87	5	4690160	7113361	21340083	SOLID87
6	6121223	8662524	25987572	SOLID87	6	8727648	12948310	38844930	SOLID87
					7	8883331	13177424	39532272	SOLID87

Tabelle III: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Diffusionsmodelle von *Thalassiosira eccentrica* (links) und der Stahlfeder (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp	Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	147707	247024	741072	SOLID87	1	6341	11282	33846	SOLID87
2	760985	1170027	3510081	SOLID87	2	415083	612763	1838289	SOLID87
3	1121030	1687136	5061408	SOLID87	3	1391637	2006234	6018702	SOLID87
4	2032090	3014135	9042405	SOLID87	4	1534468	2204130	6612390	SOLID87
5	4596700	6796684	20390052	SOLID87	5	1818830	2647168	7941504	SOLID87
6	5611551	8261258	24783774	SOLID87	6	2002595	2912768	8738304	SOLID87
7	6017072	8822278	26466834	SOLID87	7	2802802	4033276	12099828	SOLID87
8	6356869	9292752	27878256	SOLID87					

c. Koordinaten des Konzentrationspfades

Tabelle IV: Koordinaten der Punkte 1 und 2, zwischen denen in jedem Diffusionsmodell ein Pfad verläuft. Entlang dieses Pfades werden die Konzentrationen ausgegeben.

Diffusionsmodell	Vernetzungsstufe	Koordinate	Punkt 1 [m]	Punkt 2 [m]
<i>Actinocyclus subtilis</i>	6	x	0,001	0,001
		y	-0,00029	-0,00029
		z	0,00005	-0,00105
<i>Actinoptychus undulatus</i>	6	x	0,001	0,001
		y	-0,0003	-0,0003
		z	-0,00105	0,00005
<i>Arachnoidiscus</i> sp.	3	x	0,00052	0,00052
		y	0,00058	0,00058
		z	0,00005	-0,00105
<i>Coscinodiscus</i> sp.	5	x	0,00151	0,00151
		y	0,0006	0,0006
		z	0,00005	-0,00105
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	5	x	-0,0005	-0,0005
		y	0,00058	0,00058
		z	-0,00105	0,00005
Stahlfeder	3	x	0,001	0,001
		y	-0,0003	-0,0003
		z	0,00005	-0,00105
Hohlraummodell	-	x	0,001	0,001
		y	-0,0003	-0,0003
		z	-0,00105	0,00005

ii. Durchbiegung der Gesamtstruktur

a. Modelle hinreichender Vernetzung

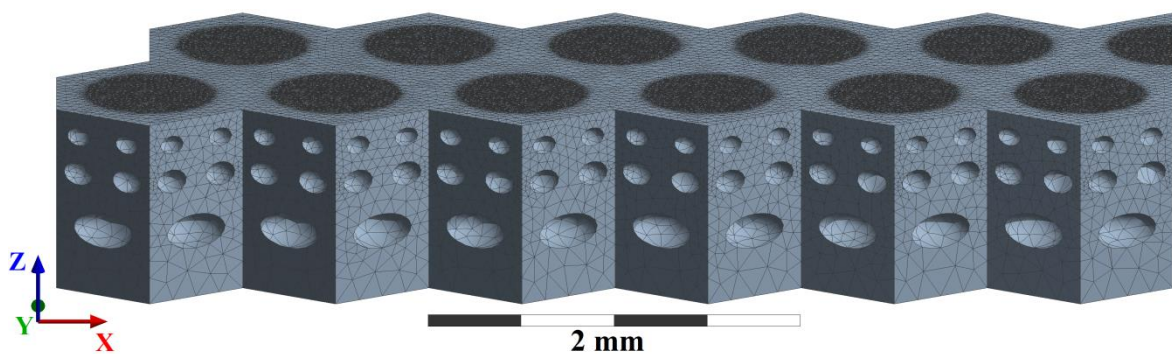


Abbildung IX: Hinreichende Vernetzung des Modells der Gesamtstruktur von *Actinocyclus subtilis* (ANSYS Workbench 16.1).

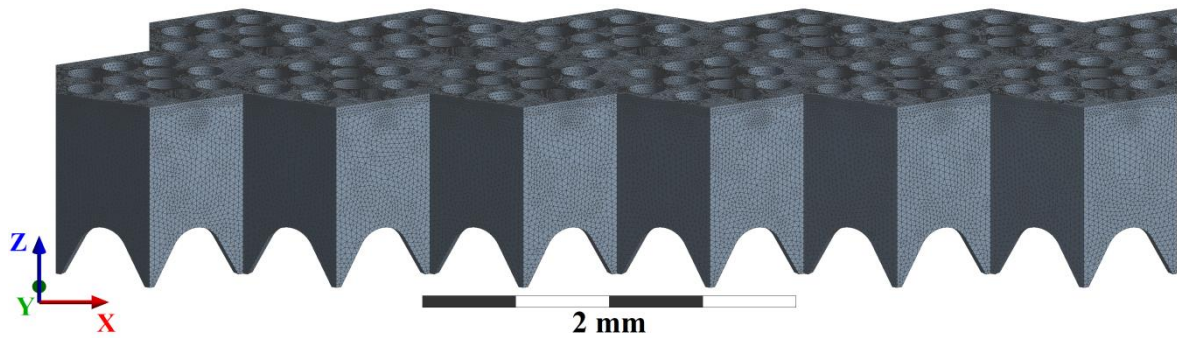


Abbildung X: Hinreichende Vernetzung des Modells der Gesamtstruktur von *Actinoptychus undulatus* (ANSYS Workbench 16.1).

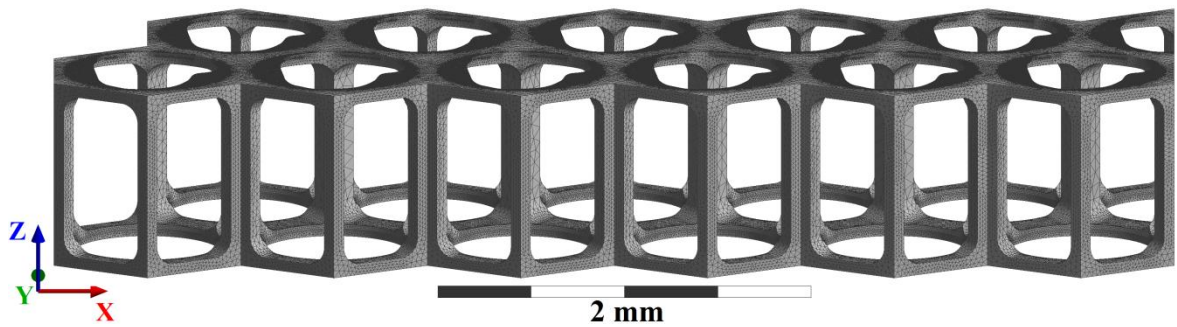


Abbildung XI: Hinreichende Vernetzung des Modells der Gesamtstruktur von *Arachnoidiscus* sp. (ANSYS Workbench 16.1).

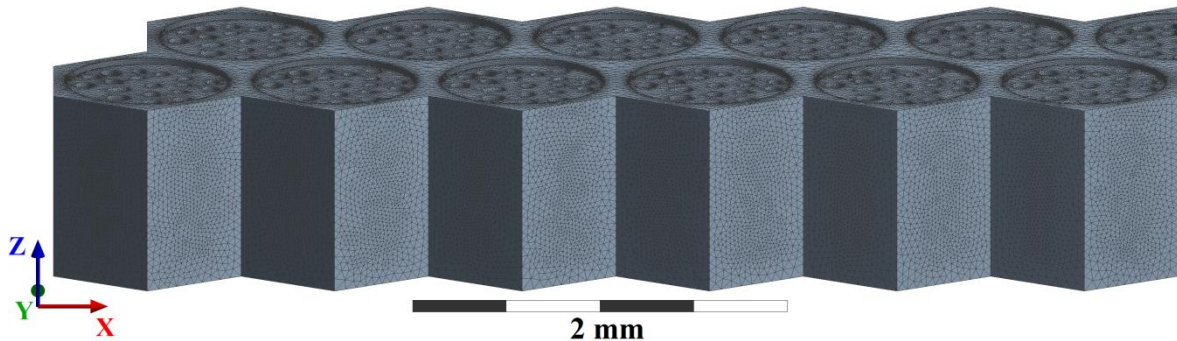


Abbildung XII: Hinreichende Vernetzung des Modells der Gesamtstruktur von *Coscinodiscus* sp. (ANSYS Workbench 16.1).

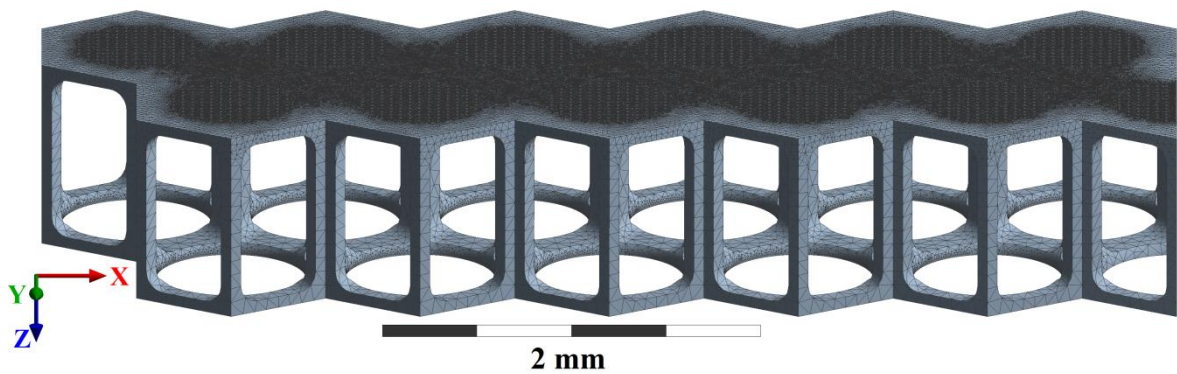


Abbildung XIII: Hinreichende Vernetzung des Modells der Gesamtstruktur von *Thalassiosira eccentrica* (ANSYS Workbench 16.1).

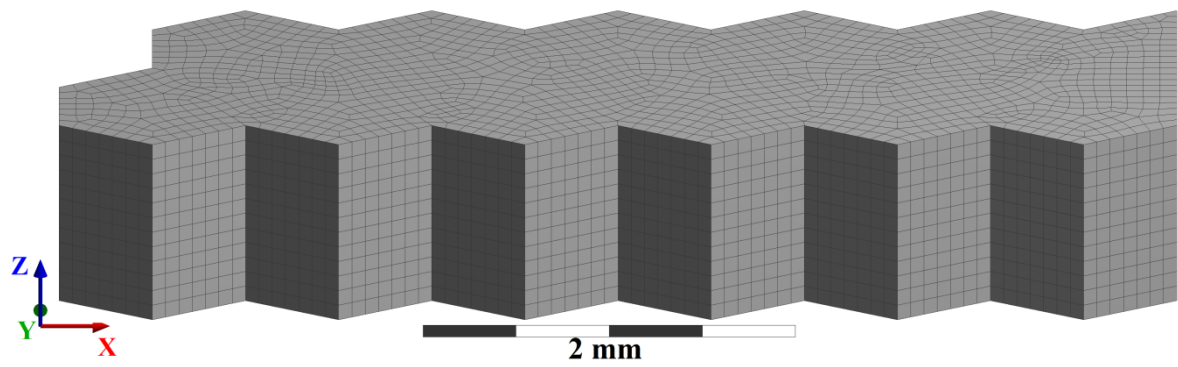


Abbildung XIV: Hinreichende Vernetzung des Modells der Gesamtstruktur von der gesinterten Struktur (ANSYS Workbench 16.1).

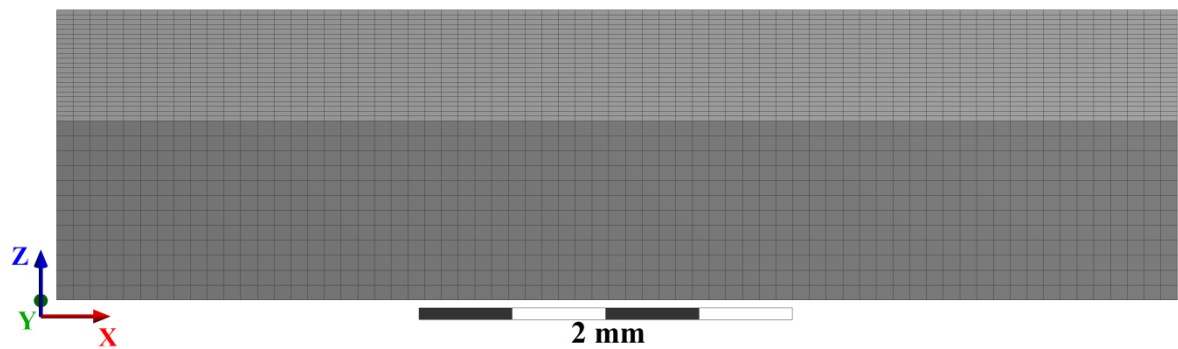


Abbildung XV: Hinreichende Vernetzung des Modells der Gesamtstruktur des Balkens zum Vergleich mit der analytischen Rechnung (ANSYS Workbench 16.1).

b. Eigenschaften aller Vernetzungen

Tabelle V: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Modelle der Gesamtstruktur von *Actinocyclus subtilis* (links) und *Actinoptychus undulatus* (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheits- grade	Element- typ	Stufe	Elemente	Knoten	Freiheits- grade	Element- typ
1	223304	408945	1226835	SOLID187	1	10064	21453	64359	SOLID187
2	973687	1598989	4796967	SOLID187	2	41077	82793	248379	SOLID187
3	2867935	4504722	13514166	SOLID187	3	67326	134315	402945	SOLID187
4	3229136	5068116	15204348	SOLID187	4	1706632	2504970	7514910	SOLID187
5	3834848	5988342	17965026	SOLID187	5	4072558	5930927	17792781	SOLID187
6	6430740	9755072	29265216	SOLID187	6	4771661	6914105	20742315	SOLID187
7	7140015	10808780	32426340	SOLID187	7	5840739	8416398	25249194	SOLID187
					8	6428751	9236114	27708342	SOLID187

Tabelle VI: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Modelle der Gesamtstruktur von *Arachnoidiscus* sp. (links) und *Coscinodiscus* sp. (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheits- grade	Element- typ	Stufe	Elemente	Knoten	Freiheits- grade	Element- typ
1	12266	26530	79590	SOLID187	1	209185	366770	1100310	SOLID187
2	84257	158397	475191	SOLID187	2	3014046	4677554	14032662	SOLID187
3	477070	781004	2343012	SOLID187	3	5494988	8342491	25027473	SOLID187
4	1701038	2645774	7937322	SOLID187	4	6747401	10254668	30764004	SOLID187
5	1775850	2759955	8279865	SOLID187	5	7193941	10892714	32678142	SOLID187
6	2560066	3871781	11615343	SOLID187	6	7668684	11566839	34700517	SOLID187
7	3053799	4565397	13696191	SOLID187	7	8191488	12305575	36916725	SOLID187

Tabelle VII: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Modelle der Gesamtstruktur von *Thalassiosira eccentrica* (links) und der gesinterten Struktur (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheits- grade	Element- typ	Stufe	Elemente	Knoten	Freiheits- grade	Element- typ
1	120364	237570	712710	SOLID187	1	3968	19223	57669	SOLID186
2	422342	858669	2576007	SOLID187	2	6606	30733	92199	SOLID186
3	749494	1495412	4486236	SOLID187	3	16884	75506	226518	SOLID186
4	795932	1588897	4766691	SOLID187	4	34530	150932	452796	SOLID186
5	3306709	4983132	14949396	SOLID187	5	89900	383232	1149696	SOLID186
6	3581866	5893924	17681772	SOLID187	6	170300	717857	2153571	SOLID186
7	3755436	6152506	18457518	SOLID187	7	406606	1690450	5071350	SOLID186
8	4192638	6800464	20401392	SOLID187	8	1328450	5452888	16358664	SOLID186

iii. Durchbiegung der Membran und Stützstruktur

a. Modelle hinreichender Vernetzung

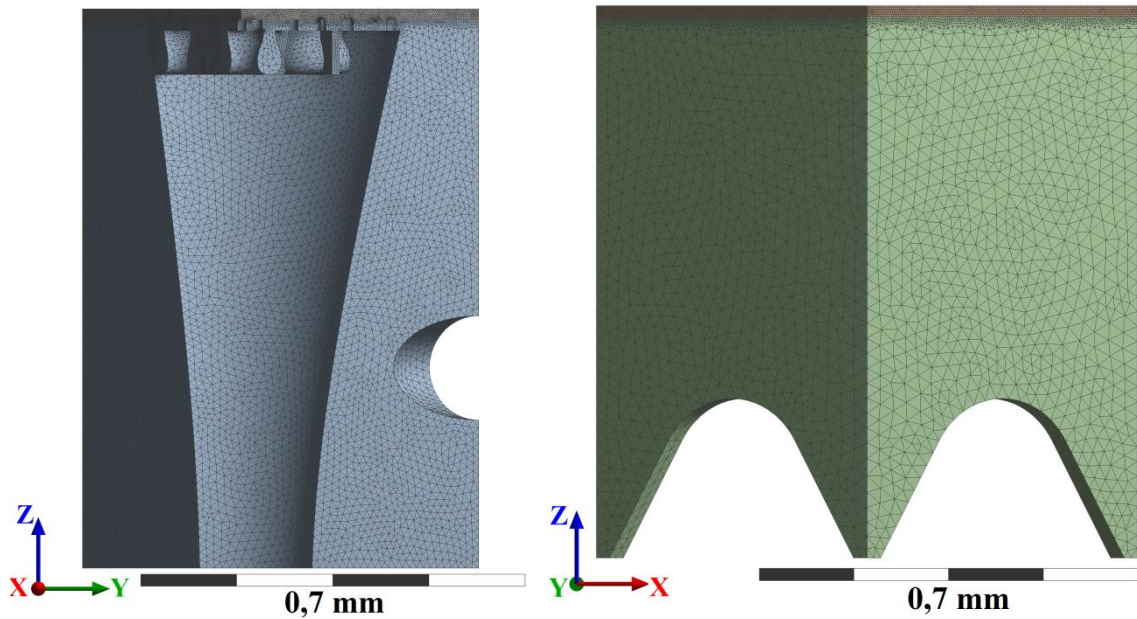


Abbildung XVI: Hinreichende Vernetzung der Modelle aus Struktur und Membran von *Actinocyclus subtilis* (links) und *Actinoptychus undulatus* (rechts) (ANSYS Workbench 16.1).

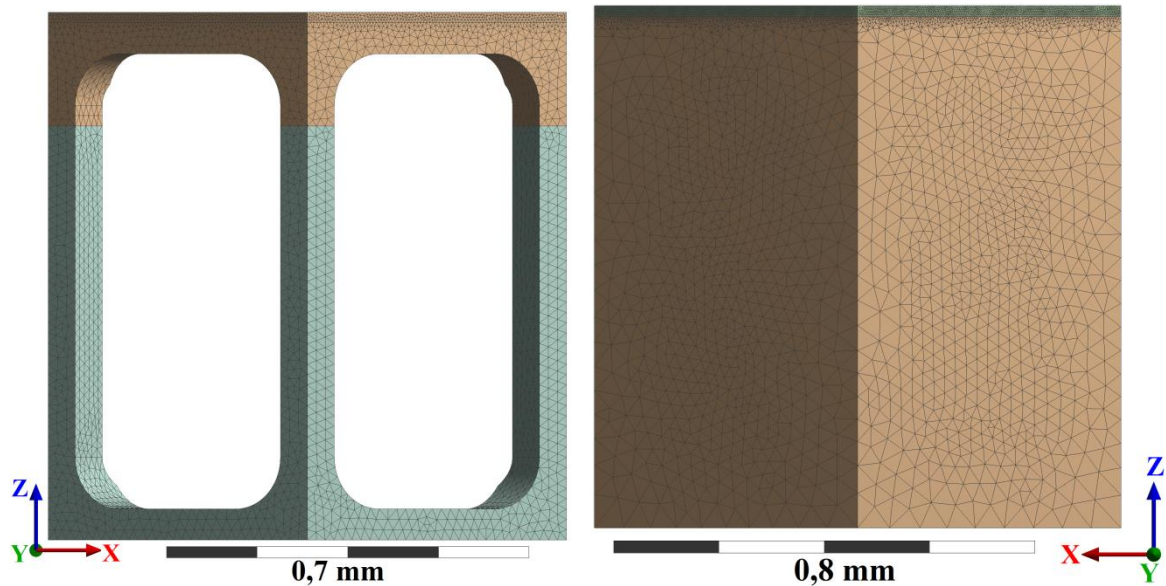


Abbildung XVII: Hinreichende Vernetzung der Modelle aus Struktur und Membran von *Arachnoidiscus sp.* (links) und *Coscinodiscus sp.* (rechts) (ANSYS Workbench 16.1).

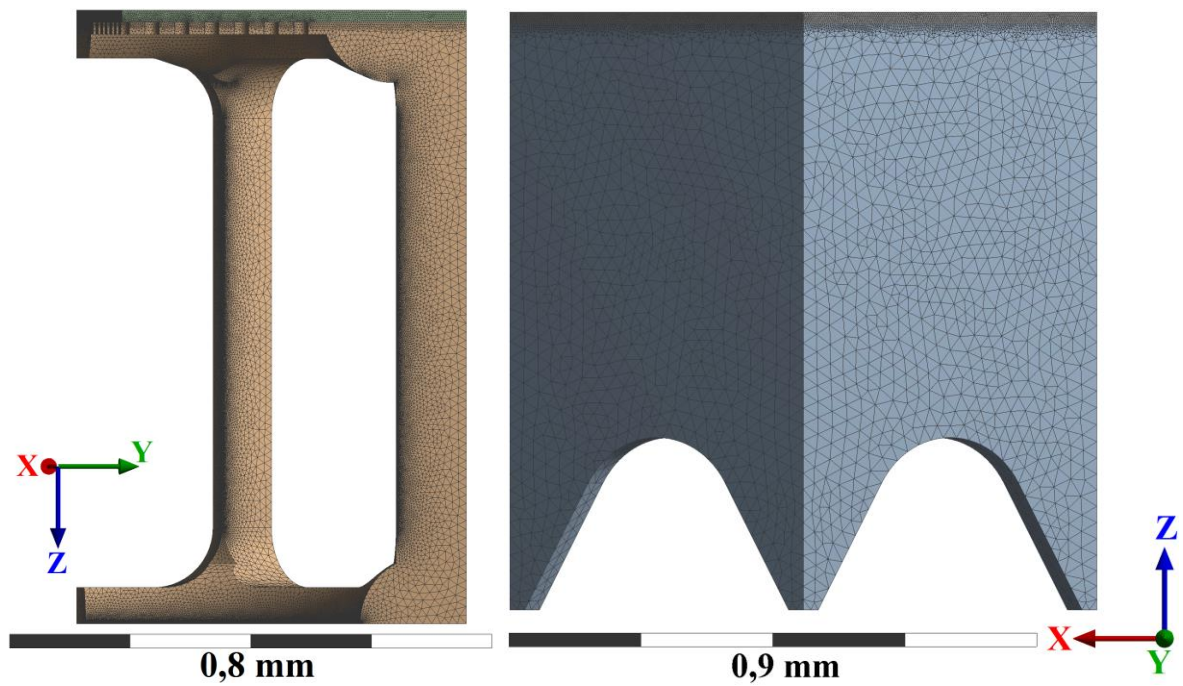


Abbildung XVIII: Hinreichende Vernetzung der Modelle aus Struktur und Membran von *Thalassiosira eccentrica* (links) und dem Modell zum Vergleich mit der Analytik (rechts) (ANSYS Workbench 16.1).

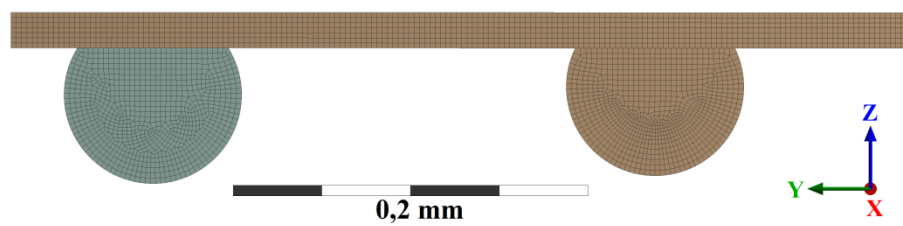


Abbildung XIX: Hinreichende Vernetzung des Modells aus Struktur und Membran von der Stahlfeder (ANSYS Workbench 16.1).

b. Eigenschaften aller Vernetzungen

Tabelle VIII: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Modelle aus Struktur und Membran von *Actinocyclus subtilis* (links) und *Actinoptychus undulatus* (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	81781	126932	380796	SOLID187
2	123312	188557	565671	SOLID187
3	274799	411749	1235247	SOLID187
4	512237	750341	2251023	SOLID187
5	718815	1053138	3159414	SOLID187
6	829433	1214969	3644907	SOLID187
7	1590138	2266476	6799428	SOLID187
8	2337488	3296630	9889890	SOLID187
9	4544165	6313113	18939339	SOLID187

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	184409	283135	849405	SOLID187
2	2496830	3549890	10649670	SOLID187
3	5694925	8090965	24272895	SOLID187
4	5736533	8151148	24453444	SOLID187
5	6055898	8590898	25772694	SOLID187

Tabelle IX: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Modelle aus Struktur und Membran von *Arachnoidiscus* sp. (links) und *Coscinodiscus* sp. (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	14256	26820	80460	SOLID187
2	32225	59920	179760	SOLID187
3	136800	219386	658158	SOLID187
4	309665	470185	1410555	SOLID187
5	875124	1274932	3824796	SOLID187
6	1887209	2690000	8070000	SOLID187
7	2185892	3121749	9365247	SOLID187
8	2203882	3148032	9444096	SOLID187

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	21556	38108	114324	SOLID187
2	31776	53568	160704	SOLID187
3	48237	77765	233295	SOLID187
4	242060	361785	1085355	SOLID187
5	1140080	1633177	4899531	SOLID187
6	3391162	4829023	14487069	SOLID187
7	6438482	9127558	27382674	SOLID187
8	6607474	9364142	28092426	SOLID187
9	6913403	9792943	29378829	SOLID187

Tabelle X: Auflistung der Anzahl an Elementen, Knoten und Freiheitsgraden, sowie der Elementtypen für die Modelle aus Struktur und Membran von *Thalassiosira eccentrica* (links) und der Stahlfeder (rechts) bei allen Vernetzungsstufen der Gitterstudie. Die hervorgehobene Stufe stellt jeweils die hinreichende Vernetzung dar.

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	44721	76758	230274	SOLID187
2	65665	108265	324795	SOLID187
3	198602	311603	934809	SOLID187
4	491924	741250	2223750	SOLID187
5	535100	807304	2421912	SOLID187
6	593479	892875	2678625	SOLID187
7	1009751	1483312	4449936	SOLID187
8	1283510	1864724	5594172	SOLID187
9	2090454	2979093	8937279	SOLID187
10	2695895	3840781	11522343	SOLID187
11	2851643	4053752	12161256	SOLID187

Stufe	Elemente	Knoten	Freiheitsgrade	Elementtyp
1	10191	21918	65754	SOLID186
2	32664	111701	335103	SOLID186
3	173631	318894	956682	SOLID186
4	207250	912389	2737167	SOLID186
5	217875	961553	2884659	SOLID186
6	510352	2189403	6568209	SOLID186
7	797400	3400220	10200660	SOLID186
8	966416	4095911	12287733	SOLID186
9	1327872	5586895	16760685	SOLID186

II. Ergebnisse

i. Konstruktion

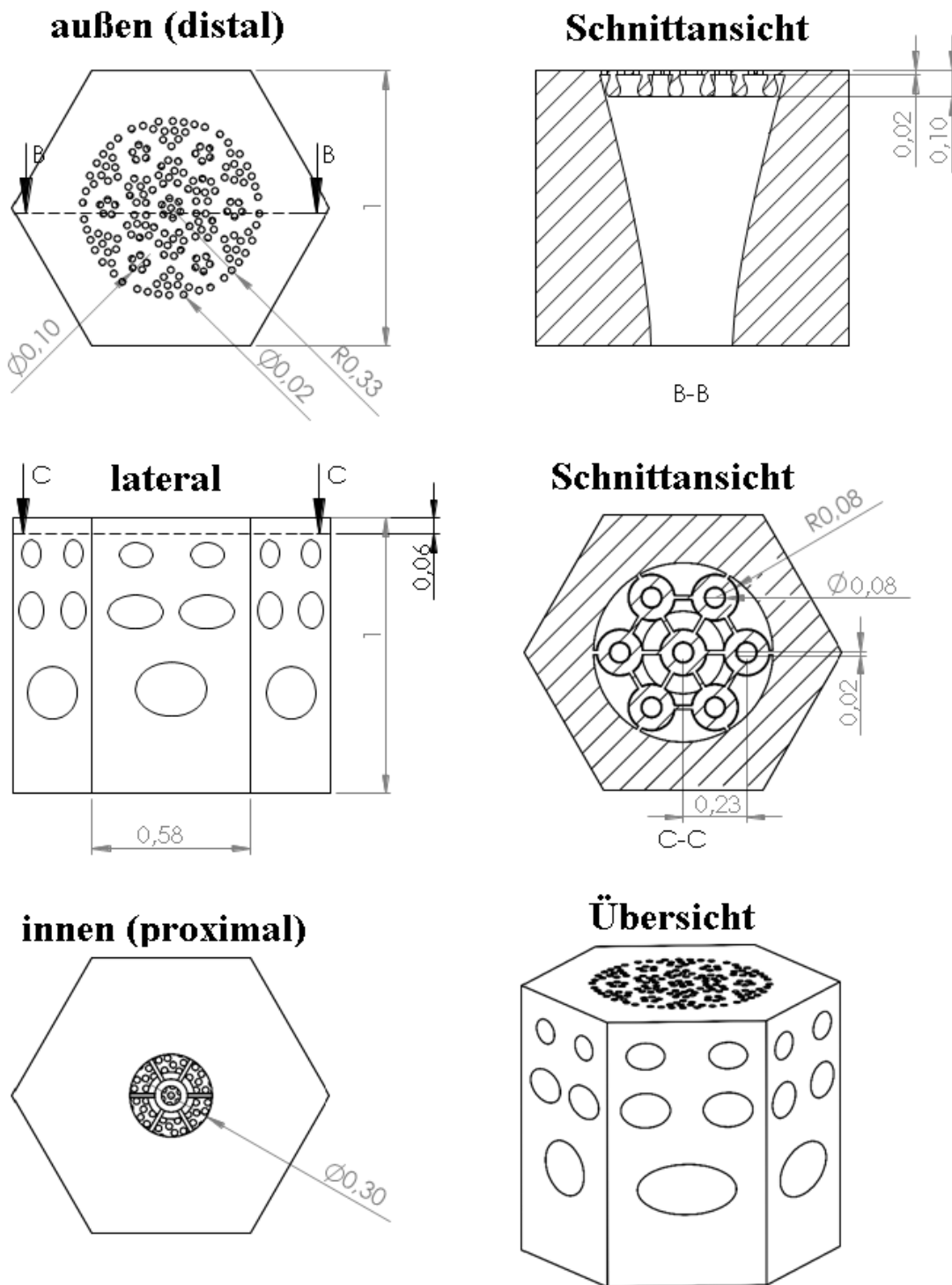


Abbildung XX: Detailansichten mit Maßangaben in mm der mit SolidWorks 2008 konstruierten Areolenstruktur von *Actinocyclus subtilis*.

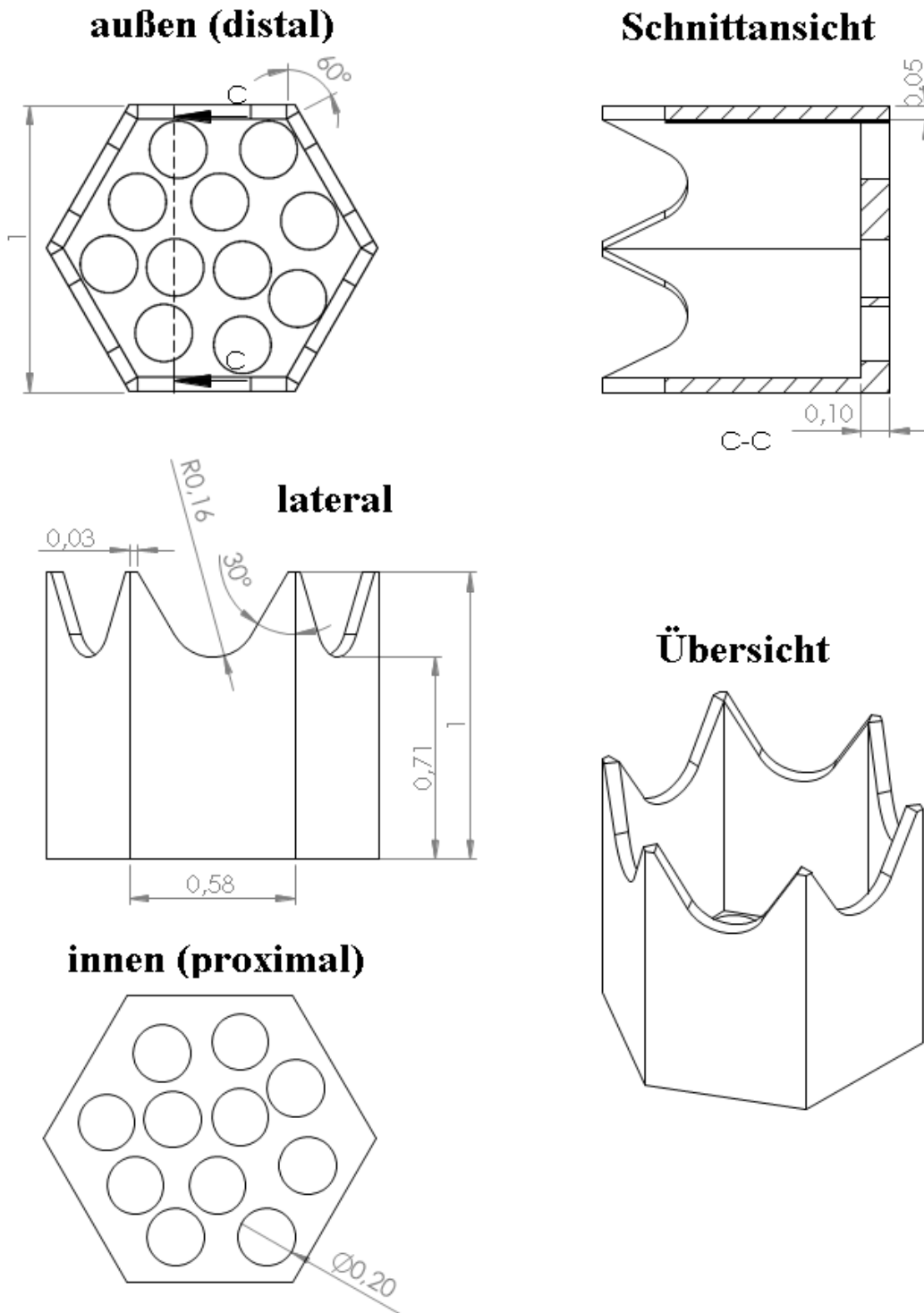


Abbildung XXI: Detailansichten mit Maßangaben in mm der mit SolidWorks 2008 konstruierten Areolenstruktur von *Actinoptychus undulatus*.

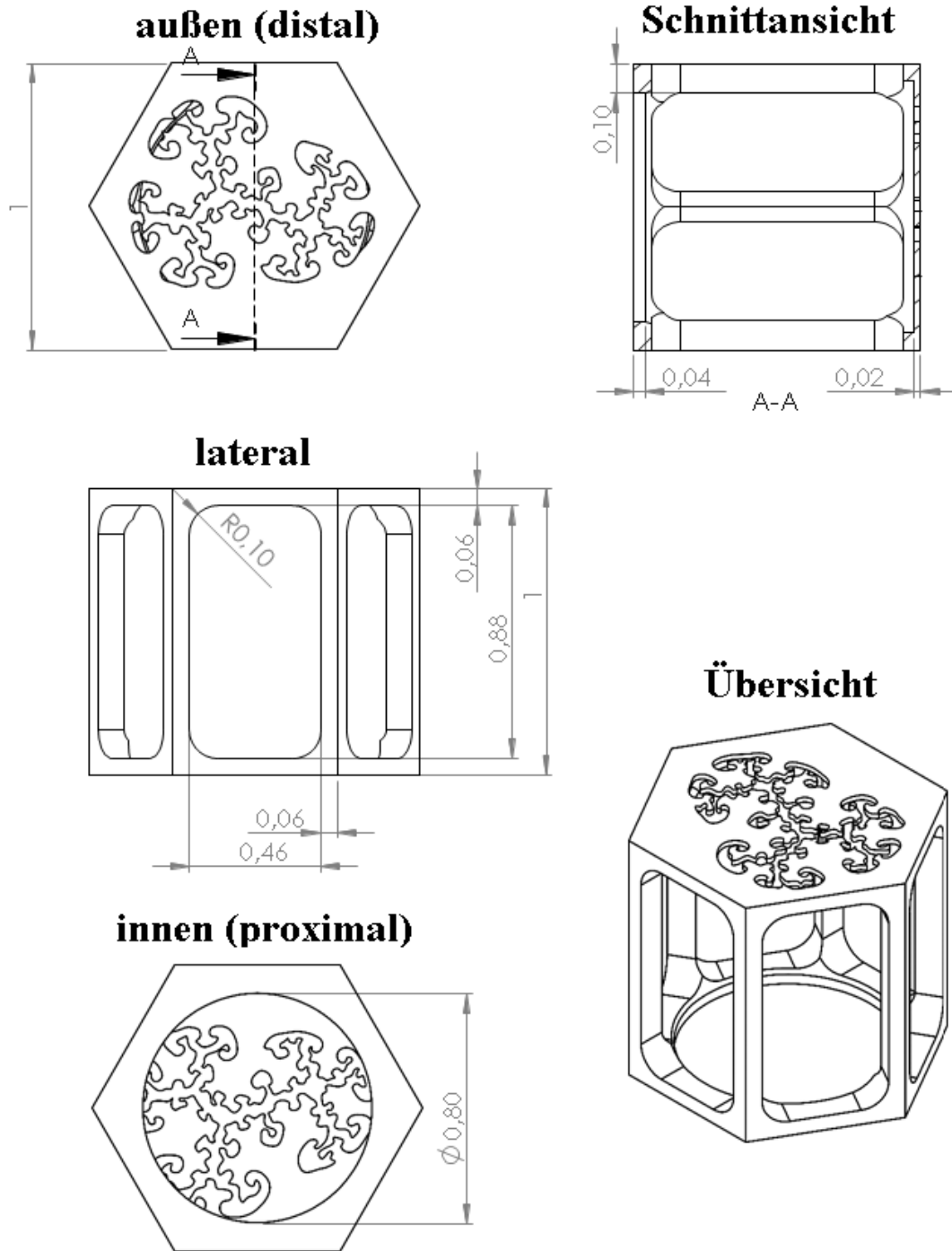


Abbildung XXII: Detailansichten mit Maßangaben in mm der mit SolidWorks 2008 konstruierten Areolenstruktur von *Arachnoidiscus* sp.

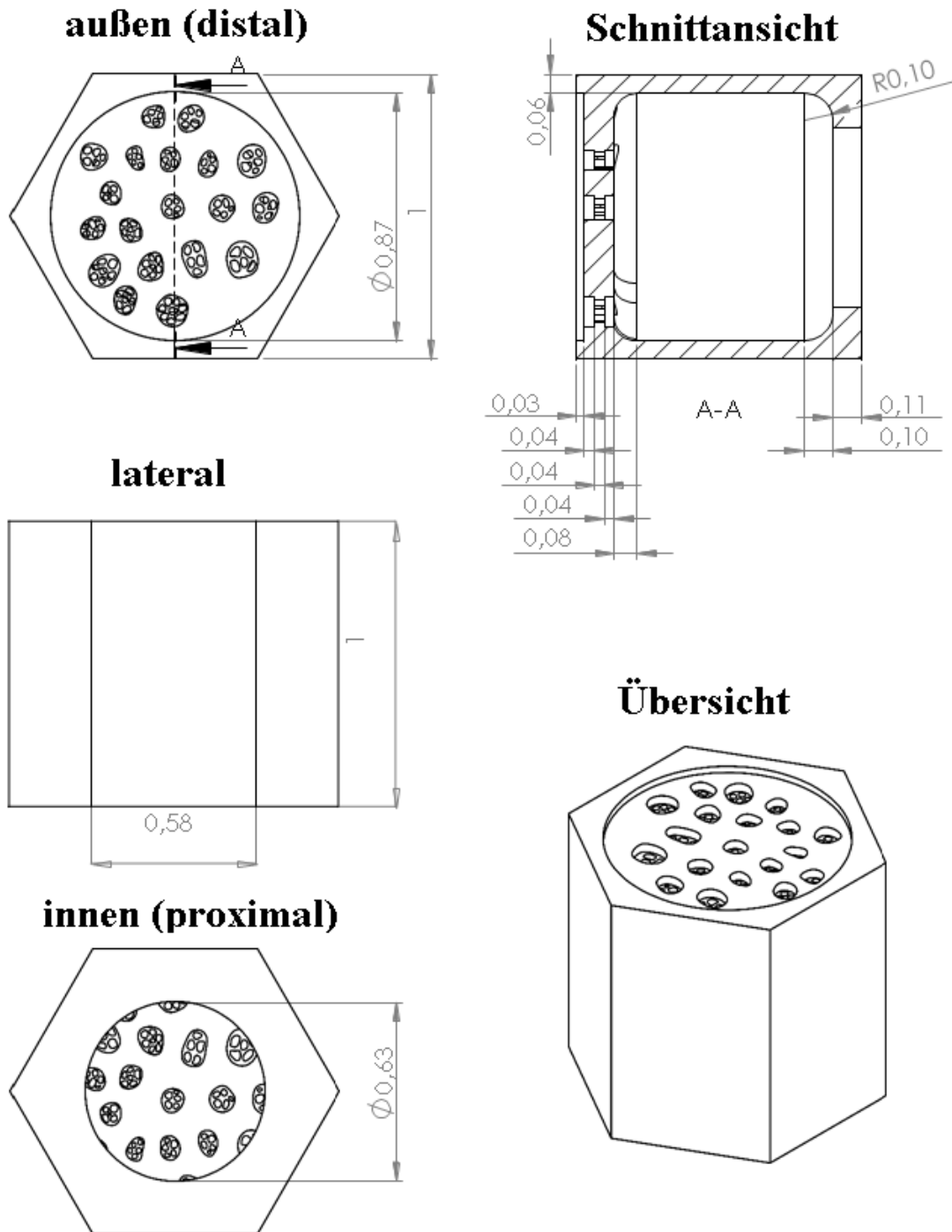


Abbildung XXIII: Detailansichten mit Maßangaben in mm der mit SolidWorks 2008 konstruierten Areolenstruktur von *Coscinodiscus* sp.

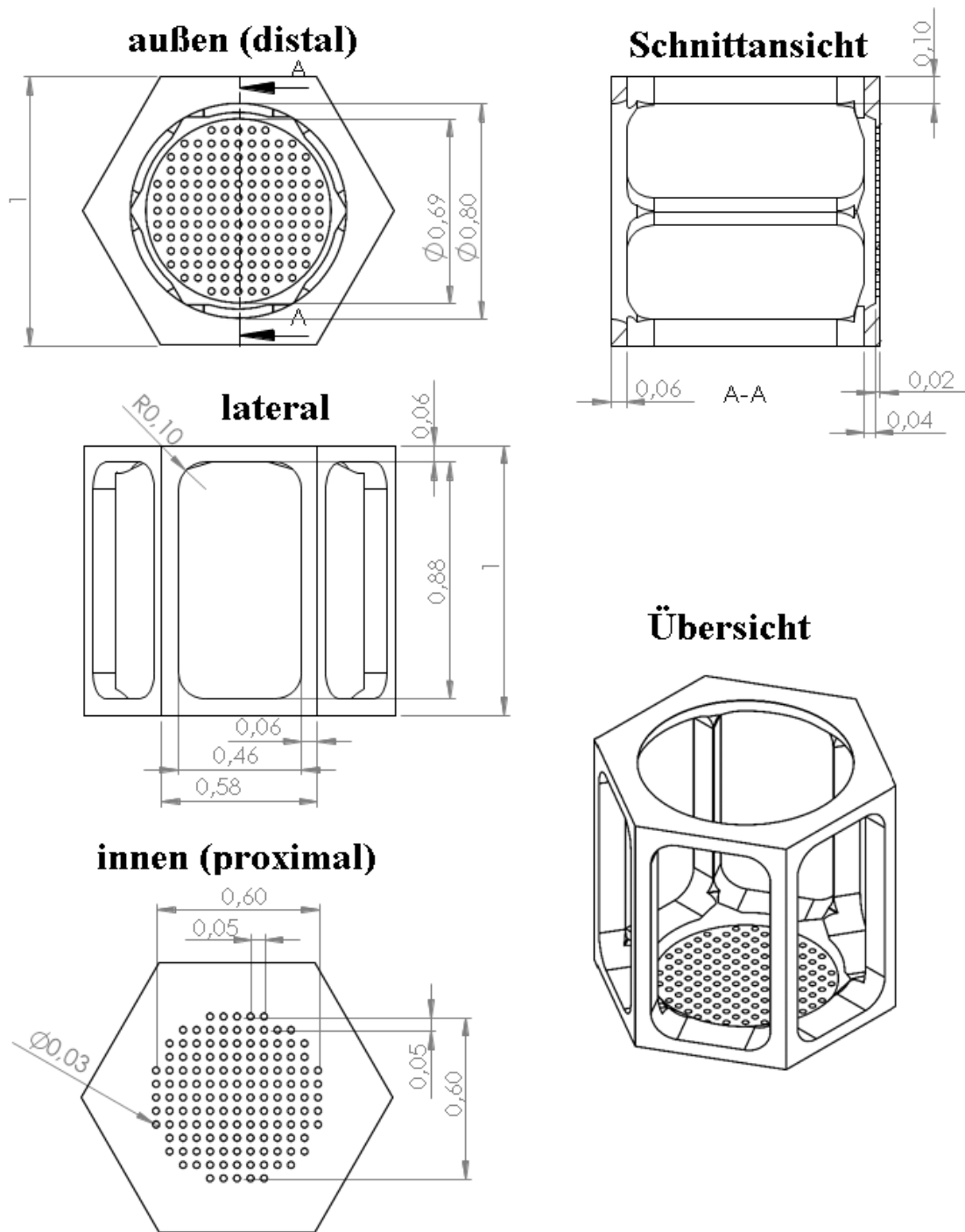


Abbildung XXIV: Detailansichten mit Maßangaben in mm der mit SolidWorks 2008 konstruierten Areolenstruktur von *Thalassiosira eccentrica*.

ii. Diffusion

a. Instationäre Rechnungen

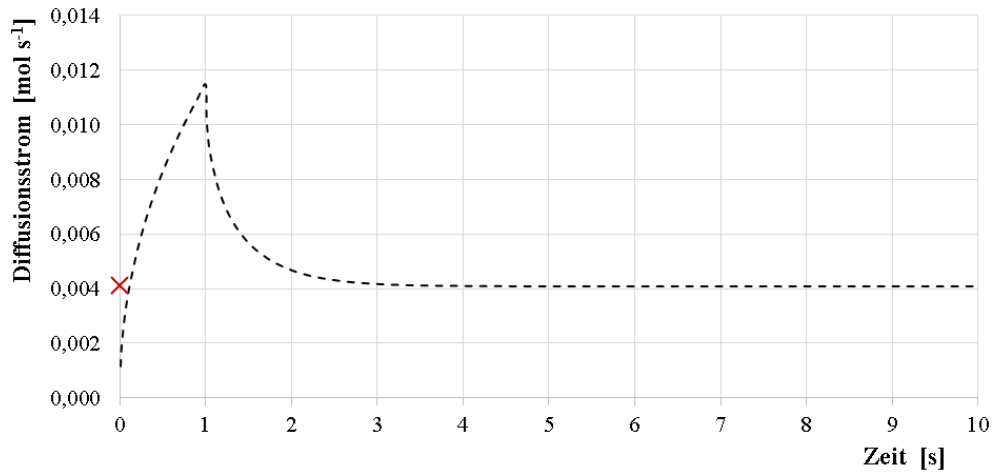


Abbildung XXV: Diffusionsstrom in mol s⁻¹ an der unteren Ausgangsstruktur in Abhängigkeit von der Zeit in s von *Actinoptychus undulatus* bei einer instationären Rechnung. Der Diffusionsstrom erreicht einen stationären Wert, welcher dem Ergebnis der stationären Lösung (rotes Kreuz) bei gleicher Vernetzung entspricht.

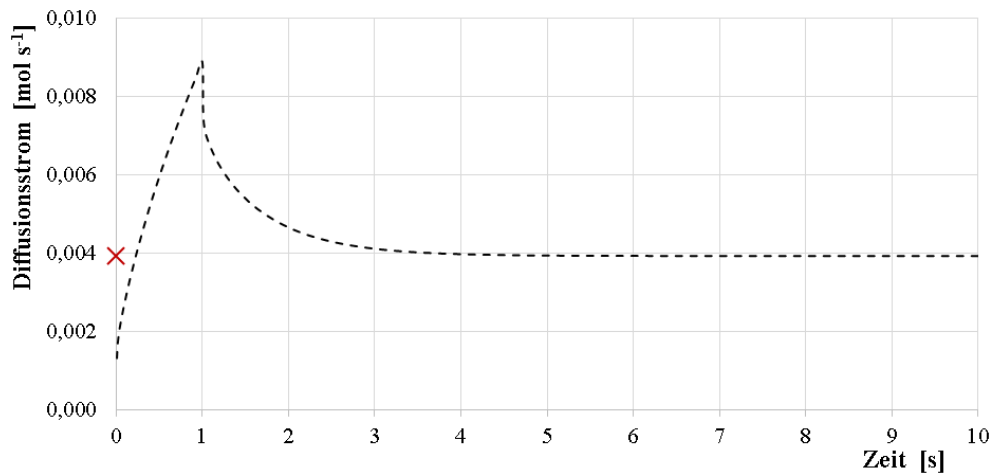


Abbildung XXVI: Diffusionsstrom in mol s⁻¹ an der unteren Ausgangsstruktur in Abhängigkeit von der Zeit in s von *Arachnoidiscus* sp. bei einer instationären Rechnung. Der Diffusionsstrom erreicht einen stationären Wert, welcher dem Ergebnis der stationären Lösung (rotes Kreuz) bei gleicher Vernetzung entspricht.

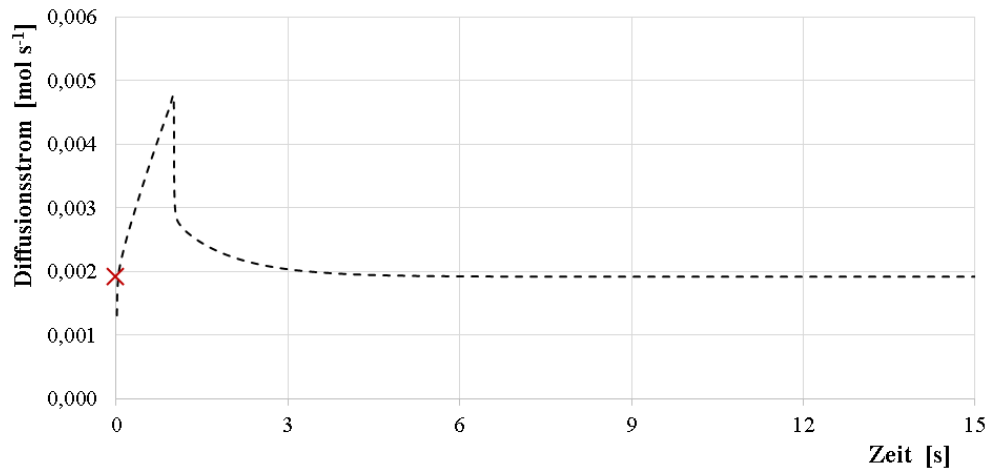


Abbildung XXVII: Diffusionsstrom in mol s⁻¹ an der unteren Ausgangsstruktur in Abhängigkeit von der Zeit in s von *Coscinodiscus sp.* bei einer instationären Rechnung. Der Diffusionsstrom erreicht einen stationären Wert, welcher dem Ergebnis der stationären Lösung (rotes Kreuz) bei gleicher Vernetzung entspricht.

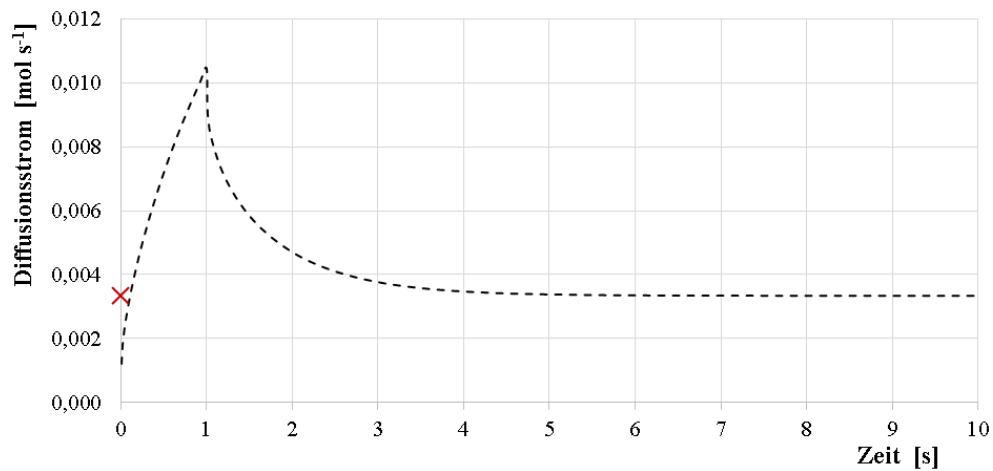


Abbildung XXVIII: Diffusionsstrom in mol s⁻¹ an der unteren Ausgangsstruktur in Abhängigkeit von der Zeit in s von *Thalassiosira eccentrica* bei einer instationären Rechnung. Der Diffusionsstrom erreicht einen stationären Wert, welcher dem Ergebnis der stationären Lösung (rotes Kreuz) bei gleicher Vernetzung entspricht.

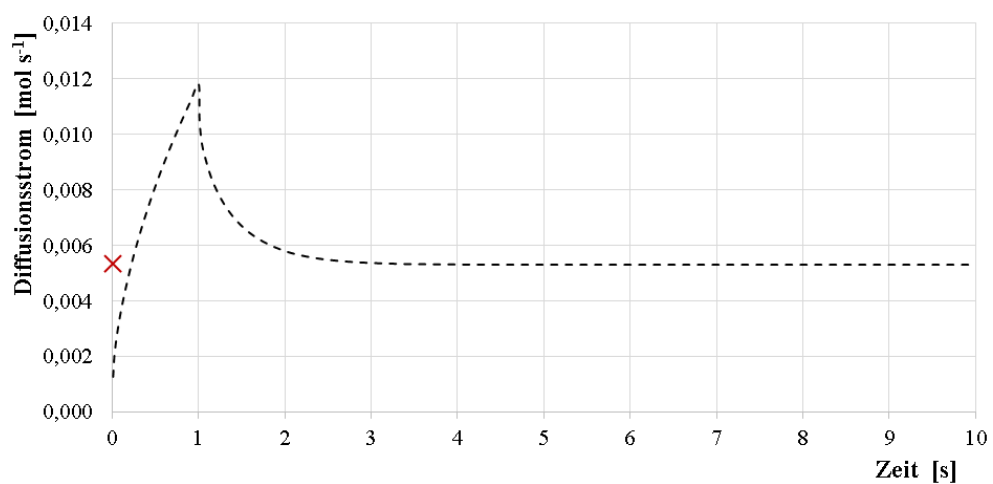


Abbildung XXIX: Diffusionsstrom in mol s⁻¹ an der unteren Ausgangsstruktur in Abhängigkeit von der Zeit in s von der Stahlfeder bei einer instationären Rechnung. Der Diffusionsstrom erreicht einen stationären Wert, welcher dem Ergebnis der stationären Lösung (rotes Kreuz) bei gleicher Vernetzung entspricht.

b. Gitterstudie

Tabelle XI: Diffusionsströme in mol s⁻¹ für die verschiedenen Diffusionsmodelle bei unterschiedlichen Vernetzungsstufen. Die hinreichende Vernetzung ist jeweils hervorgehoben. Für das Hohlraummodell und das Hohlraummodell ohne Ausgangsstruktur erfolgt keine Gitterstudie.

Stufe	<i>Actino-cyclus subtilis</i>	<i>Actino-ptychus undulatus</i>	<i>Arach-noidiscus sp.</i>	<i>Coscino-discus sp.</i>	<i>Thalassio-sira eccentrica</i>	Stahl-feder	Hohlraum-modell	Hohlraummodell ohne Ausgangs-struktur
1	0,000815	0,004088	0,003920	0,001947	0,003340	0,005304	0,005526	0,006062
2	0,000808	0,004053	0,003921	0,001917	0,003297	0,005261	-	-
3	0,000804	0,004042	0,003918	0,001914	0,003283	0,005260	-	-
4	0,000805	0,004038	0,003918	0,001914	0,003283	0,005260	-	-
5	0,000805	0,004034	0,003918	0,001914	0,003274	0,005260	-	-
6	0,000804	0,004029	0,003918	0,001915	0,003274	0,005260	-	-
7	0,000804	0,004028	-	0,001915	0,003274	0,005260	-	-
8	0,000804	0,004028	-	-	0,003273	-	-	-
9	0,000804	0,004028	-	-	-	-	-	-
10	0,000804	0,004028	-	-	-	-	-	-

c. Diffusionsstromdichten

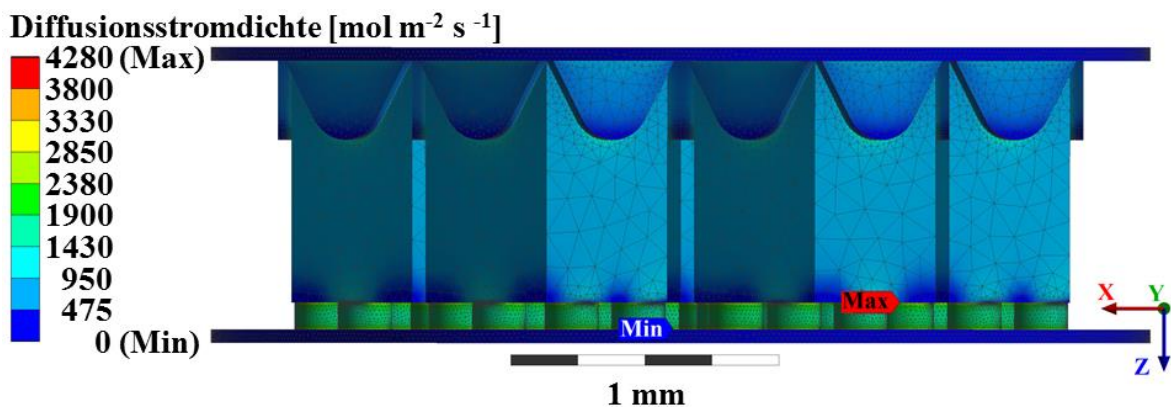


Abbildung XXX: Diffusionsstromdichte in mol m⁻² s⁻¹ im Modell von *Actinoptychus undulatus* bei hinreichender Vernetzung. Der Maximalwert (Max) von 4280 mol m⁻² s⁻¹ tritt am Übergang von dem Areolenraum in die Porenstruktur auf, der Minimalwert (Min) von 0 mol m⁻² s⁻¹ auf der Fläche der Ausgangsgeometrie (ANSYS Workbench 16.1).

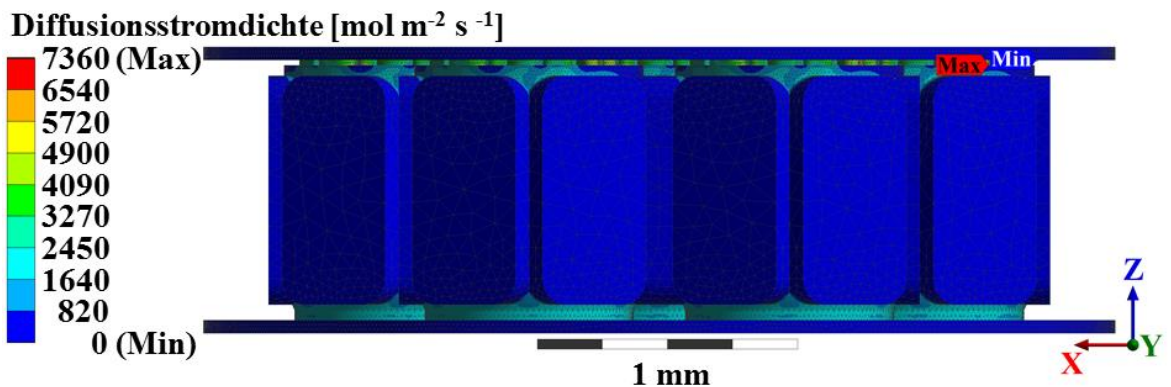


Abbildung XXXI: Diffusionsstromdichte in mol m⁻² s⁻¹ im Modell von *Arachnoidiscus sp.* bei hinreichender Vernetzung. Der Maximalwert (Max) von 7360 mol m⁻² s⁻¹ tritt am Übergang von der bäumchenartigen Porenstruktur in den Areolenraum auf, der Minimalwert (Min) von 0 mol m⁻² s⁻¹ auf der Fläche der Ausgangsgeometrie (ANSYS Workbench 16.1).

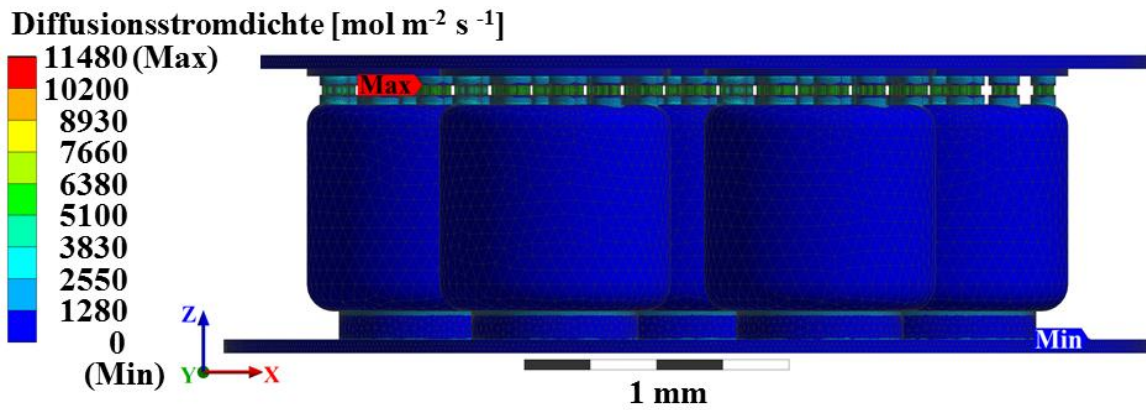


Abbildung XXXII: Diffusionsstromdichte in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im Modell von *Coscinodiscus* sp. bei hinreichender Vernetzung. Der Maximalwert (Max) von $11480 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tritt am Übergang von der Cribrumstruktur in die Poren des Cribellums auf, der Minimalwert (Min) von $0 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf der Fläche der Ausgangsgeometrie (ANSYS Workbench 16.1).

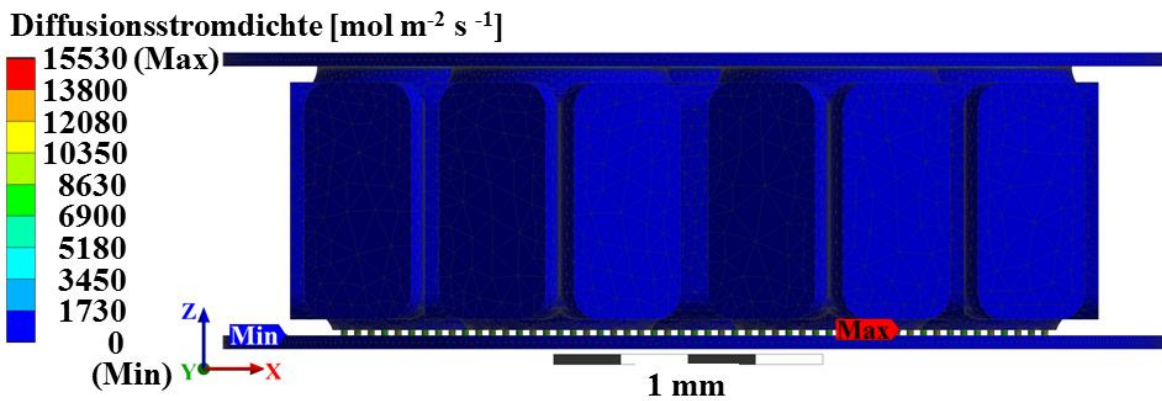


Abbildung XXXIII: Diffusionsstromdichte in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im Modell von *Thalassiosira eccentrica* bei hinreichender Vernetzung. Der Maximalwert (Max) von $15530 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tritt am Übergang von dem Areolenraum in die Porenstruktur auf, der Minimalwert (Min) von $0 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf der Fläche der Ausgangsgeometrie (ANSYS Workbench 16.1).

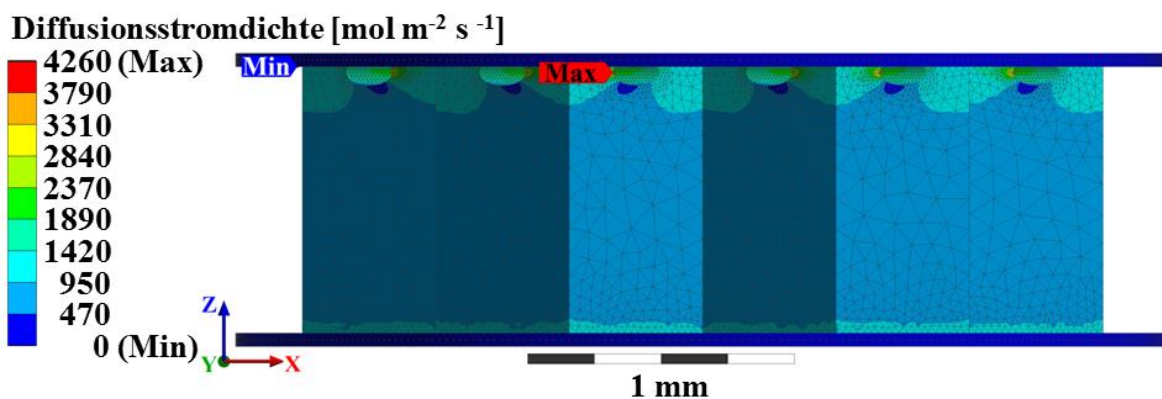


Abbildung XXXIV: Diffusionsstromdichte in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im Modell von der Stahlfeder bei hinreichender Vernetzung. Der Maximalwert (Max) von $4260 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tritt im Bereich der Federdrähte auf, der Minimalwert (Min) von $0 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf der Fläche der Ausgangsgeometrie (ANSYS Workbench 16.1).

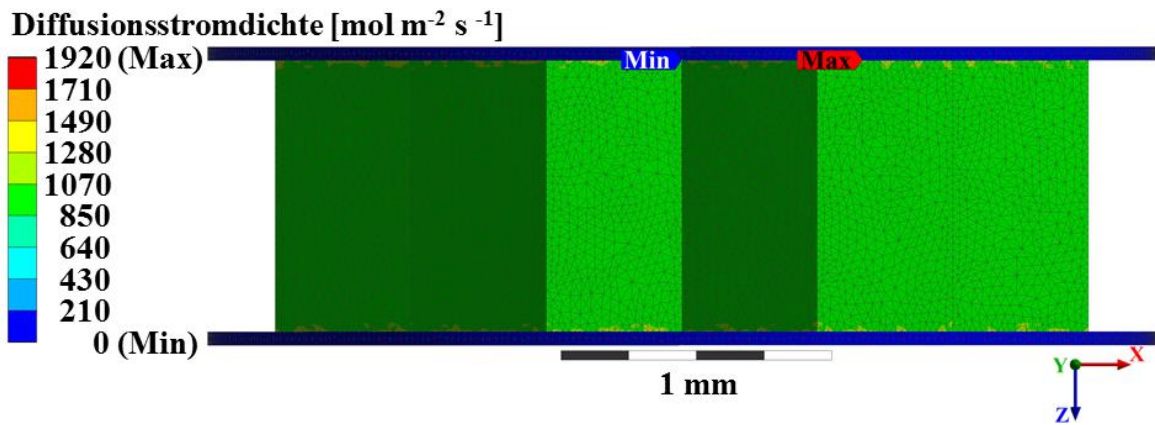


Abbildung XXXV: Diffusionsstromdichte in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im Modell von dem Hohlraummodell. Der Maximalwert (Max) von $1920 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tritt am Übergang von der Ausgangsgeometrie in die Wabe auf, der Minimalwert (Min) von $0 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf der Fläche der Ausgangsgeometrie (ANSYS Workbench 16.1).

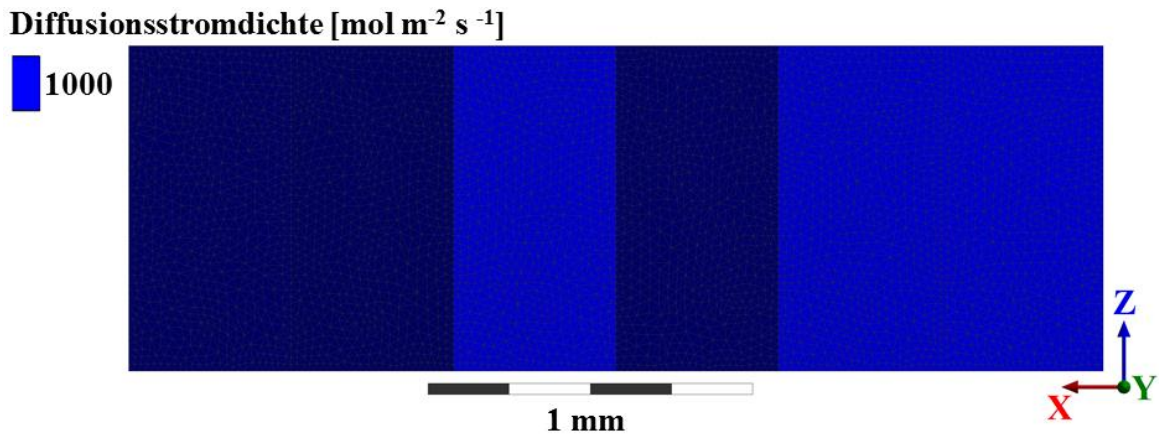


Abbildung XXXVI: Diffusionsstromdichte in $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im Modell von dem Hohlraummodell ohne Ausgangsgeometrie. Der Wert ist über der Ausdehnung des Körpers konstant (ANSYS Workbench 16.1).

iii. Durchbiegung der Gesamtstruktur

a. Gitterstudie

Tabelle XII: Maximale Durchbiegungen in mm für die Modelle der Gesamtstruktur bei unterschiedlichen Vernetzungsstufen. Die hinreichende Vernetzung ist jeweils hervorgehoben. Für das Balkenmodell erfolgt keine Gitterstudie.

Stufe	<i>Actinocyclus subtilis</i>	<i>Actinoptychus undulatus</i>	<i>Arachnoidiscus sp.</i>	<i>Coscinodiscus sp.</i>	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	Gesinterte Struktur	Balken
1	0,04782	0,51542	0,81172	0,08846	0,80733	0,12097	0,13853
2	0,04836	0,58407	0,85392	0,09408	0,83099	0,12109	-
3	0,04930	0,60092	0,85882	0,09418	0,83313	0,12126	-
4	0,04930	0,61863	0,86233	0,09418	0,83880	0,12137	-
5	0,04941	0,62645	0,86233	0,09418	0,84258	0,12147	-
6	0,04946	0,62651	0,86259	0,09418	0,84148	0,12151	-
7	0,04947	0,62663	0,86261	0,09419	0,84149	0,12155	-
8	-	0,62674	-	-	0,84154	0,12160	-

b. Durchbiegungen der Modelle

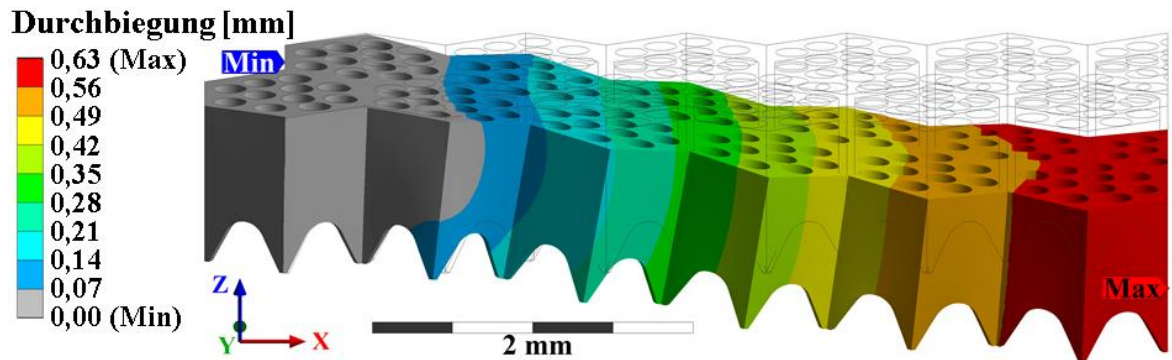


Abbildung XXXVII: Maßstabsgetreue Durchbiegung in mm der Gesamtstruktur von *Actinoptychus undulatus* bei hinreichender Vernetzung. In grau ist die unverformte Struktur skizziert. Auf die Darstellung der Elemente wird zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet (ANSYS Workbench 16.1).

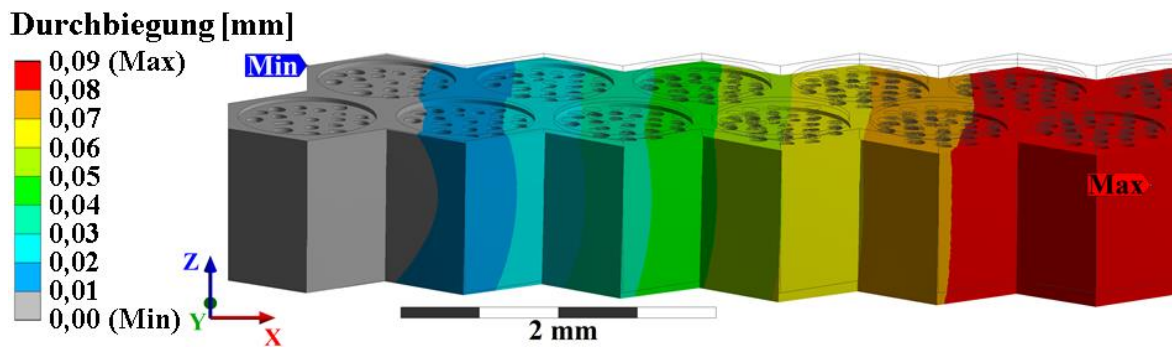


Abbildung XXXVIII: Maßstabsgetreue Durchbiegung in mm der Gesamtstruktur von *Coscinodiscus* sp. bei hinreichender Vernetzung. In grau ist die unverformte Struktur skizziert. Auf die Darstellung der Elemente wird zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet (ANSYS Workbench 16.1).

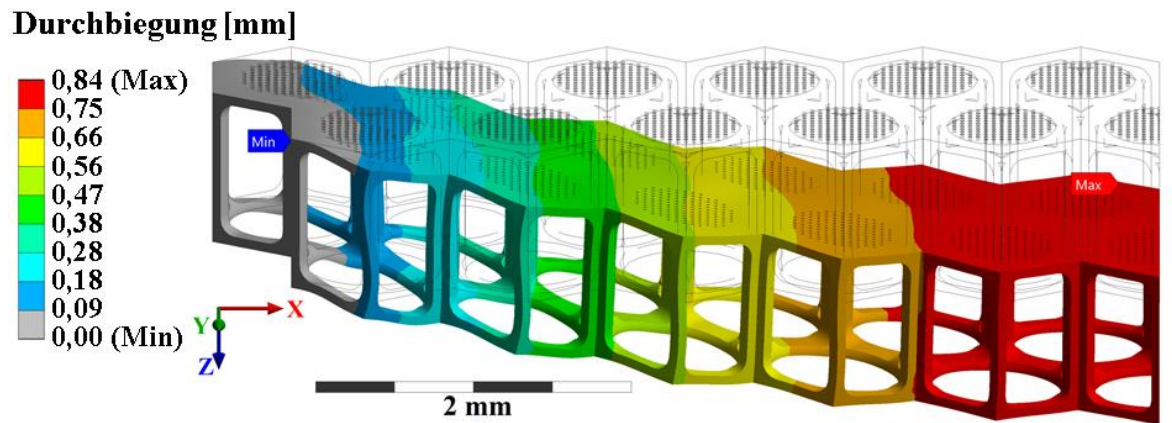


Abbildung XXXIX: Maßstabsgetreue Durchbiegung in mm der Gesamtstruktur von *Thalassiosira eccentrica* bei hinreichender Vernetzung. In grau ist die unverformte Struktur skizziert. Auf die Darstellung der Elemente wird zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet (ANSYS Workbench 16.1).

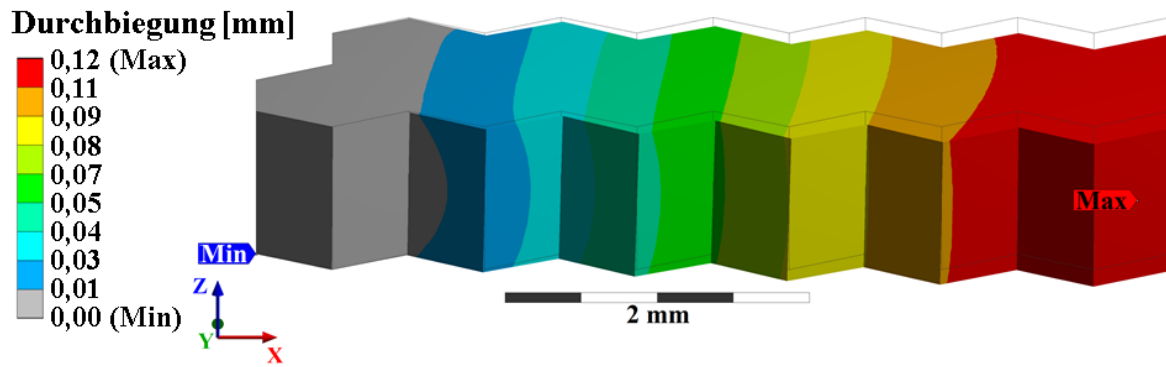


Abbildung XL: Maßstabsgetreue Durchbiegung in mm der Gesamtstruktur von der gesinterten Struktur bei hinreichender Vernetzung. In grau ist die unverformte Struktur skizziert. Auf die Darstellung der Elemente wird zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet (ANSYS Workbench 16.1).

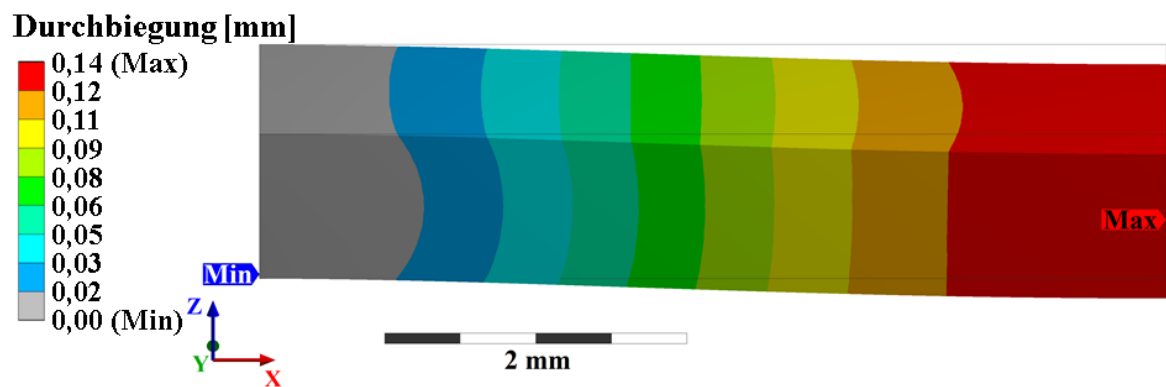


Abbildung XLI: Maßstabsgetreue Durchbiegung in mm der des Balkens zum Vergleich mit der analytischen Rechnung. In grau ist die unverformte Struktur skizziert. Auf die Darstellung der Elemente wird zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet (ANSYS Workbench 16.1).

c. Analytische Rechnung

Tabelle XIII: Auflistung der Parameter eines beidseitig eingespannten und mit einem Flächendruck belasteten Balkens zur Ermittlung der maximalen Durchbiegung, die gerundet 0,13 mm beträgt.

Parameter	Einheit	Wert
Flächendruck p	MPa	10,00
Fläche A_B	mm ²	24,25
E-Modul E	GPa	50,04
Länge des Balkens	mm	12,00
x-Wert der maximalen Durchbiegung	mm	6,00
Breite des Balkens	mm	2,02
Höhe des Balkens	mm	1,00
Flächenträgheitsmoment I_y	mm ⁴	0,17
maximale Durchbiegung an der Stelle X	mm	0,13

iv. Durchbiegung der Membran und Stützstruktur

a. Konstruiertes Stahlfedermodell

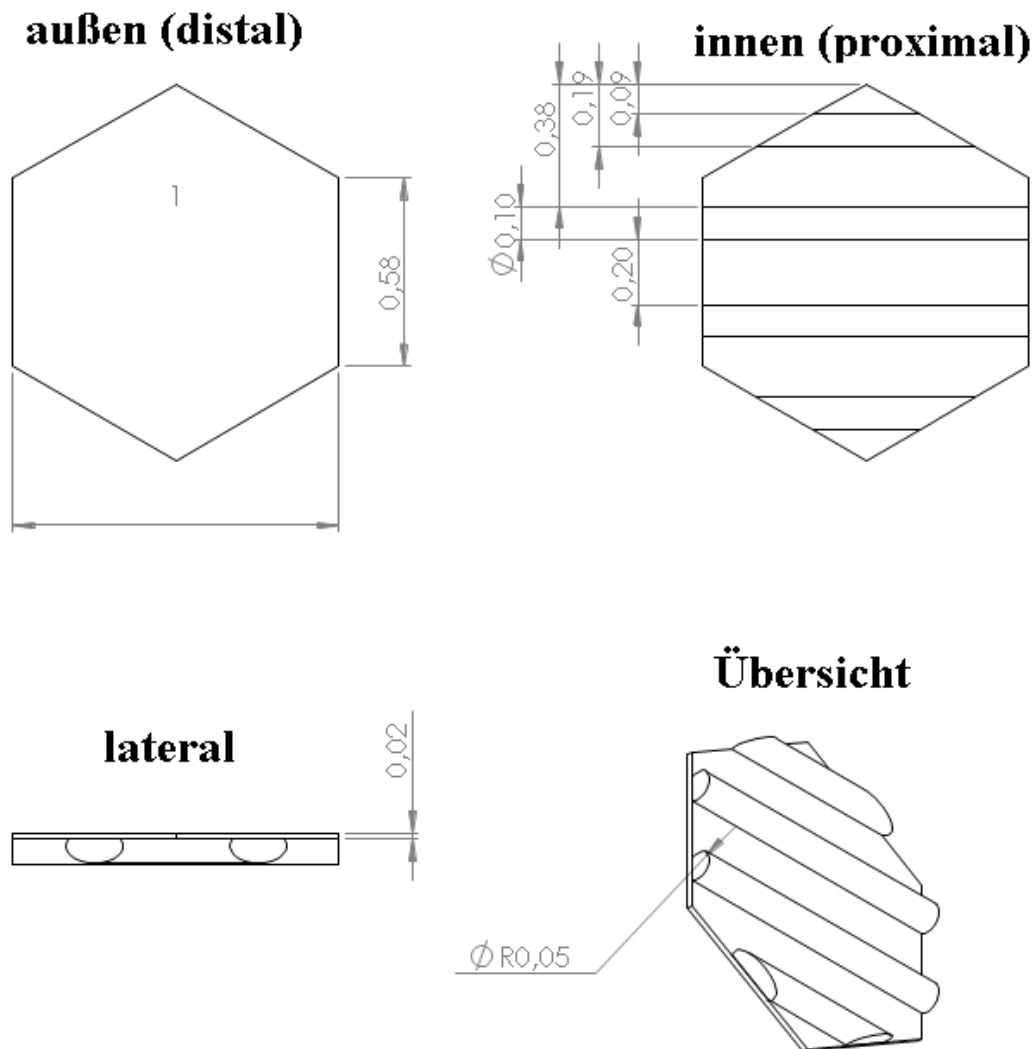


Abbildung XLII: Detailansichten mit Maßangaben in mm des mit SolidWorks 2015 konstruierten Stahlfedermodells aus vier Drähten und der aufliegenden Membran.

b. Gitterstudie

Tabelle XIV: Maximale Durchbiegungen in μm für die Modelle aus Struktur und Membran bei unterschiedlichen Vernetzungsstufen. Die hinreichende Vernetzung ist jeweils hervorgehoben. Für das Modell zum Vergleich mit der analytischen Rechnung erfolgt keine Gitterstudie.

Stufe	<i>Actinocyclus subtilis</i>	<i>Actinoptychus undulatus</i>	<i>Arachnoidiscus sp.</i>	<i>Coscinodiscus sp.</i>	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	Stahlfeder	Modell Analytikvergleich
1	0,074	12,552	0,575	0,296	0,082	29,179	0,025
2	0,082	12,874	0,720	0,409	0,087	28,484	-
3	0,084	12,873	0,857	1,135	0,086	29,921	-
4	0,085	12,886	0,940	2,234	0,086	30,066	-
5	0,085	12,876	0,973	2,206	0,086	30,494	-
6	0,085	-	0,986	2,201	0,087	28,691	-
7	0,085	-	0,986	2,198	0,086	28,318	-
8	0,086	-	0,988	2,206	0,087	28,513	-
9	0,086	-	-	2,207	0,087	28,590	-
10	-	-	-	-	0,087	-	-
11	-	-	-	-	0,087	-	-

c. Gesamtverformungen der Modelle

Im Folgenden sind die Gesamtverformungen in den Modellen aus Struktur und Membran dargestellt. Es wird angemerkt, dass für die Arbeit lediglich die Durchbiegungswerte der unteren Membran ausgewertet werden.

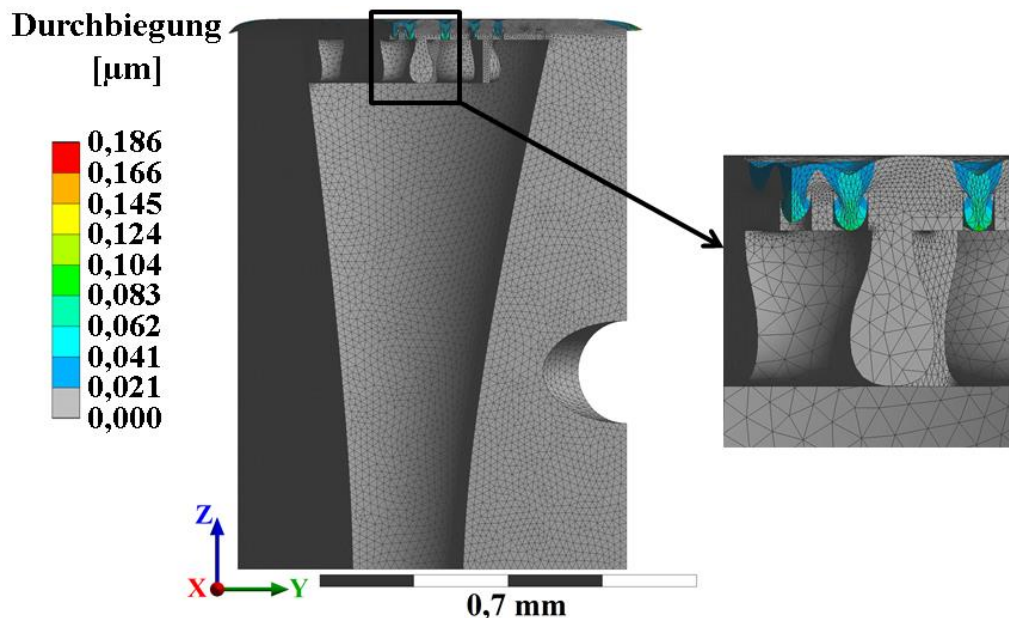


Abbildung XLIII: Durchbiegung in μm der Membran und Stützstruktur von *Actinocyclus subtilis* bei hinreichender Vernetzung. Die dargestellte Verformung der Membran in die kleinsten Poren ist zum besseren Verständnis 2400fach skaliert. Aufgrund der hohen Membranverformung im Vergleich zur Verformung der Struktur ist letztere nicht erkennbar. Die höchsten Verformungen der Membran treten an den Rändern auf, die jedoch im Verlaufe dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden (ANSYS Workbench 16.1).

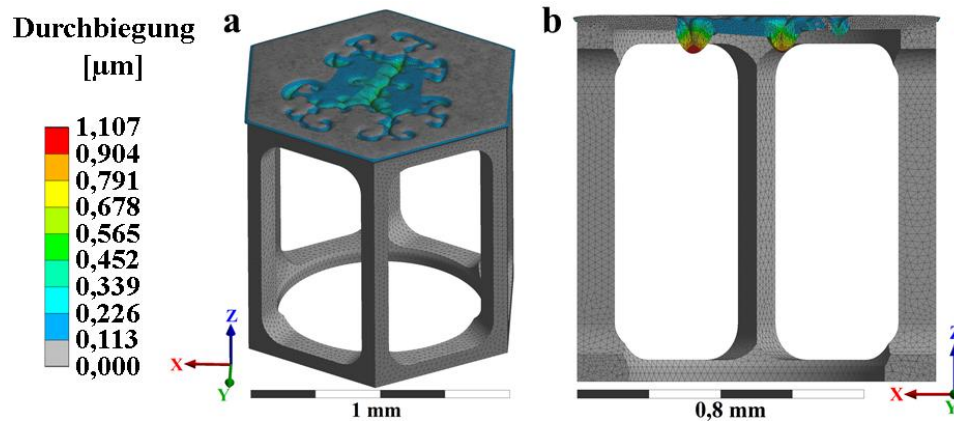


Abbildung XLIV: Durchbiegung in μm der Membran und Stützstruktur von *Arachnoidiscus* sp. bei hinreichender Vernetzung. Die dargestellte Verformung der Membran in die Porenstruktur ist zum besseren Verständnis 90fach skaliert. (a) stellt eine Gesamtübersicht da, während (b) die Schnittansicht an der Stelle der größten Verformung repräsentiert. In (b) ist gut erkennbar, dass die Verformung der Stützstruktur teilweise in der Größenordnung der Membranverformung liegt (ANSYS Workbench 16.1).

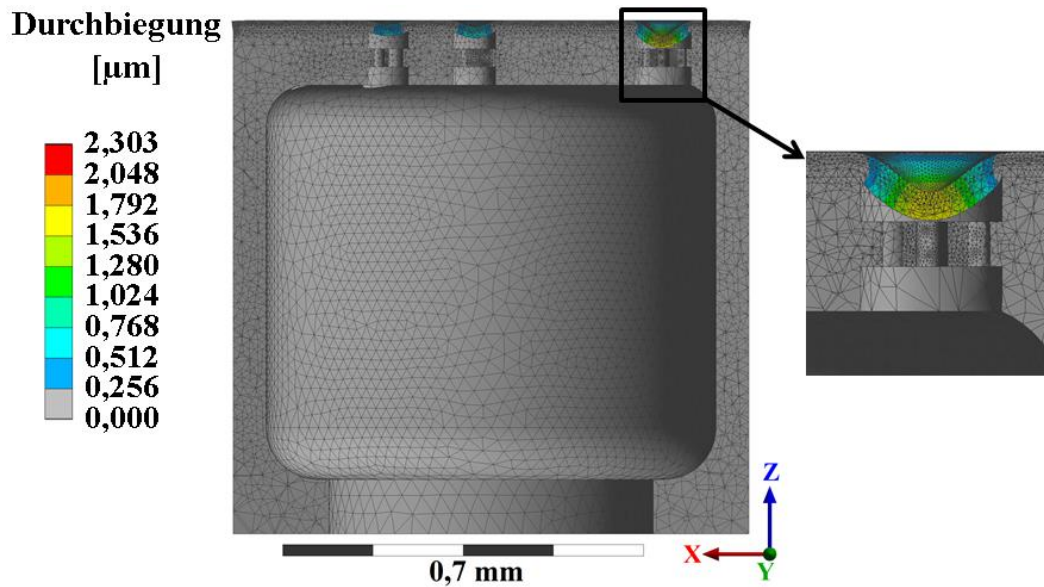


Abbildung XLV: Durchbiegung in μm der Membran und Stützstruktur von *Coscinodiscus* sp. bei hinreichender Vernetzung (Schnittansicht). Die dargestellte Verformung der Membran in die kleinsten Poren ist zum besseren Verständnis 20fach skaliert. Aufgrund der hohen Membranverformung im Vergleich zur Verformung der Struktur ist letztere nicht erkennbar (ANSYS Workbench 16.1).

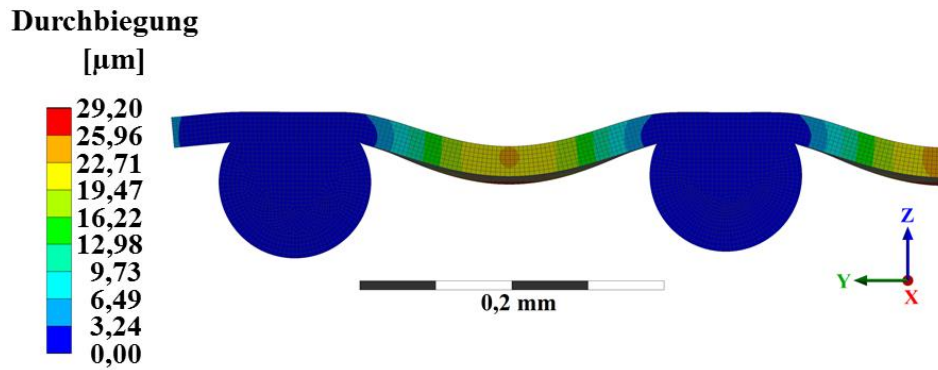


Abbildung XLVI: Maßstabsgerechte Durchbiegung in μm der Membran und Stützstruktur von der Stahlfeder bei hinreichender Vernetzung. Aufgrund der hohen Membranverformung im Vergleich zur Verformung der Struktur ist letztere nicht erkennbar (ANSYS Workbench 16.1).

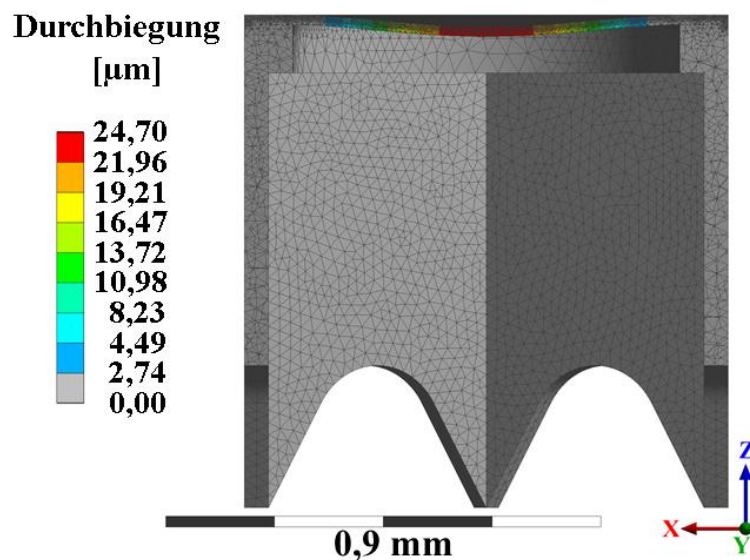


Abbildung XLVII: Maßstabsgerechte Durchbiegung in μm der Membran und Stützstruktur dem Modell zum Vergleich mit der analytischen Rechnung (Schnittansicht durch die Mitte). Aufgrund der hohen Membranverformung im Vergleich zur Verformung der Struktur ist letztere nicht erkennbar (ANSYS Workbench 16.1).

d. Analytische Rechnung

Tabelle XV: Auflistung der Parameter für die analytische Berechnung der Membrandurchbiegung in eine Pore hinein, wobei hier die Membran näherungsweise als eine vollständig eingespannte Kreisplatte betrachtet wird. Die maximale Durchbiegung beträgt gerundet 0,023 mm.

	Einheit	Wert
Radius der Pore r	mm	0,400
Flächendruck p	Pa	50,000
Plattensteifigkeit K	N mm	0,877
Elastizitätsmodul E	MPa	1,000
Höhe der Membran Δx	mm	0,020
Querkontraktionszahl μ	-	0,490
Maximale Durchbiegung w_{max}	mm	0,023

III. Diskussion und Ausblick

i. Konzept einer optimierten Areolenstruktur

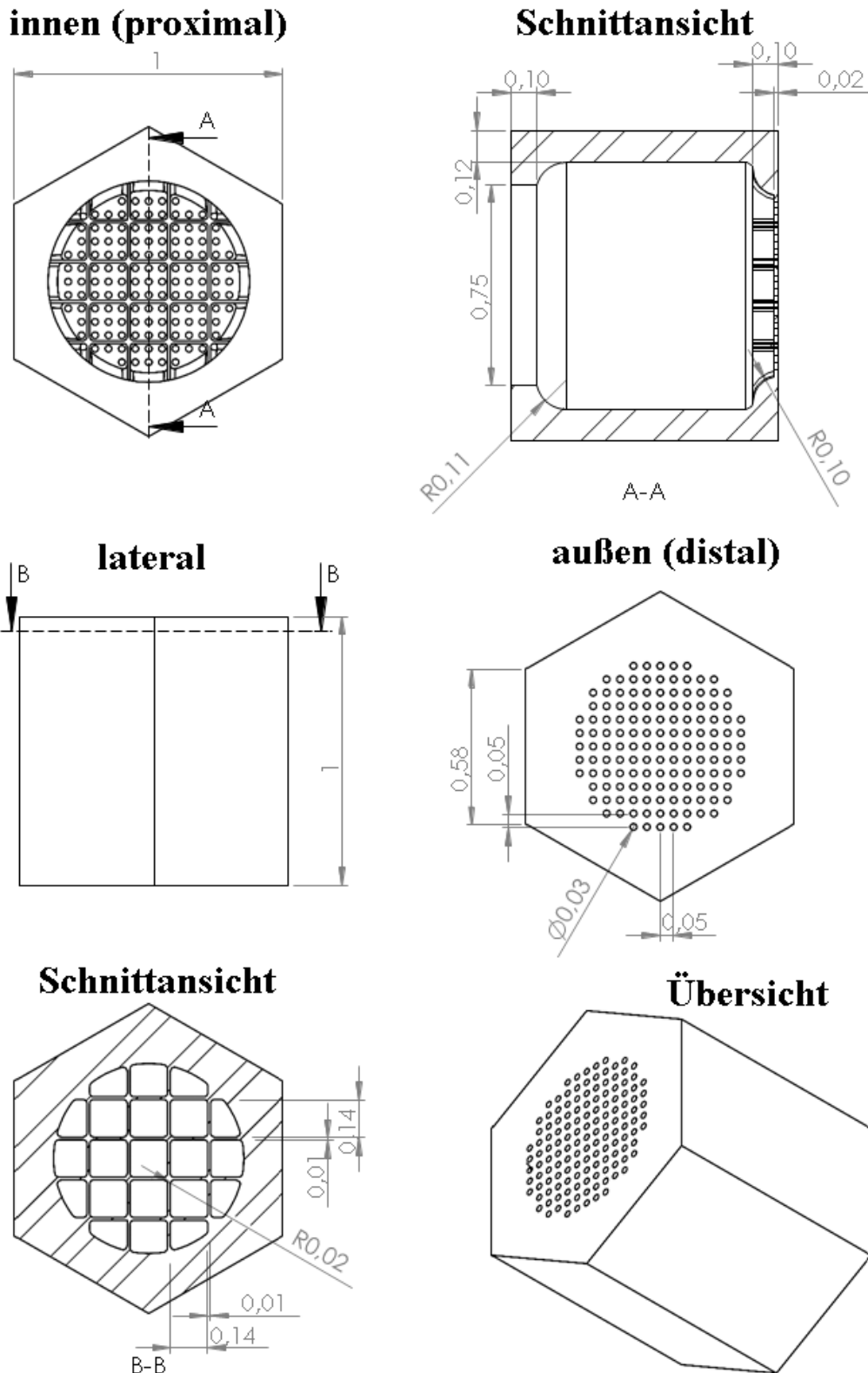


Abbildung XLVIII: Detailansichten mit Maßangaben in mm der mit SolidWorks 2015 konstruierten Areolenstruktur, die ein erstes Konzept einer für die technische Anwendung optimierte Geometrie darstellt. In der Struktur sind mehrere strukturelle Parameter der unterschiedlichen Diatomeenareolen kombiniert.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe und alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, als solche gekennzeichnet sind.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und ist auch noch nicht veröffentlicht.

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

Bremen, 17.12.2015

Unterschrift:

Daten-CD: Inhalt

Gesamtbericht

Konstruktion

- 3D-Modelle der Areolen
- Diffusionsmodelle
- Modelle der Gesamtstruktur (2 x 6 - Waben)
- Modelle der Membran und Stützstruktur

Ergebnisse

- Excel-Tabellen mit allen Ergebnissen

Diskussion und Ausblick

- 3D-Modell der optimierten Struktur (erster Ansatz)