

Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Konzeption einer Bionisch inspirierter Gebäudehülle
nach dem Vorbild natürlicher Hüllen und Häute

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der
Universität Stuttgart zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dirk Henning Braun
aus Tübingen

Hauptberichter:
Prof. Dipl.-Ing. Stefan Behling
Institut für Baukonstruktion Lehrstuhl 2
Universität Stuttgart

Mitberichter:
em. Prof. Dr. Werner Nachtigall
Universität des Saarlandes

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 2008
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr. Tilman Harlander



Universität Stuttgart

Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2
Prof. Dipl.-Ing. Stefan Behling

Braun, Dirk Henning > Bionisch inspirierte Gebäudehüllen <
Zugleich: Dissertation, Universität Stuttgart (D93)

Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der
Universität Stuttgart zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dirk Henning Braun

aus Tübingen

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 2008
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr. Tilman Harlander

Hauptberichter: Prof. Dipl.-Ing. Stefan Behling
Mitberichter: Prof. Dr. Werner Nachtigall

Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2
2008

Kurzfassung

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht die Beschäftigung mit 25 natürlichen Phänomenen, die innerhalb der letzten 500 Mio. Jahre an der Schnittstellen zwischen kontrollierten Innenbereichen und unkontrollierten Außenbereichen zu Problemlösungen evolviert sind, denen auch moderne anthropogene Gebäudehüllen sich stellen müssen. Im Laufe der Bearbeitung werden die Phänomene in drei Selektionsschritten auf Ihre Verwendbarkeit hin untersucht und mit möglichen Ansätzen für eine Architektonische Umsetzung belegt. Dabei stehen die mit Architekturen gefilterten Möglichkeiten einer Umsetzung bei der Wahl der Selektionsschritte in Vordergrund. In einer konzeptionellen Erarbeitung werden abschliessend die erarbeiteten Strategien natürlicher Systeme mit den Anforderungen anthropogener Hüllsysteme kombiniert und eine schematische konzeptionelle Diagrammatik adaptiv permeabler Hüllstrukturen der Zukunft vorgestellt.

Short description

The present project focuses on 25 natural phenomena that over the last 500 million years have evolved as solutions to problems along the interfaces between controlled inside areas and uncontrolled outside areas and which modern anthropogenic building skins must also address. In the course of the project, in three selection stages the phenomena will be investigated as regards usability and assigned possible methods for using them in architecture. In the process, the application opportunities seen through architectural eyes will be foregrounded during the selection stages. Then, as a conceptual step the strategies of natural systems identified will be combined with the requirements of anthropogenic skin systems and a schematic outline presented of adaptive permeable skin structures of tomorrow.

	Selektion I	Selektion II	Selektion III
	<p>Recherche nach „Natürlichen Hüllsystemen“ 25 Phänomene</p>	<p>Ansätze für „Bionisch inspirierte Hüllsysteme“ 19 Phänomene</p>	<p>Konzeptionelle Einbindung in eine „Bionisch inspirierte Gebäudehülle“ 11 Phänomene</p>
Natürliche Materialien	<p>Flüssiger Holzwerkstoff Lignin Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien Cellulose Progressives Leichtbaumaterial Perlmutter Biomimikation Calzit Dauerelastische Kinematikverbindung Resilin Biogener Glasfaserverbundwerkstoff Glasschwamm skelett</p>		Bionisch inspirierte Materialien
Natürliche Strukturen	<p>Strukturelle Lichtlenkung Schmetterlingsflügel Strukturelle Farbe Schmetterlingsflügel Strukturelle Reflexion Schwarzkäferpanzer Selbstreinigende Struktur Rosenkäfertanzler Abrasionssensitive Struktur Sandfischhaut Autosensitive Verschleißstruktur Schlangengeißel Reversible Haftstruktur Geckotatze Entgiftungsstrukturen Perikolum Permeable Struktur Fliegenohr</p>		Bionisch inspirierte Strukturen
Natürliche Funktionen	<p>Thermoelektrische Beschichtung Hornissenhaut Photobiologische Wasserstoffassade Grünalgen Farbsensitive Flüssigfassaden Amphibienhaut Dezentrale Flächenlüftung Amphibienhaut Selektiv permeable Hüllstruktur Plasmamembran Autosensitive Leuchtbeschichtung Biolumineszenz Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem Robbenfell UV-Beständigkeit Quallenhaut Sensorik Membranrezeptoren Photomechanischer Strahlungssensor Brandkäfer</p>		Bionisch inspirierte Funktionen

Abb. Kurzfassung.: Selektionsdiagramm der bearbeitenden Themen in den Kategorien Material, Struktur und Funktion

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Vorwort	15

Teil 1 Einleitung

Einführung in das Thema	17
Vorbemerkungen	21
1.0 Problemstellung	21
Zielsetzung der Arbeit	22
Hypothese	22
Einschränkungen	22
Vorgehensweise	23
2.0 Begriffserläuterung/ Begrifflichkeit	24
3.0 Informationsrichtungen	26
3.1 Analyse biologischer Systeme	26
3.2 Analyse technischer Systeme	27
4.0 Sichtweisen	28
5.0 Systematik der Bionik	32
5.1 Allgemeine Kategorisierung	32
5.2 Spezifische Kategorisierung	34
6.0 Strategien der Natur	36
7.0 Transferpotentiale Bionik	41
7.1 Schnittstellenbildung Architektur-Natur	42
7.2 Transferansätze Architektur-Natur	43

Teil 2 Anforderungen

Anforderungen an moderne Gebäudehüllen	47
Vorbemerkungen	47
1.0 Nutzungsbedingte Anforderungen	48
1.1 Raumlufttemperatur	48
1.2 Mittlere Temperatur der umgebenden Oberflächen	49
1.3 Relative Raumluftfeuchte	49
1.4 Raumluftgeschwindigkeit	49
1.5 Beleuchtungsstärke	49
1.6 Leuchtdichte	50
2.0 Witterungsbedingte Einflüsse	50
2.1 Außenlufttemperatur	50
2.2 Luftbewegung	50
2.3 Außenluftleuchte	52
2.4 Solarstrahlung	52
3.0 Energieverbrauch und Gebäudehülle	53
3.1 Heizenergieverbrauch	55
3.2 Kühlenergieverbrauch	56
3.3 Energieverbrauch für Kunstlicht	56
3.4 Energieverbrauch für Klimatechnische Ausrüstung	57
4.0 Subsysteme im Gebäude	58
4.1 Tragwerk	59
4.2 Hülle	60
4.3 Technik	61
5.0 Anforderungen an die Hüllstruktur	62
5.1 Komponentenkohärente Eigenschaften	65
5.2 Komponenteninkohärente Eigenschaften	66
5.3 Diagrammatik	66
5.4 Schematischer Aufbau	69

Teil 3 Ansätze für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

	Vorbemerkungen	77
1.0	Selektion natürlicher Hüllstrukturen	78
1.1	Bearbeitungsstruktur der Themen	80
2.0	Materialien	
	Überblick	85
2.1	Cellulose - Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien	88
2.2	Perlmutter - Progressives Leichtbaumaterial	102
2.3	Glasschwamm - Biogener Glasfaserverbundwerkstoff	111
2.4	Resilin - Dauerelastische Kinematikverbindung	124
3.0	Strukturen	
	Überblick	135
3.1	Schmetterling - Strukturelle Farbe und Lichtlenkung	139
3.2	Rosenkäfer - Selbstreinigende Struktur	153
3.3	Sandfisch - Abrasionsfeste Struktur	166
3.4	Schlangensterne - Autosensitive Verschattungsstruktur	177
3.5	Gecko - Reversible Haftstruktur	189
3.6	Fliegeneisohle - Permeable Struktur	202
4.0	Funktionen	
	Überblick	213
4.1	Hornisse - Thermoelektrische Beschichtung	218
4.2	Grünalgen - Photobiologische Wasserstofffassade	229
4.3	Amphibienhaut - Farbsensitive Flüssigfassaden	239
4.4	Amphibienhautatmung - Dezentrale Flächenlüftung	252
4.5	Plasmamembran - Selektiv permeable Hüllstruktur	271
4.6	Biolumineszenz - Autosensitive Leuchtbeschichtung	282
4.7	Robbenfell - Vasomotorisch thermoregulierendes Mehrschichtsystem	293
4.6	Brandkäfer - Photomechanischer Strahlungssensor	307

Teil 4 Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle

Vorbemerkungen	319
1.0 Übersicht natürlicher Lösungen	320
2.0 Lösungsansätze aus der Natur	323
2.1 Energie	323
2.1.1 Gaspermeabilität	324
2.1.2 Klimatisierung	326
2.1.3 Dämmung	326
2.1.4 Energiegewinnung	327
2.1.5 Energieaustausch	328
2.2 Sicherheit	329
2.2.1 Brandverhalten	329
2.2.2 Health Monitoring	330
2.2.3 Selbstreparatur	330
2.2.4 Entgiftung	331
2.3 Betrieb	331
2.3.1 Selbstreinigung	332
2.3.2 Winddichtigkeit	332
2.3.3 Wasserdichtigkeit	333
2.3.4 UV-Beständigkeit	334
2.3.5 Sensorik	335
3.0 Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle	336
3.1 Tabellarischer Schichtenaufbau	336
3.2 Diagrammatischer Schichtenaufbau	336
4.0 Schichtenadaptivität	340
4.0.1 Graduelle Adaptivität	341
4.0.2 Selektive Adaptivität	341
4.1 Adaptivität der Schichtenbereiche in x-Richtung	342
4.2 Adaptivität der Schichten in x-Richtung	347
4.3 Adaptivität der Schichten in z-Richtung	350
4.4 Adaptivität der Schichten in y-Richtung	355

4.6	Szenarien I-IV	362
4.6.1	Szenario I	364
4.6.2	Szenario II	370
4.6.3	Szenario III	376
4.6.4	Szenario IV	382
5.0	Fazit der Untersuchung	391
5.1	Architektur - Natur	391
5.2	Zusammenfassung	333
5.3	Ausblick auf mögliche Entwicklungen	393
Anhang		
	Geschichte der Bionik	397
	Trendwellen der Bionik	405
	Werkzeuge der Bionik	410
	Forschungsstand der Bionik/Hochschulen	413
	Literaturverzeichnis (alphabetisch)	438
	Bildquellen	451
	Lebenslauf	470
	Epilog	472

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Baukonstruktion, Lehrstuhl 2, der Universität Stuttgart entstanden. Den Personen, die zum Gelingen dieses Promotionsvorhabens beigetragen haben, möchte ich im Einzelnen danken. Insbesondere danke ich:

- Herrn Professor Dipl.-Ing. Stefan Behling für die vielfältigen Anregungen zu dieser Arbeit und die Betreuungen, die mir immer wieder neue Ansätze aufgezeigt haben,
- Herrn Professor Dr. Werner Nachtigall für die wertvollen Hinweise und die Bereitschaft als Mitberichter zu fungieren,
- meinen Kolleginnen und Kollegen am IBK2,
- meinen Eltern für die Unterstützung während meiner Ausbildungszeit und meiner Lehr- und Studiumszeit und
- ganz besonders meiner Frau Bärbel und meinen beiden Kindern Vincent und Annabell für alles.

Teil 1 - Einleitung

Einführung in das Thema

Nicht zuletzt durch die drastischen Eingriffe des Menschen in seine Umwelt und ständig steigende Energiekosten ist der Bionische Gedanke zu einem populären Schlagwort geworden. Die Grundidee der Bionik - aus der Natur für technische Konstruktionen zu lernen - ist faszinierend und für jeden unmittelbar einleuchtend: die heutigen Organismen, Konstruktionen und Strukturen sind das Resultat einer 500 Millionen Jahre währenden Entwicklungsphase, im weitesten Sinne als Evolution beschrieben. Dieses Potential von erfolgreichen und geprüften Konstruktionen nicht zu analysieren, wäre arrogant und im höchsten Maße unwirtschaftlich.

Daher findet in den letzten Jahren die junge Wissenschaftsdisziplin Bionik vermehrt Beachtung. Sie gilt als einer der Wegbereiter für zukünftige Technologien der Menschen. Die Grundlagenarbeit „Bionisch inspirierte Gebäudehüllen“ beschreibt die Geschichte der Bionik, die Entwicklung dieser Transferdisziplin, und wagt einen Ausblick auf mögliche Anwendungen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten.

Im Laufe der Arbeit werden verschiedene Fassadenprototypen untersucht, die von natürlichen Hüllen oder Häuten inspiriert sind. Ziel ist es Fassadenkonzepte zu entwickeln, die sich von Materialien wie Perlmutter oder Chitin, von Strukturen wie Schmetterlingsflügeln oder Seesternen und von Funktionen wie dem Dämmverhalten von Fellen oder der Photosynthese inspirieren lassen. Dabei können völlig neuartige Ansätze für Gebäudehüllen entstehen, wie z.B. atmende Gebäudehüllen, veränderliche Wärmedämmungen oder autoadaptive Verschattungssysteme. Spannend dabei ist besonders, dass alle diese Ideen per se veränderlich und multifunktional sein müssen, was eine besondere Herausforderung für die Architektur von morgen und deren Architekten sein wird.

Um sich diesem komplexen Themenbereich leichter nähern zu können und zwischen den Fachdisziplinen wie z.B. der Biologie, der Physiognomie oder den Materialwissenschaften und dem Architekten eine verständliche Schnittstelle zu bilden, werden für die weitere Bearbeitung drei Hauptkategorien vorgeschlagen, die An-

sätze für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen aufzeigen.

- **Natürliche Materialien:** Unter der Bezeichnung „Natürliche Materialien“ versteht man Ein- oder Mehrkomponentenstoffen, die ihre Eigenschaften nicht festgelegt haben und sich als Komponentenbaustein biologischer Systeme an äußere Beanspruchungen anpassen können. Je nach äußerer und innerer Anforderungen reagieren sie aktiv auf Veränderungen von Spannung, Temperatur, Belastungen oder Strahlungen und reagieren adaptiv, spontan reversibel oder sogar gleitend justabel.

Beispielhaft für diesen Bereich stehen die Forschungen an der Materialarchitektur des Perlmutter bestimmter Mollusken. Man vermutet, daß diese Material seine Biegesteifigkeit mit zunehmender Last verändern kann und so in der Lage ist variabel auf äußere Lasten zu reagieren. Dies zum Schutz vor Bruch oder Deformation. Denkbar wäre ein Fassadensystem aus diesem nachwachsenden und hygienischen Material, das aufgrund seiner Anpassungsfähigkeit mit weniger Material gleichermaßen leistungsfähige Systeme erzeugen kann. Damit wäre es den meist überdimensionierten Systemen aus Alu, Stahl oder Kunststoff überlegen. Dieses neue „Bionisch inspirierte Material“ kann sich u.U. dem Lastfall folgend, selbst einstellen. Ähnliche Materialentwicklungen auf mikro- wie auch nanoskaliger Ebene in der Oberflächenbeschichtung oder der Medizin sind längst zu einem großen Forschungsbereich gewachsen.

- **Natürliche Strukturen:** Unter der Bezeichnung „Natürliche Strukturen“ versteht man Strukturen, die in der Lage sind (dem Selbstoptimierungszwang biologischer Systeme folgend) eine der Anforderung entsprechende Wirkung aufzubauen.

Beispiel hierfür sind die Forschungen an Kalzitstrukturen des Schlangensterne-Skeletts. Dieses Tier ist in der Lage mit seinem Skelett Distanzen abzuschätzen, ohne dabei aufwendige sensorische System zu benötigen. Denkt man nun an einen Einsatz in der Architektur, so könnte ein Prototyp entstehen, der nur durch die Beschaffung seiner Struktur die Fähigkeiten besitzt den ultravioletten Lichtanteil zu „messen“ und je nach Gehalt Ge-

genmaßnahmen ergreifen kann. Diese „Bionisch inspirierte Struktur“, ein struktureller Sensor sozusagen, wäre in der Lage ohne optische Systeme, die verschmutzen oder versagen können, Lichtstrahlung zu messen und die entsprechenden Signale zur Weiterverarbeitung zu versenden.

- **Natürliche Funktionen:** Unter der Bezeichnung „Natürliche Funktionen“ versteht man sich optimierende Prozessabläufe, die auf dem Grundprinzip der Selbstorganisation der Natur basieren.

Beispiele hierfür sind die Entwicklungsarbeiten an Photobiologischen Wasserstofffassaden, die nach dem Vorbild der Photosynthese, eingehende Sonnenenergie in Wasserstoff umwandeln können. Dieses System basiert auf den erfolgreichen Forschungen im Bereich der Grünalgenverwendung zur Gewinnung des begehrten energiereichen Mediums. Vision ist darüber hinaus die Entwicklung einer Gaspermeablen Gebäudehaut nach dem Vorbild der Doppellipidschichten der Plasmamembran von Zellen. Diese Bestrebungen könnten zur Entwicklung „Bionisch inspirierter Funktionen“, wie z.B. atmender Gebäudehüllen führen, die sich den umgebenden Verhältnissen anpassen können, dabei keine Energieverluste verursachen und auch *last but not least* auch den Gestaltungsideen des Architekten freien Raum lassen.

Vorbemerkungen

Durch die stetig steigende Nachfrage an Energielieferung und- bereitstellung ist der Umgang mit energieliefernden Rohstoffen und deren Einsatz in Gebäuden in das Zentrum der Aufmerksamkeit geraten. Diese Diskussionen können nicht spurlos an Architekten und Baubeteiligten vorübergehen, die immerhin Objekte realisieren, die über Jahrzehnte und zum Teil Jahrhunderte hinweg ihre Umwelt beeinflussen. Der thematische Hintergrund ist also, Gebäudebauteile zu entwickeln, die aufgrund ihrer Konzeption zu Minimierung energierelevanter Verbräuche führen. Die Natur hat an ähnlichen Problemstellen meisterhafte Lösungen entwickelt, die in der folgenden Betrachtung Inspiration für neuartige Konzeptionen liefern sollen.

1.0 Problemstellung

Die Gebäudehülle ist im großen Maße für den Energieverlust und damit für den Energiebedarf von Gebäuden verantwortlich. Diese Baugruppe steht daher im Fokus der folgenden Betrachtungen, weil eine Optimierung gerade dort großen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes hat. Bei der Betrachtung des gesamtheitlichen Primärenergiebedarfes moderner Gebäude ist der Transmissionswärmeverlust ein relativ hoher Anteil am Gesamtenergieverlust.

Dabei spielt die Gebäudehülle die wesentliche Rolle, sei es durch die Leistungsfähigkeiten von Fassaden, Dächern oder andere angrenzenden Bauteilen, die den Schnittpunkt zwischen dem thermisch kontrollierten und konditionierten Innenbereich und dem unkontrollierten und unkonditionierten Außenbereich darstellen.

Da die Gebäude selbst im Primärenergiebedarf ca. 47% des gesamten Energiebedarfes moderner Industrienationen ausmachen, erhöht sich die Bedeutung energiegerechter Gebäudehüllen proportional. Dies bedeutet, daß an der Problemstelle Gebäudehülle ein enormes Potential an Einsparungen des Primärenergiebedarfes zu erzielen sind.

Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist es Phänomene aus der Natur zu recherchieren, deren Funktionsweise zu analysieren und auf ihre Übertragbarkeit in die Architektur hin zu überprüfen. Dabei stehen natürliche Hüllen und Häute im Mittelpunkt, die ähnliche Anforderungen erfüllen können, wie sie auch im Themenfeld moderner Gebäudehüllen auftauchen. Dabei handelt es sich nicht um eine direkte Übertragbarkeit im Sinne einfachen Kopierens, sondern vielmehr um das Verstehen der Funktionsweisen einzelner Phänomene und derer Kombinationsmöglichkeiten zu neuen Konzeptionen. So soll eine Arbeit entstehen, die im wesentlichen aus vier Teilen besteht. Im ersten und zweiten Teil werden Grundlagen und Anforderungen an moderne Gebäudehüllen ermittelt. Im dritten Teil werden dann in den Kategorien Material, Struktur und Funktion selektierte Ansätze „Bionischer Gebäudehüllen“, die sich im Laufe der vierjährigen Recherche herauskristallisiert haben, näher dargestellt und auf ihre Übertragbarkeit hin untersucht. Im vierten Teil wird abschließend das Potential einer konzeptionell entwickelten Gebäudehülle dargelegt und eine daraus resultierende Vision formuliert.

Hypothese

„Durch die Anwendung Bionischer Denk- und Verfahrensweisen können Gebäudehüllen entwickelt werden, die zur Entwicklung CO²-neutraler Gebäudekonzepte einen entscheidenden Beitrag leisten“.

Einschränkungen

Im Laufe der Bearbeitungszeit haben sich eindeutig Einschränkungen ergeben. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Probleme der Umsetzbarkeit in funktionierende Testreihen, da sich immer wieder gezeigt hat, daß die Ansätze weniger in der Planung wie dann in der Umsetzung an Grenzen stoßen, die im Rahmen eines Promotionsvorhabens nicht lösbar sind. Daher wird der Schwerpunkt auf die inhaltliche und grundlegende Beschäftigung mit den Potentialen der Bionik in der Architektur gelegt und ein Ergebnis in der konzeptionellen Entwicklung einer Gebäudehülle dargestellt und formuliert.

Vorgehensweise

Im Teil 1 werden nach der Einführung in das Thema, die sich mit den Grundlagen und Zielsetzungen der Arbeit auseinandersetzt, Basisinformationen wie Begrifflichkeiten, Sichtweisen, Systematiken und Strategien der Bionik beschrieben. Dann erfolgt eine Erläuterung der Problemstellung „Gebäudehülle“ im Gesamtkontext des Gebäudes und im Teil 3 „Ansätze für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen“ werden in den Kategorien Material, Struktur und Funktion unterschiedliche Konzepte für Gebäudehüllen skizziert, die als Basis für die weiteren Überlegungen dienen.

Im Teil 4 „Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle“ wird dann die konzeptionelle Umsetzung einer adaptiven gaspermeablen Hüllstruktur vorgeschlagen, die mit Hilfe tabellarischer und diagrammatischer Spezifikationen erarbeitet und dann visualisiert dargestellt wird. Abschließend wird man in einem Ausblick auf mögliche physische Umsetzungen ein Fazit gezogen und der Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben.

Rahmeninformationen, wie z.B. die Werkzeuge oder die Geschichte der Bionik findet man im Anhang ab Seite 352. Dort findet man dort einen Überblick der regionalen, nationalen und internationalen Forschungsvorhaben.

2.0 Begriffserläuterung/Begrifflichkeit

Inspiriert ist der deutschsprachige Begriff „Bionik“ durch die Wortschöpfung „*bionics*“ von J.E. Steele aus dem Jahre 1959. Er veranstaltete in diesem Jahr ein militärisches Symposium, in dem Luftwaffenmajors verschiedener Waffengattungen der Vereinigten Staaten von Amerika über die Transfermöglichkeit von natürlichen Konstruktionen in technische Konstruktionen debattierten.

Der deutschsprachige Neologismus „Bionik“ besteht aus den ersten und letzten drei Buchstaben der Wörter Biologie und Technik. Dazu muss erläutert werden, dass der Begriff in ähnlicher Form schon 1939 als Buchtitel verwendet wurde. In seinem Buch „Biotechnik“ geht Gießler auf den Informationstransfer Biologie-Technik ebenso ein wie auf den Transfer Technik-Biologie. Die Unzulänglichkeit in dieser Begrifflichkeit ist seine nicht klar definierbare Abtrennung zwischen den Richtungen des Informationsflusses. Der Autor der vorliegenden Arbeit schließt sich einer von Nachtigall 1971/73 propagierten Trennung der Begrifflichkeiten „Bionik“ als Transferleistung von „Biologie in Technik“ an. Bionik wird somit verstanden als ein Lernen von der Natur in Sinne eigenständigen Handelns. Durch die Belegung des Begriffes Biotechnik durch die Mikrobiologie (Vorrangig die Bereiche der Bakterienzucht und der Gentechnik) wurde 1990 der Begriff der „Technischen Biologie und Bionik“ durch Nachtigall etabliert und fand unmittelbar Anwendung in der Gründung des Lehrstuhls für „Technische Biologie und Bionik“ 1992 an der Universität des Saarlandes, sowie der Gründung der GTTB, der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik.

Wichtig ist an dieser Stelle, daß im angloamerikanischen Raum der Begriff „*bionics*“ inhaltlich anders verstanden wird wie im deutschsprachigen Raum. Dies kann zu Missverständnissen führen, die hier kurz beleuchtet werden sollen. Dort verwendet man diesem Begriff, wenn technische Konstruktionen vorrangig den Menschen oder andere Lebewesen unterstützen, sei es durch Ergänzungen oder Ersatz von Funktionsträgern. So versteht die Medizin dort z.B. „Bionics“ mit der Verbesserung von menschlichen Organen durch künstliche Implantate oder Prothesen. Obwohl die Disziplin relativ jung ist, können im medizinischen Bereich schon einige erfolgreiche Entwicklungen erwähnt werden. Beispiele dafür sind Hörgeräte

für taube Menschen, die als Implantat ein besseres Gehör zur Verfügung stellen, da Hintergrundgeräusche gezielt gefiltert werden können. 2004 wurde das erste künstliche Herz entwickelt und mit der rasanten Entwicklung in der Nanotechnologie sind weitere Schritte in diese Richtung absehbar geworden. Platzhalter für diese Entwicklungsebene sind z.B. Respirozyten (künstliche rote Blutkörperchen), die nach dem Entwurf von Robert Freitas, im Augenblick realisiert werden.

Auch in der Politikwissenschaft wird über Bionik nachgedacht. So gibt es Bionische Modelle für bioregionale Demokratien, die ihre Grenzen aus ökologischen Regionen heraus generieren und weniger kulturelle Abgrenzungen oder konfliktentstandene Ergebnisse zur Grundlage haben.

Da es international unterschiedliche Begriffe gibt, im Anschluss deren Erläuterung:

- **Biomimetics:** (en. biomimetics, v. griech.: bios = Leben + mimesis = Nachahmung) zu deutsch Biomimetik, beschreibt gleichermaßen das Forschungsfeld der Bionik
- **Biomimicry :** (en. biomimicry, v. griech.: bios = Leben + mimesis = Nachahmung) zu deutsch Biomimesis ist die Nachahmung von gefährlichen, giftigen oder ungenießbaren Arten zum eigenen Vorteil. Entdecker dieser Form der Nachahmung ist Henry Walter Bates (1862). Daher nennt man diese Form auch Batessche Mimesis. Bates bezeichnete die Nachahmung eines wehrhaften oder ungenießbaren Tieres durch harmlose Tiere zur Täuschung von Feinden als Mimikry.
- **Biognosis:** (en. biognosis, v. griech.: bios = Leben + gnosis = Erkenntnis) zu deutsch Biognosis, allgemein verstanden als Erkenntnisse aus dem Leben und aus der Natur.
- **Bionical Creatology:** (en. bionics, Neologismus, creatology, Neologismus aus dem Amerikanischen für Kreativitätstechnik) (Mahdi Golestan Hashemi) zu deutsch Bionische Kreativitätstechnik.

Der Vollständigkeit halber sollte an dieser Stelle auch der Begriff der Analogieforschung angesprochen werden, da in jeder noch so oberflächlichen Gegenüberstellung die Chance einer Erkenntnis oder einer Ideenübertragung steckt. Die Analogieforschung beschreibt das Gegenüberstellen von Dingen, auch wenn sie vordergründig nichts miteinander zu tun haben. Als Beispiel kann hier der Vergleich eines Grashalmes mit einem Fernsehturm gesehen werden.

3.0 Informationsrichtungen

Als Überbegriff beinhaltet die Bionik im wesentlichen zwei mögliche Vorgehensweisen, zum einen den Transfer aus der Biologie in die Technik und zum anderen den Transfer aus der Technik in die Biologie. An zwei Beispielen kann man die Vorgehensweise der Bionik verdeutlichen und die reziproke Wirkungsweisen von Technik und Biologie erläutern.

3.1 Analyse biologischer Systeme

Der Ingenieur und Künstler Leonardo da Vinci vermutete schon im frühen 16. Jh. eine Parallele zwischen den abgespreizten Daumenfittichen der Taube beim Landeanflug und einer flugstabilisierenden Wirkung. Von Lachmann wurde dann im ersten Viertel dieses Jahrhunderts ein Vorflügel entwickelt, der zur Verbesserung der Strömung bei langsamem Flug dienen sollte. Heute sind diese Vorflügel oder „slats“ unabdingbare Bestandteile modernen Flugzeugbaus. Bionik ist hier also Ideengeber für eine anthropogene Adaption eines biologischen Phänomens durch technische Umsetzung.

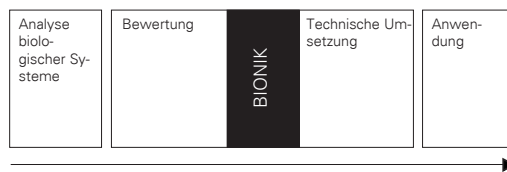


Abb. 3.0.1: Die Schnittstelle Bionik in der technisch biologischen Vorgehensweise

Auch Kripp hatte schon 1935 versucht den Unterkiefer eines Vogels als Eisenbetonträgerkonstruktion zu sehen. Die Kräfte die entstehen, wenn der Vogel zubeißt, entsprechen der Funktionsweise eines Kragträgers. Damit hatte er intuitiv die wesentlichen Konstruktionsprinzipien dieser natürlichen Form verstanden und abstrahiert. Diese Vorgehensweise bedeutet also, in der Natur vorkommende Phänomene auf ihre Wirkungsweise hin zu untersuchen, auch wenn keine direkte Übertragung der Grund der Untersuchung ist. Bionik heißt also nicht die Natur sklavisch zu kopieren, es bedeutet vielmehr aus der Natur Anregungen für eigenständiges Weitergestalten zu erhalten. Die im dritten Teil der vorliegenden Arbeit „Ansätzen für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen“ vorkommenden Biologischen Phänomene basieren zum Großteil auf dieser Herangehensweise.

3.2 Analyse technischer Systeme

In der „Technik-Analyse Bionik“ im Rahmen der VDI-Tagung zur Analyse und Bewertung zukünftiger Technologien erfolgt 1993 eine allgemeine Definition der Bionik: „Bionik als wissenschaftliche Disziplin befasst sich mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme.“ Sie führt die durch die Vorgehensweise der Technischen Biologie erforschten Aspekte der Biologie, einer technischen Umsetzung und Anwendung zu. Bionik ist dabei das Bindeglied zwischen Biologie (mit technischer Biologie) und Technik. Die sinnvollste Möglichkeit für ein Einbringen von Vorschlägen aus der Natur über das Medium der Bionik ist die Schnittstelle zwischen Bewertung und Umsetzung. Diese Vorgehensweise bedeutet also eine gezielte Suche nach Lösungsmöglichkeiten aus der Natur für ein vorhandenes technisches Problem.

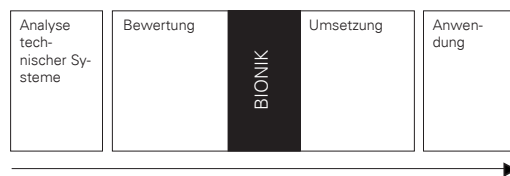


Abb. 3.2.1: Die Schnittstelle Bionik in der technischen Vorgehensweise

Anm. des Autors: „Technische Biologie und Bionik sind gegenläufige Betrachtungsweisen: Die Technische Biologie ist eine biologische Disziplin, in welcher Grundlagenforschung betrieben wird. Mit Hilfe von physikalischen und technischen Verfahren versucht man Konstruktions- und Verfahrensweisen der Natur zu verstehen. In der Bionik hingegen durchforstet man das Reservoir der Konstruktions- und Verfahrensweisen der Natur um daraus Anregungen für eigenständiges technisches Weiterarbeiten zu bekommen. In der Bionik geht es nicht um eine Kopie der Natur, sondern um ein systematisches Erfassen der Prinzipien und Mechanismen, die hinter biologischen Konstruktionen und Vorgehensweisen stehen. Da sich biologische Systeme über Jahrmillionen evolutionär entwickelt und angepasst haben ist deren direkte Kopie nicht möglich. Die Technik stellt darüber hinaus ganz andere Ansprüche als die Natur.“

4.0 Sichtweisen

Die Konstruktions- und Funktionsweisen biologischer Systeme haben sich im Zuge der Evolution mittels Versuchs- und Irrtumsprozessen über Jahrmillionen entwickelt. Daher scheint es naheliegend diese Überlebensstrategien der Natur zu studieren. Wie das von konkreten Fachdisziplinen aus praktiziert wird, soll mittels der folgenden fünf Positionen erläutert werden. Abschließend wird vom Autor der vorliegenden Arbeit eine eigenständige Sichtweise formuliert. Im Anschluss werden die Sichtweisen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen und Arbeitsbereichen erläutert.

- **Werner Nachtigall:** „Bionik kann man ja ganz allgemein auch als konstruktive Grundhaltung sehen, etwa im Sinne eines ökologischen Konstruierens. Damit ist Bionik auch eine Art Technische Lebensphilosophie. Der Biologe sollte nicht müde werden, dem Ingenieur diese Haltung zu vermitteln. Zumindest ist Bionik das ideale Kreativitätstraining für den Techniker.“

Werner Nachtigall, Prof. Dr. rer. nat., geb. 1934, studierte Naturwissenschaften (Biologie, Physik, Chemie, Geographie) an der Universität München und promovierte 1959 bei Werner Jacobs im Fach Zoologie. Auf die Habilitation im Jahr 1966

folgte ein Forschungsaufenthalt im neurophysiologischen Labor von D. Wilson an der University of California, Campus Berkeley. 1969 nahm er einen Ruf als Ordinarius für Zoologie am Zoologischen Institut der Universität des Saarlandes an und baute dort eine bewegungsphysiologische Arbeitsgruppe auf. 1990 gründete er eine Ausbildungsrichtung „Technische Biologie und Bionik“ an der Universität des Saarlandes und eine Gesellschaft gleichen Namens. Er wurde im Herbst 2002 emeritiert und ist heute Leiter des Bionik-Kompetenz-Netzes (BIOKON) an der Universität des Saarlandes. Werner Nachtigall ist Mitglied mehrerer wissenschaftlicher Akademien und Organisationen, Verfasser von über 300 wissenschaftlichen Publikationen und Autor von 31 Büchern. Er ist Träger der Karl-Ritter-von-Frisch-Medaille der Deutschen Zoologischen Gesellschaft (DZG) und der Treviranus-Medaille des Verbandes Deutscher Biologen (VdBiol). Ferner wurde er mit dem Baupreis der Fritz-Bender-Stiftung und dem internationalen Umweltpreis des TÜV Berlin-Brandenburg-Rheinland ausgezeichnet.

- **Stefan Behling:** „Wenn wir ökologisch sinnvolle Systeme entwickeln wollen, sollten wir von der Natur und der von ihr entwickelten Beziehungen lernen. Unsere Ökosphäre beheimatet Pflanzen und Tiere, die innerhalb ihrer eigenen Ökosysteme in parasitären, kommensalen oder symbiotischen Beziehungen leben. Tiere z.B. verbrauchen Solarenergie mittelbar, indem sie Biomasse verzehren; ihre außerordentlichen Anpassungstechniken lassen sie unter Umweltbedingungen leben, die für Menschen tödlich wären. Pflanzen dagegen sind hocheffiziente Solarkollektoren, die Sonnenenergie verarbeiten. Mit Hilfe der Sonnenenergie wandeln sie Kohlendioxid aus der Luft in chemische Energie um und geben gleichzeitig Sauerstoff an die Atmosphäre ab. Als Biomasse stellen sie selbst eine Energiequelle dar und bilden den Ausgangspunkt für die Nahrungskette, von der die meisten Lebewesen auf der Erde abhängig sind. Der Mensch ist eine hochentwickelte Maschine mit gewissen Grundbedürfnissen. Als warmblütiges Geschöpf muss der Mensch seine Körpertemperatur unter den verschiedensten klimatischen Bedingungen konstant halten. Die menschliche Haut kann diese Aufgabe nur bedingt erfüllen; Kleidung und vor allem Gebäudehüllen müssen ihre Defizite kompensieren.“

Stefan Behling, o. Prof. Dipl.-Ing., geb. 1962, schulische Ausbildung in den USA, der

Schweiz und Deutschland, Studium an der RWTH Aachen Fachbereich Architektur, seit 1987 Mitarbeiter im Büro Foster and Partner, London und dort heute Mitglied des Vorstandes, seit 1995 auch o. Professor am Institut für Baukonstruktion, Lehrstuhl 2.

- **Greg Lynn:** „Bionik bedeutet ein neues Paradigma der Organisation, des Entwurfes und der Produktion, das charakterisiert ist durch Kurvaturen und die Abkehr von Modularität und Standardisierung. Die auf Näherungstechniken beruhende Kombination von Kontinuität, Integration und Variation erzeugt organisch anmutende Formen von Proportion und Schönheit, entspricht aber auch den Bedingungen moderner Maschinenproduktionen.“

Greg Lynn, o. Prof. Dr. hc., geb. 1964, studierte an der Princeton University und an der Miami University in Ohio in den USA. Von 1987-1991 arbeitete er bei Peter Eisenman Architects in New York City und gründete 1992 Founder of Greg Lynn Form. Aktuelle lehrt Greg Lynn an der Hochschule in Wien.

- **Jacques Herzog:** „Phänomene der Natur fließen in ganz unterschiedlicher Weise in unsere Arbeiten ein: mal im unmittelbaren, materiellen Sinne, mal vermittelt, in Form einer abstrakten Sprache, welche sich zu einer All-over-Struktur ausbauen lässt. Ziel für die Architekten ist es dabei, jenen Punkt zu erreichen, an dem Künstliches und Natürliches im Prozess der Wahrnehmung zusammenfinden. Architektur bietet gegenüber anderen Medien die Chance alle Sinne anzusprechen. Die visuell überfrachtete Welt führt zu Verarmung anderer Sinne. Die Integration der Natur in die Architektur, schafft eine neu erlebbare Welt, die alle Sinne anspricht. Die Empfindsamkeit soll wiederentdeckt werden. Die Empfindsamkeit auf dem Weg zum Modernen Ich. Die Natur ist nicht nur draußen, sondern Natur ist vor allem ein Konstrukt unserer Wahrnehmung. Bevor eine Landschaft Refugium für die Sinne werden kann, ist sie schon das Werk des Geistes. Die Natur fungiert aber als Katalysator um die Wahrnehmung zu schärfen und sinnliche Erfahrungen zu ermöglichen. Mit Hilfe der Sinne in die Innenwelt - die innere Natur - reisen. Der Mensch entdeckt sich dabei als vollkommenes und totales Selbstwerkzeug. Das Bauwerk als Spiegel der Natur. Herzog & deMeuron lassen die Natur selbst wirk-

sam werden. Beispielsweise durch die Integration eines Teiches oder Wasserfalls, wie im Forum Barcelona 2004. Das Bauwerk wird so zum Parasit der Natur. Daneben dienen natürliche Prozesse, Strukturen der Natur als Vorbild für eine Architektur, die wie ein Organismus funktioniert. Herzog & deMeuron geht es darum eine Sprache zu entwickeln, die sich durch das gesamte Gebäude zieht, wie ein genetischer Bauplan. Die Hafenanlage auf Teneriffa baut beispielsweise auf der Idee der Pixel auf. Bildpunkte als Abbild von etwas, das einmal da war. Die Hafenanlage als Abbild der Natur, die Rasterpunkte als flächige Ausdehnung ähnlich einer Flächenlandschaft.“

Herzog & de Meuron ist ein 1978 gegründetes schweizerisches Architekturbüro mit internationalem Renommee. Es ist die Kooperation der beiden Architekten Jacques Herzog und Pierre de Meuron. Nach dem zeitgleichen Architekturdiplom 1975 an der ETH Zürich gründeten Herzog und de Meuron 1978 ihr Büro mit Hauptsitz in Basel, Rheinschanze 6. Neben diesem haben sie auch Zweigstellen in London, München, Barcelona, San Francisco und Tokio und beschäftigen 220 Angestellte. Partner im Büro Herzog & de Meuron sind Harry Gugger und Christine Binswanger. Seit 2003 sind auch Robert Hösl, Ascan Mergenthaler und fünf weitere Architekten Partner des Büros. De Meuron und Herzog lehren beide an der ETH Zürich und an der Harvard University.

In diesen Sichtweisen zeigen sich die Chancen und Risiken der Bionikforschung auf mehreren Ebenen. Versucht der Biologe und Urvater der Bionik in Deutschland, Werner Nachtigall, den Schwerpunkt auf der Grundhaltung des ökologischen Konstruierens zu sehen, in der der Biologe den Techniker zu begeistern versucht, stellt Greg Lynn die These auf, daß eine Kombination aus näherungstechnisch ermittelten Krümmungen mit maschineller Herstellung, anmutende Schönheit und Form zur Folge hat. Jacques Herzog, Chef von Herzog & deMeuron, dem in den letzten Jahr weltweit führenden Architekturbüro, sieht eher eine gestalterische Chance in der Verschmelzung von Künstlichem und Natürlichem, eine Wahrnehmungsmöglichkeit auf unterschiedlichen Ebenen.

Für den Autor der vorliegenden Arbeit ist jedoch das Ziel der Bionik ist Übertragung von Problemlösungen der Natur auf Bereiche der Technik, die dann selbst natür-

licher und umweltverträglicher werden. In diesem Kontext sollte man sich daher auf die inhaltliche Chance verlassen, die im Transfer von geprüften und etablierten Konstruktionen der Natur verborgen liegt und nicht das Risiko eingehen, Formen und Gestalten zu erzeugen, die sich in der Logik der Natur nur schwer wiederfinden lassen. Der Autor schlägt daher als einen Ansatz Bionischer Denkweisen in der Architektur folgende Sichtweise vor:

„Bionik ist die Transferdisziplin für die technischen Umsetzung und Anwendung von Material-, Struktur- und Funktionsprinzipien biologischer Systeme.“

5.0 Systematik der Bionik

Eine Klassifikation oder Systematik ist eine planmäßige Darstellung von Klassen, Kategorien oder anderen abstrakten Konzepten, die nach bestimmten Ordnungsprinzipien (einem System) gestaltet ist. Die Bionik ist, als eine transdisziplinäre Querschnittswissenschaft, in der die Technische Biologie den Kontakt zur Biologie hält, während die Bionik den Kontakt zur Technik darstellt, dringend auf eine Kategorisierung zwischen den Disziplinen angewiesen. Mit der Verzahnung der Technischen Biologie und Bionik verzahnen sich auch Biologie und Technik. Die wesentlich beteiligten Disziplinen sind die Biologie, Chemie und die Physik, die als exakte Naturwissenschaften in beträchtlichem Maße Grundlagenforschung betreiben. Sie sind Ausgangspunkt konkreter und praktisch anwendbarer Erkenntnisse.

5.1 Allgemeine Kategorisierung

Nach Nachtigall wurden 2001 folgende Kategorien der Bionik erstellt, die biologische Phänomene in Fachbereiche aufteilen und ein Ansatz für verschiedene wissenschaftliche Fachdisziplinen sind.

- **Evolutionsbionik:** Selbstorganisation, Formfindung durch numerische Werkzeuge. Evolutionstechnik und -strategien, experimentelle Versuchs-Irrtums-Entwicklung.

- **Prozess-/Verfahrensbionik:** Photovoltaik, Autoreparabilität, Photosynthese und Wasserstofftechnologie, Energiegewinnung durch pflanzliche/organische Stoffe.
- **Bionische Kinematik und Dynamik:** Aerodynamische Gebäudeformen, bewegliche Gebäude/-teile, Strömungsanpassung bewegter Körper, Antriebsmechanismen, Aero- und Hydrodynamik.
- **Bionische Robotik:** steuerbare Gebäudeteile, humanoide Roboter, Technik. Simulation von „Muskeln“.
- **Bionische Prothetik:** Gliederersatz, Seh-/Hörprothesen, Verbindungsproblematik Biologie+Technik – Neurone und Kabel. Interaktion „Mensch“-„Maschine“.
- **Neurobionik:** Schaltsysteme + neuronale Netzwerke, Steuerungs- und Schaltmechanismen des Gehirns als Vorbild „neuronaler Netzwerke“.
- **Sensorbionik:** Sensorik, Monitoring von physikalischen und chemischen Reizen und deren Umwandlung zu Nervenimpulsen (fühlen-riechen-hören-sehenschmecken), mechanischen Sensoren für Druck, Dehnung, Gleichgewicht, Beschleunigung und Erschütterungen, UV-Licht/Infrarotwahrnehmung, Ultra-/Infraschallwahrnehmung, Wahrnehmung von elektrischen und magnetischen Feldern.
- **Klima-/Energiebionik:** natürliche Belüftung, Energiegewinnung, Idealausrichtung zu Sonne und Wind, passive Lüftung, Kühlung, Heizung, Erdwärme, Gasaustausch unter Verwendung poröser Materialien.
- **Material-/ Werkstoffbionik:** neue Materialien, neue Bau-/Werkstoffe, Autoreparabilität, totale Recyklierbarkeit, Müllvermeidung, „smart materials“, coatings.
- **Konstruktions-/Strukturbionik:** Seil-, Membran-, Massiv-, Skelettkonstrukti-

onen, Pneukonstruktionen, Formbildungsprozesse, Gesamtkonstruktionen in Pumpen- und Fördertechniken, Hydraulik und Pneumatik, Faltungen.

- **Baubionik:** Baumaterialien, Leichtbaukonstruktionen, Organisation von Gebäude-/Wohnelementen, städtebauliche Betrachtungen, bautechnische Kreativität der Natur.
- **Organisationsbionik:** Organisation unterschiedlichster Prozesse und Abläufe, Versorgungssysteme, komplexes Management und Organisationsfragen, Querbeziehungen in Ökosystemen, Versorgungssysteme.

5.2 Spezifische Kategorisierung

Die allgemeine Kategorisierung wird nun im Themenfeld der Architektur verfeinert und mit architektonisch relevanten Beispiele belegt. Damit soll erreicht werden, daß die allgemein gültigen Kategorien sich im hier diskutierten Spektrum zuordnen lassen.

- **Evolutionsbionik:** Gebäudeformfindung durch numerische Werkzeuge unter Berücksichtigung architektonischer Parameter.
- **Prozess-/Verfahrensbionik:** Photovoltaische Energiewandlung, Autoreparabilität von Beton- oder Glasbauteilen, Photosynthese und Wasserstofftechnologie in der Fassade, Energiegewinnung durch pflanzliche/organische Stoffe.
- **Bionische Kinematik und Dynamik:** Aero-/ Hydrodynamik wirkt auf Körper in Gasen oder Flüssigkeiten. Daraus resultieren Kräfte auf deren Oberflächen. Sobald sich das Medium bewegt, entstehen durch Reibung und das Gesetz von Bernoulli lokale Druckdifferenzen - Luftwiderstand bzw. Auftrieb an Tragflächen. Hauptsächliche Beachtung im Flugzeug- und Schiffsbau. In der Architektur interessant für die Formfindung günstiger Gebäudeformen – Windnutzung.

- **Bionische Robotik:** Steuerbare Fassaden und Gebäudeteile „fluid muscles“. Anwendung als veränderbare Gebäude/-teile in Form von aktiver Veränderung. Adaptive Systeme/ Fassaden/ Sonnenschutz / Lüftungssysteme/ Formänderungen. Weitere mitwirkende Disziplinen: Angewandte Informatik, Elektrotechnik und Maschinenbau.
- **Bionische Prothetik:** Bauteilaustausch, neue, thermische Gebäudehaut: „Gebäudehüllen-Prothesen“, Implantate - Haut - Sensoren, z.B. nachträgliche Ausstattung eines Gebäudes mit transparenter Wärmedämmung. Sensorik in der Haustechnik - kybernetische Regelsysteme. UV-Licht/Infrarotwahrnehmung.
- **Neurobionik:** Gebäudeleitsysteme, BUS-Systeme, Monitoring von Gebäudeteilen
- **Sensorbionik:** Sensorik, Monitoring von physikalischen und chemischen Reizen und deren Umwandlung zu Nervenimpulsen (fühlen-riechen-hören-sehenschmecken), mechanischen Sensoren für Druck, Dehnung, Gleichgewicht, Beschleunigung und Erschütterungen, UV-Licht/Infrarotwahrnehmung, Ultra-/Infraschallwahrnehmung, Wahrnehmung von elektrischen und magnetischen Feldern.
- **Klima-/Energiebionik:** natürliche Belüftung, Energiegewinnung, Idealausrichtung zu Sonne und Wind, passive Lüftung, Kühlung, Heizung, Erdwärme, Gasaustausch unter Verwendung poröser Materialien.
- **Material-/ Werkstoffbionik:** Permeabilität, Recyklierbarkeit, Wärmedämmfähigkeit, - „smart materials“. Die Unterscheidung Werkstoff-Material geht einher mit der Unterscheidung Funktion-Eigenschaft. Eine Klassifizierung erfolgt nach der Art der veränderten Materialeigenschaft. Man unterscheidet dann in:
 - Formveränderbare Materialien
 - Lichtemittierende Materialien

- Farbveränderbare Materialien
 - Phasenveränderbare Materialien
 - Adhäsionsveränderbare Materialien
 - Elektronenemittierende Materialien
 - Energiespeichernde/ -abgebende Materialien
- **Konstruktions-/Strukturbionik:** Seil-, Membran-, Massiv-, Skelettkonstruktionen, Pneukonstruktionen, Formbildungsprozesse, Gesamtkonstruktionen in Pumpen- und Fördertechniken, Hydraulik und Pneumatik, Faltungen.
 - **Baubionik:** Methode zum Entwerfen und Entwickeln der Tragwerksform, sowie der Auswahl, Formung und Fügung der verschiedenen Werkstoffe, Spinnennetzformen - Seilkonstruktionen, Minimalflächen - Seifenblasenhäute, natürliche Rissbildungen - Zugbeanspruchte Systeme - Membrankonstruktionen - Pneumatische Konstruktionen. Ganz nach der bionischen Leitidee – möglichst geringer Material- bzw. Energieaufwand für größtmöglichen Nutzen. Integrierte statt additive Konstruktionen. Pneu, Traglufthallen und pneumatische Dächer.
 - **Organisationsbionik:** Organisation unterschiedlichster Prozesse und Abläufe, Versorgungssysteme, komplexes Management und Organisationsfragen, Querbeziehungen in Ökosystemen, Versorgungssysteme.

6.0 Strategien der Natur

Das Optimum in Bezug auf Schnelligkeit, Energieeinsparung usw. sichert das Überleben. Dies im Wesentlichen um mehr Energie für die Fortpflanzung zu haben.

- **Formoptimierungen:** Dazu gehören z.B. die Formoptimierungen in der Natur. Forscher haben an Pinguinen Fahrtenschreiber befestigt und dann ein Energie-Äquivalent aufgestellt. Mit einem Liter Benzin könnten sie 1500 - 2000 km weit schwimmt. Die Form der Pinguine verringert den Strömungswiderstand und somit auch den Energieverbrauch. Ebenso aufschlussreich ist die Flügel-

preizung bei Vögeln. Bei einem Profil entsteht jedoch auf der Flügelunterseite eine höherer Druck als auf der Flügeloberseite, was zu einer Druckdifferenz, dem sogenannten Auftrieb, führt. Da diese Druckdifferenz jedoch auch an den Flügelenden auftritt, kommt es zu einer Ausgleichströmung, die den sogenannten Wirbelzopf, einen unerwünschten Strömungswiderstand nach sich zieht. Langgestreckte Flügel zur Reduzierung des induzierten Widerstandes, wie bei Albatrossen oder heutigen Segelflugzeugen, sind bei Passagierflugzeugen wegen des immensen Raumbedarfes nicht möglich. Landvögel wie Adler reduzieren diesen induzierten Widerstand durch aufgefingerte Spreizflügel, die mehrere verlustärmere Wirbelzöpfe entstehen lassen, die u.a. zur Idee von Multi-Winglets führte, d.h. fächerförmigen Kanten an den Flügelenden.

- **Miniaturisierung:** Dieser Mechanismus ist ein wesentlicher Bestandteil in fast allen biologisch konstruierten Strukturen. Durch Auflösen der Struktur in mehrere Unterelemente erfolgt ein definierbarer Belastungsfluss durch die Konstruktion. Beispiele dafür sind der leichtgebaute Pelikanschnabel (das Tier würde bei massiver Bauweise einfach vornüber kippen) oder die Spongiosastrukturen eines Oberschenkelknochens.
- **Multifunktionalität:** Der Mechanismus der Bi- oder Multifunktionalität ist von großer Bedeutung, da die Natur immer versucht einem Material, einer Struktur oder einer Funktion mehrere Aufgaben zu geben, damit in der Summe weniger mehr leisten kann. Auch wird jederzeit versucht Synergien zwischen den Aufgaben zu erzeugen. Chitin als einer der Grundbaustoffe der Natur ist elastisch, hydro- und gaspermeabel und transparent, alles Eigenschaften, die wir auch aus der Architektur kennen. Die Multifunktionalität von Hüllen und Häuten in der Natur ist Vorbild für Gebäudehüllen von morgen. Ein naheliegendes Beispiel ist unsere Haut, die Schutz vor Kälte, Hitze und Strahlung, Schutz vor Druck, Stoß und Reibung, Schutz vor Einwirkung chemischer Substanzen, Schutz gegen das Eindringen von Keimen und Schutz vor Wärmeverlusten und Wasserverlust bietet. Die sind alles passive Eigenschaften. Aktiv dagegen ist die Abwehr von in die Haut eingedrungene Mikroorganismen, Resorption (Aufnahme) bestimmter Wirkstoffe, Ausscheiden von Schweiß als Kühlfunktion, Thermoregulation durch Hautdurchblutung, Druck-, Vibration-, Tast-,

Schmerz- und Temperatursinnesorgane sowie ständige Erneuerung. Andere energieoptimierte Hüllen sind zum Beispiel Feder- oder Fellhüllen. In der Natur ist der Schutz vor Wärmeverlust überlebenswichtig. Felle und Federn sind ein Musterbeispiel für hocheffiziente Isolierung. Eine dichte Anordnung von Haaren ermöglicht es kleinste Lufträume einzuschließen und sogar über Neigungsveränderung den Isolierungsgrad zu steuern. Die Tiere können mit ihren optimierten Hüllen in extreme Lebensräume vordringen (z.B.: Polarregionen, selbst das 20 mal besser Wärme ableitende Wasser stellt keine Hürde dar). Die Dichte von Pelzen und Federbälgen kann der Jahreszeit angepaßt werden. Die Haare können bei Bedarf aufgestellt werden, so daß das Fell dicker ist. Zusätzlich erfüllt es Tarnfunktionen und unterdrückt die Reifbildung durch wachsende Schneekristalle.

- **Recycling:** In der Natur entsteht kein Abfall. Was ein Organismus an Rückständen hinterlässt, wird von einem anderen verwertet. Der Mensch hingegen hat eine andere Produktionsstrategie. Unter erheblichem Energieaufwand bauen wir Rohstoffe ab und setzen sie unter hohem Energieaufwand in Konsumgüter um, die dann irgendwann auf Müllbergen enden. In der Natur gibt es diese unsinnige Zerstörungstechnologien nicht. Dem so wenig eleganten Prinzip der Ressourcenentnahme und Abfallanhäufung hat die Natur das Prinzip der totalen Rezyklierung gegenüber gesetzt. Dem technischen Prinzip der Energieerzeugung unter Abfallanhäufung und Umweltzerstörung steht das Naturprinzip der zerstörungsfreien totalen Sonnenenergienutzung gegenüber. Die in Volkswirtschaft wie Industrie nicht in den Griff zu bekommenden Schwierigkeiten beim Management komplexer Systeme sind in der Natur vollendet gelöst funktionierende Symbiosen (Symbioseprinzip – Zusammenwirken von Organismen zu ihrem gegenseitigen Nutzen) z.B. am Waldrand, Blüten der Kastanie – unterschiedliche Farben locken unterschiedlich viele Insekten (Abhängig vom Wachstumsstand der Blüten). Optimierung des Ganzen statt Maximierung eines Einzelelements.

Die Natur zeigt uns einen völlig wiederverwertbaren Kreislauf. Für die Zukunft deutet sich ein weiterer Trend des bionischen Bauens an. Es wächst nicht nur der Respekt gegenüber dem Mikrobereich, sondern auch gegenüber der Na-

tur im allgemeinen. In realisierten Projekten und aktuellen Architekturvisionen wird versucht das Vorbild Natur auf einen größeren Maßstab zu übertragen. Ideale sind geringer Materialaufwand, höchste Energieeffizienz und eine nachhaltige Integration in das Zusammenspiel mit der Umwelt. Ziel wird dabei sein die Stimmigkeit der Natur in den Bereich der Architektur zu übertragen, denn nur so wird eine umweltverträgliche Integration möglich sein, ohne die Balance der Natur zu stark zu gefährden.

Der japanische Architekt Shigeru Ban schuf gemeinsam mit Frei Otto mit dem japanische Pavillon auf der EXPO 2000 in Hannover das größte jemals aus Papier gebaute Gebäude der Welt. Die sich unter rechten Winkeln kreuzenden Innenträger waren aus Papierrollen geformt und bildeten eine komplett selbsttragende Konstruktion. Es war eine sehr stabile, äußerst grazil wirkende und dabei total rezyklierbare Architektur, aus der mittlerweile wieder Papier gemacht wurde.

Das von Werner Sobek realisierte Wohnkonzept R 128 wurde als vollkommen rezyklierbares, im Betrieb emissionsfreies und energetisch autarkes Gebäude entworfen. Es ist modular aufgebaut und aufgrund des intelligenten Zusammenbaus nicht nur leicht auf- und abbaubar, sondern auch vollkommen rezyklierbar. Der im Haus benötigte elektrische Strom wird photovoltaisch erzeugt. Um das Haus als emissionsfreies Nullenergiehaus bauen zu können, wurde ein neuartiges computergesteuertes Energiekonzept entwickelt. Die durch die Fassade in das Gebäude eingestrahlte Sonnenenergie wird über wasserdurchflossene Deckenelemente absorbiert und anschließend einem Wärmespeicher zugeführt, aus dem das Gebäude im Winter durch Umkehrung des Wärmeaustauschprozesses beheizt wird. Die Deckenelemente wirken dann als Wärmestrahler; eine zusätzliche Heizung ist nicht erforderlich.

Die Vision R 129 basiert auf den neuesten Erkenntnissen der Werkstoffkunde, Nanotechnologie, Sensortechnik und Energetik. Es soll aber nicht nur auf dem neuesten technologischen Stand, sondern auch ressourcenschonend, leicht, transparent und ephemer (vergänglich) sein. Ressourcenschonend bedeutet, dass für die Konstruktion des Gebäudes so wenig Material wie möglich ver-

wendet wird, dass das Gebäude während seiner Lebenszeit so wenig Energie wie möglich verbraucht, und dass nach Möglichkeit alle eingesetzten Baumaterialien recycelbar sind. Die multifunktionale Fassade dient als zweite Haut des Menschen. Die Kunststoffhülle soll den Lichteinfall regulieren können und mittels aufgedampfter Solarzellen auch einen Großteil der benötigten Energie gewinnen.

- **Adaptivität:** Die Echsenart *iguana iguana* verändert ihre Hautfarbe, je nach Temperatur: Wenn es kalt ist, wird sie schwarz um Wärme zu absorbieren. Wenn es warm ist, wird sie weiß, um zu reflektieren. In der Haut sitzen Rezeptoren, die die Lichtintensität der Umgebung wahrnehmen. Das Gehirn empfängt die Signale und veranlasst die Ausschüttung von Hormonen, die zur Farbveränderung führen. Dieses Phänomen wird z.B. am Fraunhofer Institut für Bauphysik angewendet. Dort entwickeln Wissenschaftler ein thermotropes Schattierungssystem mit einem aktives Polymer in einer Matrix aus Acryl und Paraffinen, die sich im Scheibenzwischenraum befindet. Bei zunehmender Temperatur verändert sich der Lichtbrechungsindex beider Substanzen in unterschiedlichem Maße. Dadurch kommt es zur Streuung des Lichtes. Das Glas wird eingetrübt bis opak: Bäume und Knochen verfügen über „bauteilinterne“ Rezeptoren, die Spannungskonzentrationen registrieren und durch adaptives Wachstum reparieren können. Sie werden als sogenannte „smart structures,“ bezeichnet. Durch das Verständnis dieser Mechanismen der Selbstoptimierung wurde es möglich, über FEM-Computersimulationen auch technische Bauteile, durch „Wachstum“ zu optimieren, ohne den komplizierten Weg der mathematischen Optimierung zu gehen. Werden Knochen an einer bestimmten Stelle belastet, entstehen Impulse, die an das Gehirn weitergeleitet werden. Das Gehirn veranlasst daraufhin die Ausschüttung von Calcium, welches dann an den impulsangestörten Orten angelagert wird.
- **Selbstreparatur:** Das Thema der selbstständigen, permanenten Erneuerung stellt ein hohes Potential für technische Anwendungen dar. Die Selbstreparatur (Wundheilung) ist ein anpassendes Merkmal aller Lebewesen. Untersuchungsergebnisse dieser Selbstreparaturprozesse (bei Pflanzen) legen eine Umsetzung in technische Anwendungen nahe. Derzeit gibt es erste Ver-

suche selbstreparierende Membranen zu entwickeln. Dazu werden funktionelle, auf die Reparaturmechanismen der Natur basierende, Beschichtungen auf konventionelle Membranen aufgetragen. Diese Beschichtungen ermöglichen eine Selbstreparatur und damit auch eine dauerhafte Stabilität der Membran bzw. des Tragwerkes. Tragstrukturen könnten so nachdrücklich verbessert werden. Die Basis für die Entwicklung dieser Beschichtung liefert das Pfeifenwindengewächs (*aristolochia*), welches in der Lage ist Verletzungen abzudichten. Entsteht ein Riss im Festigungsgewebe, so quellen benachbarte Grundgewebezellen in den entstandenen Riss und verschließen ihn. Die Grundgewebezellen beginnen sich zu teilen und dichten damit die Verletzung ab. Dieser Selbstreparatureffekt wird bei der beschichteten Membran mittels Polyurethanschaum, in dem Überdruck herrscht, erzeugt. Wird die Membran verletzt, quillt der Schaum in den Riss und dichtet diesen ab.

- **Energiewandlung:** Der Mechanismus der Energiegewinnung unter Verwendung von Sonnenenergie ist eine der wichtigsten Energieformen in der Natur. Geradezu perfekt löst diese Energiewandlung die Photosynthese, die Inspiration für Photovoltaikmodule. In der belebten Welt benötigen z.B. Schmetterlinge für das Funktionieren des Muskelmotors im Thorax eine Innentemperatur von ca. 40°C. Sie richten ihre Flügel zur Sonne und fangen damit Sonnenenergie ein. Die einzelnen Schuppen sind so konstruiert, dass die eingefangene Wärme in Luftkammern gespeichert werden kann und auf den Muskelmotor geleitet werden kann.

7.0 Transferpotentiale Bionik

Im Folgenden werden Potenziale aufgezeigt, die dem Architekten die Möglichkeit geben mittels Transferleistungen Ideen und Phänomene aus der Natur in die Architektur zu übernehmen. Dabei müssen Schnittstellen ausgebildet werden, die dem Architekten ermöglichen sich einfach und sicher in diesem äußerst komplexen Themenfeld natürlicher Systeme zu bewegen. Die Transdisziplinarität des Forschungsfeld Bionik ist dabei für den Architekten keineswegs eine ungewöhnliche Denkweise. Er ist es gewohnt in seiner alltäglichen Tätigkeit in unterschiedlichen

Themenbereichen firm zu sein und moderativ zwischen den Fachdisziplinen zu agieren. Diese Fähigkeit des Architekten ist eine wesentliche Eigenschaft und Grundvoraussetzung für „Bionisches Denken“.

7.1 Schnittstellenbildung Architektur-Natur

Schnittstelle bedeutet in diesem Kontext affine Systeme aus der Architektur und Natur gegenüberzustellen. Sinnvoll ist an dieser Stelle eine Kategorisierung, die schon durch die Begrifflichkeiten Schnittstellen zwischen den natürlichen und den anthropogenen Systemen bilden.

- **Material:** Material ist, aus bautechnischer Sicht gesehen, der Werkstoff aus dem ganze Baukörper, bzw. Gebäudeteile bestehen und der spezifische Eigenschaften aufweist bzw. Aufgaben erfüllt.

In der Natur versteht man unter Material Ein- oder Mehrkomponentenstoffe, die ihre Eigenschaften nicht festgelegt haben und sich an äußere Beanspruchungen anpassen können. Sie reagieren aktiv auf äußere Veränderungen wie Spannung, Temperatur, Belastungen oder Strahlungen und reagieren adaptiv, spontan reversibel oder sogar gleitend justabel. Die Wahl des Materials orientiert sich in der Natur durch Materialersparnis, Bündelung, Schichtenaufbau, hierarchische Funktionalität, Selbstreparatur, Molekulare Gitterstruktur und Multifunktionalität

- **Struktur:** Struktur bzw. Konstruktion wird in der Architektur als die formgebende Disziplin verstanden.
In der Natur versteht man unter Struktur die Fähigkeit einer Konstruktion aufgrund des Zwanges zur Selbstoptimierung die der Anforderung entsprechende Wirkung aufzubauen. Das Fügen dieser entweder ganzheitlichen oder in Teilen funktionierenden Konstruktion wird durch das Fügen ergänzt oder erst möglich. Dabei benutzt die Natur Reiz- und Erregungsumwandlung, Kopplung, Stoßdämpfer, Klappen, Klammern, Aufnehmen oder Aufblasen um eine Struktur zu entwickeln.

- **Funktion:** Die Funktion eines Gebäudes als oberstes Entwurfscharakteristikum definiert die Nutzung und die Organisation im Gebäude bzw. in Gebäudeteilen.

In der Natur versteht man Funktion primär sich optimierende ablaufschematische Prozesse, die auf dem Grundprinzips der Selbstorganisation der Natur basieren. Dabei gelten folgende Prinzipien wie Energieeinsparung, Geometrische Ordnung, Verzweigung, Biegen, Falten, Aufrollen, Verpacken und Auf-fächern

7.2 Transferansätze Architektur-Natur

- **Zufällige Analogien:** Die Technik konstruiert unabhängig von der Natur, zufällige Analogien zeigen dann ähnliche Mechanismen. Die Natur hat diese Verfahrensweise jedoch vor Tausenden von Jahren bereits entwickelt. Zufällige Analogien können Anlass bieten eine gezielte Analogieforschung zu betreiben. Ein Beispiel wäre die Analogie zwischen dem Bombardierkäfer und dem Space-shuttle. Damit der Treibstoff eines Space-Shuttle nicht sofort explodiert, ist er in zwei verhältnismäßig harmlose Komponenten getrennt: dem Brennstoff und dem Oxidator. Erst wenn beides in die Brennkammer gelangt, kommt es zur Reaktion. Der Bombardierkäfer setzt sich schon seit Tausenden von Jahren nach dem gleichen Prinzip gegen Feinde zur Wehr. Auch er hat zwei Reservoirs, die je zwei Substanzen voneinander getrennt halten. Wenn er beide Substanzen in seine Brennkammer spritzt, so schießt in Sekundenbruchteilen ein 100 °C heißes, stark ätzendes Flüssigkeitsgemisch aus dem Hinterleib.
- **Analogieforschung:** Bewusste Gegenüberstellung eines Verfahrens oder einer Konstruktion der Natur und der Technik, Wirtschaft oder aus anderen Bereichen, die sich im Hinblick auf das Verfahren oder der Konstruktionsweise ähnlich sind. Dort wird nun analysiert, wie die Natur die selbe Problemstellung an bestimmten Stellen gelöst hat, um daraus Anregung für Lösungen in der Technik, Wirtschaft etc. zu generieren. Einfaches Beispiel wäre die Unter-

suchung der Spreizfedern bei großspannigen Gleit- oder Raubvögeln zur Optimierung des Strömungsabrisses bei Starrflüglern wie den modernen Langstreckenflugzeugen. Die typischen "winglets" der Starrflügler sind Produkte der Analogieforschung.

- **Geistesblitz:** Eine andere Möglichkeit bionischen Vorgehens ist der Geistesblitz oder anders der "Heuristische Funke". Man sieht etwas in der Natur und assoziiert sofort eine technische Anwendung dafür. Naheliegendes Beispiel dafür wäre die direkte Analogie eines mehrfeldrigen Spinnennetze und den hängenden Dächern des Olympiastadions in München von Frei Otto. Entscheidend dabei ist, daß bei diesen heuristischen Ansätzen oft eine formale Analogie mit einer funktionalen Analogie einhergeht. Dies sicherlich auch, weil die Bausteine visueller Art sind und man durch "sehen" entdeckt.
- **Kreislaufbetrachtungen:** Organe, Populationen oder Ökosysteme funktionieren reibungsfrei - und das seit Jahrtausenden von Jahren. Selbst primitiv konstruierte Mikroorganismen arbeiten störungsfrei und extrem Fehlertolerant. Der Mensch hingegen verfügt über ein Gehirn mit einer Schaltkapazität, die von keinem anderen Organismus erreicht wird - kann aber keine Systeme herstellen, die auf Dauer reibungsfrei funktionieren. Eine weitere Möglichkeit bionisch zu arbeiten bedeutet, die Überlebensstrategien der Natur zu analysieren und auf eine allgemeine Ebene zu transformieren, um diese dann in anderen Bereichen (Technik, Wirtschaft, Architektur,..) anzuwenden. Diese Strategien könnten uns aus technischen Sackgassen herausführen. Ein Beispiel dafür sind Javaflugfrösche, ein tropischer Frosch der auf Bäumen lebt. Diese Frösche legen ihre Eier in Gewässer. Er schlägt sein Körpersekret durch Strampeln der Hinterbeine zu einem Schaumgehäuse. Die Außenschicht härtet durch; innen ist es flüssig. Dort spritzt der Frosch die Eier ein. Dank dieser Überlebensstrategie können im flüssigen inneren die Kaulquappen heranreifen. Mit zunehmender Eireife verflüssigt sich das Schaumnest und löst sich nach Schlüpfen der Kaulquappen von selbst rückstandsfrei auf.
- **Kybernetische Sichtweise:** Die Natur ist ein vermaschtes System aus unzähligen Regelkreisen. Ein Regelkreis ist ein geschlossener Wirkungskreis,

in dem eine bestimmte Größe (z.B. die Körpertemperatur, Blutzuckerspiegel) durch Regeleinrichtungen (z.B. Rückkopplung) innerhalb gewisser Grenzen auf einem vorgegeben Wert gehalten wird. Es gibt ein Regler, einen Fühler, Soll- und Istwerte werden verglichen und bei Abweichungen korrigiert. Ein Beispiel dafür ist die Regelung der Schilddrüsenhormone. Wenn zuwenig Trijodthyronin (T3T4) im Blut enthalten ist, wird das sofort registriert. Das Gehirn veranlasst dann die Schilddrüse zur Ausschüttung der Hormone.

- **Kreativitätstechnik:** Wenn wir die Lösung eines Problems suchen, finden wir vielleicht 2-5 Ideen. Die Natur bietet aber meist unzählige Möglichkeiten zur Lösung des Problems. Bionik als Kreativitätstechnik zu verwenden würde bedeuten möglichst viele unterschiedliche Strategien der Natur zur Lösung des gleichen Problems zu betrachten, da die Natur nicht nur über einen größeren Fundus an Lösungsmöglichkeiten verfügt, sondern auch über einen unkonventionellen. So sind beispielsweise Saugnäpfe stabile Verbindungen, die sich wieder leicht lösen lassen. Während die Technik eine minimale Zahl an Saugnäpfvarianten kennt, hat die Natur Saugnäpfe aufs Extremste kultiviert. Die Saugnäpfe eines Tiefseetintenfisches, der auf einem Pottwal tellergroße Abdrücke hinterlässt, sind anders konstruiert, als die Saugnäpfe von Insektenlarven, die auf glitschigen Steinen an Wasserfällen leben. Bionik kann auch ein Anporn für die Umsetzung utopischer Ideen sein - vor allem, wenn die Natur bereits Ähnliches geschafft hat. Schlangen können sehen, obwohl sie fast blind sind. Die Grubenotter kann Temperaturdifferenzen von 0,003 °C registrieren. Forscher versuchen nun eine Wärmekamera zu entwickeln, indem sie die Umgebung in Wärmewerte auflösen wollen, die Blinde dann auf einem Bildschirm oder Foto erfühlen können. Maschinen sind dem Menschen im Hinblick auf das ‚Brute-Force-Prinzip‘ (=absolute Rechenkraft) überlegen. Das Assoziieren (Denken in Zusammenhängen, interdisziplinäres Denken, Muster-Erkennung) sind Fähigkeiten, die bis jetzt nur das menschliche Gehirn leisten kann. Die Ursache dafür liegt an den zahlenmäßig kaum noch vorstellbaren Kreuz- und Querverbindungen der zehn Milliarden Nervenzellen des Gehirns. In Mikrochips versucht man das natürliche Verschaltungsprinzip zu kopieren. Das kreative Kunsthirn ist jedoch bis jetzt noch in unerreichbarer Ferne.

Teil 2 - Anforderungen

Vorbemerkungen

Im Teil 2 werden die Wechselwirkungen von nutzungsbedingten Anforderungen, witterungsbedingten Einflüssen und der Gebäudehülle untersucht. Anhand dieser Untersuchungen soll aufgezeigt werden in welchem Spektrum sich die Bewertung einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle bewegt und auf welche Parameter die Bewertung besonderes Augenmerk richtet. In Abb. 0.0.1 sind die Wechselwirkungen der bauphysikalischen Eigenschaften am Beispiel von Verwaltungsgebäuden nach Anforderungen, Energieverbrauch und witterungsbedingten Einflüssen aufgetragen. Diese wesentlichen Faktoren klassifizieren die Anforderungen und geben damit den Rahmen der Auswertung vor. Die Anforderungen aus der Nutzung (Nutzungsbedingte Anforderungen) sind maßgeblich vom Komfortanspruch des Nutzers bestimmt. Dem gegenüber stehen die witterungsbedingten Einflüsse, die je nach Klimazone unterschiedliche Diskrepanzen zur den Anforderungen aus der Nutzung aufweisen. An der Schnittstelle von thermisch kontrollierten und thermisch unkontrollierten Bereichen hat die Gebäudehülle die Aufgabe diese Unterschiede zwischen Anforderung und Einfluss zu balancieren. Im Sinne der Gewährleistung von Behaglichkeit und Komfort leistet die Gebäudehülle an dieser Stelle Arbeit, die wiederum im Energieverbrauch messbar ist.

Der Einsatz von Gebäudetechnik wird dabei als unterstützendes System gesehen, dessen Gesamtenergiebalance von Bedeutung ist.

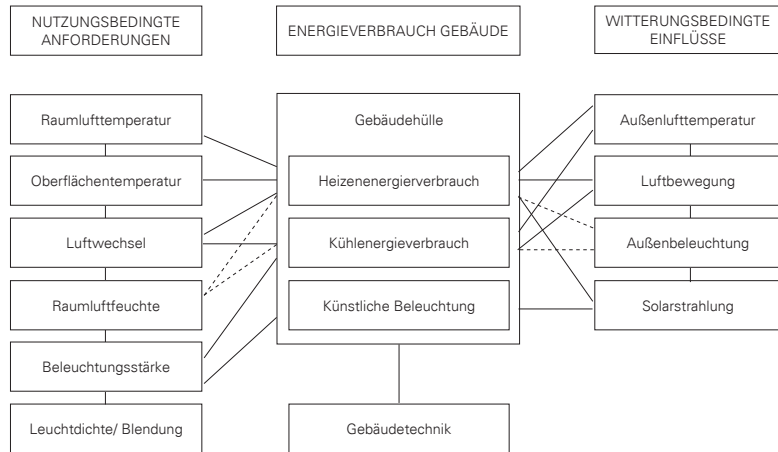


Abb.0.0.1: Wechselbeziehung von Nutzungsanforderungen und witterungsbedingten Einflüssen und dem Energieverbrauch

1.0 Nutzungsbedingte Anforderungen

Der Komfort oder die Behaglichkeit können als vom Menschen empfundene Eigenschaften angesehen werden, die im Wesentlichen von den Faktoren Raumlufttemperatur, der umgebenden Oberflächentemperatur und der im Raum befindlichen Luftbewegung abhängen. Im Folgenden werden diese Einflussgrößen beschrieben:

1.1 Raumlufttemperatur

In der DIN-Norm und den VDI-Richtlinien wird der Behaglichkeitsbereich für die Raumlufttemperatur zwischen +20°C und höchstens +25°C eingestuft. Im Sommer können Maximalwerte von +27°C als Spitzenwerte akzeptiert werden. In der Realität werden diese zulässigen Werte jedoch häufig durch vertragliche Regelungen zwischen der Bauherrschaft und den Planenden/Ausführenden nach unten korri-

giert und stehen des Öfteren einer breiten Anwendung von z.B. natürlich belüfteten Systemen im Wege. Besser bekannt ist diese Entwicklung unter dem Terminus "26°C Urteil" des Landgerichtes Hamm von 1994.

1.2 Mittlere Temperatur der umgebenden Oberflächen

Die umgebende, mittlere Oberflächentemperatur sollte sich nicht mehr als 2-3K von der Raumlufttemperatur unterscheiden, Innerhalb der Oberflächentemperaturen sollten keine größeren Unterschiede als 3-4 K auftreten, um eine behagliche Umgebung zu gewährleisten.

1.3 Relative Raumfeuchte

In Abhängigkeit von der Raumtemperatur wird ein behagliches Raumklima bei einer relativen Raumfeuchte von 30% bis 70 % empfunden. Andere Autoren grenzen diese Bandbreite weiter ein und setzen die Grenzen bei 40-60% relativer Raumfeuchte an. Zur Verdeutlichung kann angeführt werden, dass eine relative Raumfeuchte von 70% allgemein schon als überfeuchtet oder schwül angesehen wird.

1.4 Raumluftgeschwindigkeit

Die mittlere Luftgeschwindigkeit im Raum sollte aus Gründen der thermischen Behaglichkeit zur Vermeidung von Zugscheinungen gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Die zulässige Luftgeschwindigkeit v liegt nach DIN 1946 T 2 (bei Aktivitätsstufe I) je nach Lufttemperatur and Turbulenzgrad etwa zwischen 0,15 and 0,4 m/s .

1.5 Beleuchtungsstärke

Die in den Arbeitsstättenrichtlinien ASR 7/3 und der DIN 5035, Teil 2, aufgeführten

Richtwerte für Beleuchtungsstärken definieren die Anforderungen für die künstliche Beleuchtung von Räumen. Die darin genannten Nennbeleuchtungsstärken werden in die Abhängigkeit von Tätigkeit, Raumzuschnitt und der Entfernung des Arbeitsplatzes zum Fenster gesetzt.

Arbeitsplatz in Fensternähe	300 lux
Normale Zellenbüros	500 lux
Großraumbüro, hoch reflektierende Oberflächen	700 lux
Großraumbüro, wenig reflektierende Oberflächen	1000 lux

Abb. 1.5.1: Unterschiedliche Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz

Die angegebenen lux-Werte beziehen sich dabei auf die Beleuchtungsstärke unmittelbar am Arbeitsplatz. Diese Anforderungen sind klare Definitionen für den Bedarf an Tageslicht und die daraus resultierenden Kunstlichtaufwendungen. Aus diesen Forderungen können Ziele abgeleitet werden, die eine Maximierung an Tageslichteintrag bedeuten und den Eintrag an solarer Wärmestrahlung minimieren. Ein weiterer Aspekt der energetischen Betrachtung ist, dass durch den Einsatz von künstlicher Beleuchtung auch die zu kühlende Last steigt, d.h. ein doppelter Verlust, bedeutet doch der Einsatz elektrischer Energie einen Verlust wie auch der erhöhte Abtrag von Kühllasten.

1.6 Leuchtdichte

Definiert ist die Leuchtdichte als Maß für die „gesehene Helligkeit“. Die Leuchtdichte ist der Lichtstrom je Fläche und Raumwinkel. Das menschliche Auge empfindet Leuchtdichteunterschiede als Helligkeitsunterschiede. Sie wird in cd/m^2 (Candela/Quadratmeter) gemessen. Für die Vermeidung von Blendung spielt die Leuchtdichte eine große Rolle und sollte etwa $2/3$ bis $1/10$ der Innenfelddleuchtdichte ausmachen.

2.0 Witterungsbedingte Einflüsse

2.1 Aussenlufttemperatur

Lokale und klimatische Abhängigkeiten bestimmen das Schwanken der Aussenlufttemperatur im Jahres- und Tagesablauf. Dabei schwanken die mittleren monatlichen Aussenlufttemperaturen in Deutschland von $-3,2^{\circ}\text{C}$ im Januar bis $+17,2^{\circ}\text{C}$ im Juli. Die Spitzenwerte der absoluten Außenlufttemperatur liegen dabei deutlich darunter oder darüber. In Stuttgart werden im Sommer- bzw. Winterhalbjahr Werte von bis zu -18°C bzw. $+42^{\circ}\text{C}$ erreicht. Diese Schwankungen entsprechen dann einer Breite im Jahresverlauf von über 50K. Zoomt man von Jahresablauf über den Monatsablauf bis zum Tagesablauf, sind gewöhnlich 10K Schwankung zu verzeichnen, die Extrema liegen bei bis zu 20K. Diese Werte haben auch für die Betrachtung der an der Fassade auftretenden Temperaturen eine Tücke, werden sie doch im Schatten gemessen und nicht auf der Oberfläche. Die Temperaturen an der Oberfläche oder kurz darüber liegen daher deutlich höher und variieren dementsprechend stärker. Für die Temperierung von Bürogebäuden im Sommer sind vor allem Kühllasten abzutragen. Die Berechnung von Kühllasten basiert auf der Aussentemperatur im Sommer und wird nach VDI-Richtlinien (2078) für Deutschland mit max $+32^{\circ}\text{C}$ angesetzt. Ausgenommen ist dabei die norddeutsche Küste, die deutlich niedrigere Werte aufweist. Für die Berechnung des Wärmebedarfs eines Gebäudes dient die sogenannte „Isothermenkarte“, die das tiefste Zweitagesmittel der Lufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$ angibt. Ausschlaggebend ist dabei die DIN 4701. In Stuttgart liegt dieser Wert bei $-22,8^{\circ}\text{C}$.

2.2 Luftbewegung

Entscheidend für den Einfluss des Windes oder Luftbewegung allgemein ist die Dichtigkeit der Gebäudehülle und der Fügepunkte im Besonderen. Dies hat direkte Auswirkungen auf den Energiehaushalt, bedeutet unkontrollierter Luftaustausch von Innen und Aussen u.U. auch Verlust von Wärme.

2.3 Außenluftfeuchte

Da der erträgliche und dem Menschen zumutbare Schwankungsbereich der relativen Luftfeuchte der Außenluft in unseren Breitengraden eher gering ist, spielt er nur indirekt eine Rolle bei der Betrachtung des Energiebedarfs von Gebäuden. Lediglich in der kalten Jahreszeit muss davon ausgegangen werden, dass die relative Aussenluftfeuchte unter 40% fallen kann. Bei klimatisierten Gebäuden muss dann die Aussenluft zusätzlich befeuchtet werden. Im Sommer dreht sich dies um und es muss die zu kühlende Luft getrocknet oder entfeuchtet werden.

2.4 Solarstrahlung

Die Solarkonstante, also die auf die Erdatmosphäre treffende Solarstrahlung, liegt bei 1350 W/m^2 . Während dieser Wert konstant ist, schwankt die Globalstrahlung erheblich. Dies wird beeinflusst durch die Faktoren:

- Direkte Sonnenstrahlung
- Indirekte Sonnenstrahlung
- Bewölkungsanteil
- Zusammensetzung der Atmosphäre
- Strahlengänglänge durch die Luft

Zur Erläuterung kann gesagt werden, daß bei klarem Himmel über Stuttgart ca. 900 W/m^2 gemessen werden, entgegen ca. 45 W/m^2 bei bewölktem Himmel. Im Jahresmittel liegen die Werte bei 950 W/m^2 , wobei die Tagesmittel zwischen dem Sommer und dem Winter mit dem Faktor 8 voneinander abweichen. Diese Werte sind alle nach Angaben auf horizontalen Flächen ermittelt und müssen bei einer Betrachtung von Fassadenflächen nach Himmelsrichtung unterschieden werden. Bei Verwaltungsgebäuden sind die internen Kühllasten im Sommerhalbjahr die kritischen Lastfälle und es tritt von April bis Anfang August mehr Strahlung auf der Ost- und Westfassade auf als auf der Südfassade. Nur außerhalb dieses Zeitraumes trifft auf die Südfassade mehr Strahlung auf als auf die Ost- und Westfassade.

	Tagessumme Globalstrahlung Süd- fassade	Tagessumme Globalstrahlung Ost-/ Westfassade
Anfang Januar Standort Würzburg	1,7 kWh/m ² d	0,7 kWh/m ² d
Direktanteil	75%	43%
Diffusanteil	25%	57%
Anfang Juli Standort Würzburg	2,9 kWh/m ² d	3,1 kWh/m ² d
Direktanteil	31%	37%
Diffusanteil	69%	63%

Abb. 2.4.1: Tagessumme der Globalstrahlung auf unterschiedlich ausgerichtete Fassadenflächen am Standort Würzburg

3.0 Energieverbrauch und Gebäudehülle

Aufgrund der im Vorfeld beschriebenen Schwankungen, der ein Gebäude umgebenden Bedingungen in unseren Breitengraden, sollte die Gebäudehülle ein hohes Maß an Anpassbarkeit zur Verfügung stellen, um einen behaglichen und komfortablen Innenraum auszubilden. Dabei steht der Einsatz von Energie im direkten Verhältnis zur Anpassbarkeit der Gebäudehülle. Je besser sich die Gebäudehülle an die Außenbedingungen anpassen kann, desto geringer wird der Energieeinsatz sein, den das Gebäude benötigt, um sich im Inneren für den Menschen behaglich einzustellen. In den folgenden beiden Diagrammen wird verdeutlicht, welche direkten Auswirkungen sich ergeben, wenn man die Gebäudehülle energetisch optimiert. Betrachtet man den Primärenergiebedarf moderner Industrienationen wird deutlich, welcher hohen Anteil die Gebäude einnehmen. Diese wiederum zum größten Teil zum Heizen und zu einem geringeren Teil zum Kühlen. Dies liegt daran, daß verhältnismäßig viel mehr Wohngebäude mit unzureichender Wärmedämmung geheizt werden müssen, als Bürogebäude mit unzureichender Gebäudehülle gekühlt werden müssen.

Innerhalb des Energieverbrauches von Gebäuden ist die Gebäudehülle in großem Maß für den Energieverlust und damit für den Energiebedarf von Gebäuden verantwortlich. Daher wurde diese Bauteilgruppe als zu optimierende Zielbaugruppe ausgewählt. Da die Gebäude selbst ca. 47% des gesamten Energiebedarfs moderner Industrienationen ausmachen, erhöht sich die Bedeutung energiegerechter Gebäudehüllen proportional.

Die Hauptfunktionen wären demnach:

- winterlicher Wärmeschutz
- sommerlicher Wärmeschutz
- Ausnutzung des Tageslichtes
- Luftaustausch

Der Vollständigkeit halber sind hier die Kennwerte für die Erfassung der o.a. Größen angegeben:

- U-Wert: der Wärmedurchgangskoeffizient (ehem. k-Wert) gibt den Wärmehinübergang von Außenwandkonstruktionen in W/m^2K an.
- g-Wert: der Gesamtenergiedurchlasswert gibt an, welcher Anteil der auf eine transparente oder transluzente Außenwandkonstruktion treffenden Solarstrahlung in den dahinterliegenden Raum abgegeben wird. Dieser Wert ergibt sich aus der Summe der transmittierten Strahlung und der Wärmeabgabe der inneren Scheibe. Die g-Werte heutiger Isolierverglasungen liegen in der Regel bei 60 bis 80 %.
- τ_{vis} -Wert: der Tageslichtdurchlassgrad gibt an, welcher Prozentsatz der außerhalb einer Außenwandkonstruktion vorhandenen Helligkeit im Inneren gemessen wird. Ein typischer Wert bei heutigen Isolierverglasungen liegt bei etwa 70%.
- z-Wert: der Abminderungsfaktor z gibt an, welchen Anteil der auftreffenden Strahlungsenergie von einem Sonnenschutzsystem durchgelassen wird.
- Luftwechselrate: Bestimmung des Luftaustausches eines Raumes bezogen auf das Raumvolumen bei einer Maßeinheit von 1/h.

Der Idealzustand sollte also sein, eine Gebäudehülle zu konzipieren, die in Harmonie mit den Außenbedingungen steht und dabei Kühl- oder Wärmelasten ausgleichen kann, ohne zusätzliche Energie für die Konditionierung zu benötigen. Dies impliziert dann die Minimierung des im Gesamthaushalt benötigten Einsatzes fossiler oder anderer Brennstoffe. Typischerweise ist der zusätzliche Bedarf an Energie bestimmt von:

- Heizenergieverbrauch
- Kühlenergieverbrauch
- Energieverbrauch für Kunstlicht
- Energieverbrauch für klimatechnische Anlagen

Anhand des Energieverbrauchs eines Verwaltungsgebäudes kann das Leistungsvermögen der Gebäudehülle bestimmt werden, das sich in den letzten Jahren massiv verändert hat. Ebenso verändert haben sich die Energiebedarfsströme der Nutzung dieser Gebäude. Ein durchschnittlicher Kennwert für den Energiebedarf eines Verwaltungsgebäudes liegt bei ca. 380 kWh/m²a. Niedrigenergiegebäude können einen Kennwert von 130 kWh/m²a und darunter erreichen.

3.1 Heizenergieverbrauch

Betrachtet man den Energieverbrauch im Kontext mit anderen Energieverbrauchern, ergibt sich ein Energieverbrauch zur Erwärmung von Raumluft in Gebäuden von ca. 35% des Gesamtenergieverbrauchs Deutschlands.

Der Heizenergieverbrauch wird errechnet aus der Deckung von Verlusten aus Transmission und Lüftung, bekannt als Q_t (Transmissionswärmeverluste) und Q_l (Lüftungswärmeverluste). Die DIN 4108 [20] und die ENEC definieren die Mindestanforderungen. Den Wärmeverlusten stehen die Wärmegewinne gegenüber, die wiederum aus externen und internen Gewinnen resultieren. Die externen Wärmegewinne können als gleichbleibende Konstante angesehen werden und sind je nach Konzeption auf den Gesamthaushalt mehr oder weniger einflussreich. Bei den internen Wärmegewinnen muss dagegen eine Unterscheidung nach der Nutzung erfolgen. Zum Beispiel haben interne Geräte und künstliche Beleuchtung einen anderen Wärmegewinn aus Abwärme als man bei einem Wohngebäude veranschlagen kann. Bei heutigen Verwaltungsgebäuden kann durchschnittlich von einem Heizenergieverbrauch von 80 bis 150 kWh/m²a ausgegangen werden. Man muss sich verdeutlichen, dass ein gut gedämmtes Verwaltungsgebäude heute bei -10°C Außentemperatur einen Heizwärmebedarf von ca. 15 W/m² hat, ab 0°C kann dies schon durch interne Wärmegewinne ausgeglichen werden.

3.2 Kühlenergieverbrauch

Der Kühlenergieverbrauch ist bestimmt durch:

- Wärmegewinne durch Solarstrahlung
- interne Wärmegewinne
- Luftwechselrate

Die Wärmegewinne durch Solarstrahlung liegen in Abhängigkeit der Orientierung bei Werten zwischen 400 und 700 W/m². Die internen Wärmegewinne werden nach VDI 2067 bezogen auf die Einschaltdauer von künstlicher Beleuchtung oder Büromaschinen mit folgenden Werten angegeben:

Nutzer	7 W/m ²
Büromaschinen	5 W/m ²
Beleuchtung	15 W/m ²
In der Summe:	27 W/m ²

Abb. 3.2.1: Durchschnittliche interne Wärmegewinne nach VDI 2067

Im Winter sind diese internen Wärmegewinne durchaus in die Bilanz zur Berechnung des Heizenergiebedarfs einzurechnen und ein positiver Effekt zur Minimierung des Heizenergiebedarfs. Im Sommer führt dies jedoch zu einem erhöhten Kühlenergiebedarf, was den positiven Nutzen relativ erscheinen lässt. Zieht man in Betracht, dass die Bereitstellung kühler Luft viermal soviel Energie benötigt wie das Wärmen von Luft, erscheinen die internen Wärmegewinne umso mehr von relativem Nutzen.

3.3 Energieverbrauch für Kunstlicht

Der Energieverbrauch für das Bereitstellen von Kunstlicht liegt bei ca. 10% des gesamten Energieverbrauchs Deutschlands. Die Ausbildung der Gebäudehüllen bestimmt diesen Wert ähnlich wie beim Heiz- oder Kühlenergieverbrauch. Dazu

kommt die Möglichkeit der Steuerung von Kunstlicht, die wiederum Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Betrachtet man den Faktor der Lichtausbeute von Tageslicht mit 120-150 Lumen/Watt gegenüber 30-50 Lumen/Watt bei Kunstlicht, liegt nahe, dass durch Einsatz von Tageslicht per se eine Minimierung des Energieverbrauchs für die Belichtung von Räumen stattfindet. Auch durch Steuerung der Einschaltzeiten lassen sich deutliche Senkungen erreichen, so z.B. um die 9 kWh/m²a bei Gebäuden die kontrolliert (30% Verglasungsanteil) sind gegenüber ca. 30 kWh/m² bei ungesteuerten (10% Verglasungsanteil) Gebäuden.

3.4 Energieverbrauch für klimatechnische Anlagen

Da die technische Spezifikation der Raumluftkonditionierung einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch eines Gebäudes hat, werden die gängigen RLT (Raumluftechnische Anlagen) hier erläutert:

- reine Lüftungsanlagen, die den hygienisch notwendigen Luftwechsel herstellen
- Teilklimaanlagen, die die Luft temperieren
- Klimaanlagen, die die Luft sowohl temperieren wie auch filtern und befeuchten

Da die RLT-Anlagen einen enormen energetischen Verbrauch aufweisen, ist dort auch sehr hohes Einsparpotential zu erwarten. Entscheidend dafür sind die Art der Luftführung, das Trennen der Funktionen Luftwechsel, Kühlen und Heizen und die Technik der Wärmerückgewinnung. Z.B. benötigen allein die Ventilatoren für die Quelllüftung ca. 13 kWh/m²a, was bei einem Gebäude 1/3 des Gesamtstromverbrauchs ausmachen kann. Der Wärmeenergiebedarf für die Konditionierung von Luft liegt da bei 34 kWh/m², was 29% des Gesamtwärmebedarfs für Brauchwasser, Heizen und Kühlen entspricht.

4.0 Subsystem im Gebäude

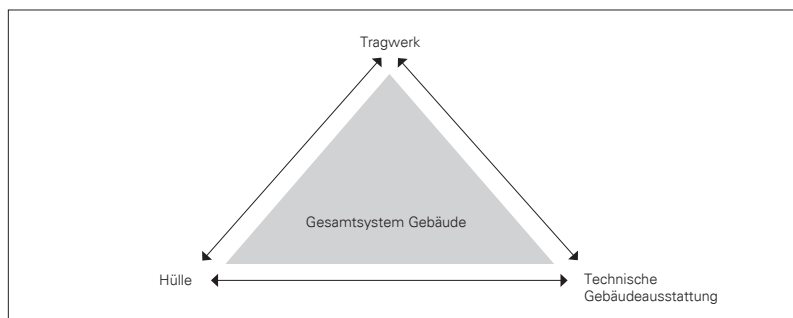


Abb. 4.0.1: Subsysteme im Gebäude

Für die Beurteilung des Gesamtsystems Gebäude werden im Folgenden Bauteilgruppen unterschieden, die die Betrachtung in energetischer Hinsicht erleichtern und die wesentliche Funktionsunterschiede in sich haben. Das enorm komplexe Gebilde „Gebäude“ kann in drei Subsysteme unterschieden werden, in das Tragwerk, in die Hülle und in die Technik. Die Unterscheidung in diese drei Systemgruppen ermöglicht dabei die Klassifizierung und Annäherung zu biologischen Systemen, die zumindest ähnliche Strukturen aufweisen. Hier erfolgen dann auch die ersten Analogieversuche, die die anthropogenen Systeme mit den natürlichen Systemen vergleichen.

Mögliche Definitionen wären:

- Tragwerke sind in dieser Betrachtung die strukturbildenden Systeme, die zur Abtragung innerer und äußerer Lasten dienen.
- Hüllen sind die den Raumabschluss bildenden Systeme, die zusätzlich die Funktionen an der Schnittstelle von thermisch kontrollierten und thermisch unkontrollierten Bereichen übernehmen.
- Technik sind alle Innen- und Zwischenraumbildenden Systeme, die vorrangig technische Systeme zur Konditionierung des thermisch kontrollierten Be-

reiches beinhalten. In der Abb. 9 können die Zusammenhänge der Dreiecksmatrix einfach nachvollzogen werden.

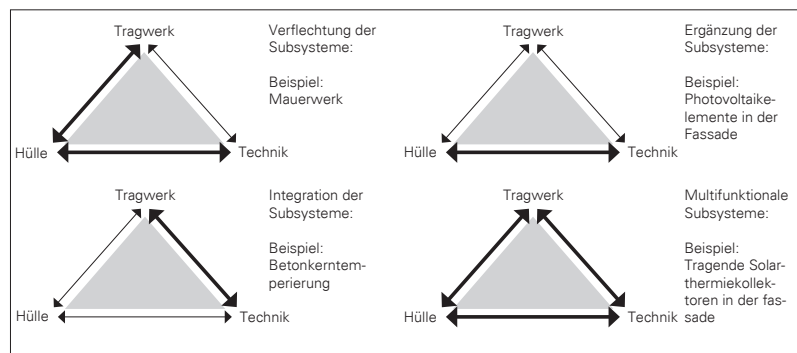


Abb. 4.0.2: Abhängigkeiten der Subsysteme untereinander

4.1 Tragwerk

Die verschiedenen, höchst unterschiedlichen Arten von Tragwerken haben ihren Ursprung zunächst in den jeweiligen Materialien und den zugehörigen Baumethoden: dem Massivbau und später dem Skelettbau. Dabei stehen diese Bezeichnungen nicht so sehr für zwei Gruppen von Baustoffen als vielmehr für zwei grundsätzlich verschiedene Arten des Bauegefüges: im Massivbau ein schwerer homogener Mauerkörper, in dem die Druckkraft gleichmäßig verteilt ist; im Skelettbau dagegen ein dünnes, leichtes Gerippe von biegungsfesten Tragstäben. Über diese, zunächst rein materiellen Unterschiede hinaus, sind es jedoch noch andere Eigenschaften, welche beide Tragwerksarten voneinander trennen. Fußt nämlich der Massivbau vielfach auf einfachen und oft primitiven technischen Voraussetzungen, stellen die aus Stützen und Trägern gefügten Skelette deutlich höhere Anforderungen. Ihre Planung und Erstellung erfordern eine weitgehende Arbeitsteilung und das heißt eine Entflechtung von Tragwerk, Hülle und Technik. Im Gegensatz zum Massivbau, gilt der Skelettbau als Herausforderung des Ingenieurbaus. Die im Laufe der

Jahrhunderte entwickelten unterschiedlichen Arten von Tragwerken sind durch verschiedene Parameter bestimmt. Größe und Umfang des Bauwerks, sind durch die Aufgabe, der das Bauwerk dient, bestimmt. Durch das Material, das für das Bauwerk zur Verfügung steht, durch die Fähigkeiten und Kenntnisse im Umgang mit den Materialien und durch die Methoden der Bautechnik. Es ist verständlich, daß die Art des Tragwerks zunächst von der Größe des Bauwerks abhängt. Für normale Bauten mit eher bescheidenen Dimensionen stand über viele Jahrhunderte hinweg nur eine sehr beschränkte Zahl von Materialien und Methoden zur Verfügung. Es waren dies einerseits vertikale Wände aus künstlichen oder natürlichen Steinen, die sowohl tragenden als auch umhüllenden Funktionen dienten und andererseits Gerüste meist aus Holz, die ausgefacht wurden. Für die horizontale Umschließung der Decken und Dächer wurden ebenso wie für die Wände Steine - natürliche oder künstliche, verwandt. Wie dies die Fortführung der tragenden vertikalen Wand in die Horizontale ist, so konnte das Holzgerippe, d.h. die senkrechte Fachwerkwand, als hölzerner Dachstuhl unter Mithilfe einer wasserabweisenden Deckung als horizontale Umhüllung fortgeführt werden. So haben sich auch bei einfachen Bauaufgaben skelettierte Tragwerksansätze durchgesetzt. Dies vor allem aufgrund der materialeffizienten Verwendung der Baustoffe.

4.2 Hülle

Die Hülle bildet im Gesamtsystem Gebäude den Abschluss von Raum und der thermisch kontrollierten Bereiche. Ihr kommt dabei eine besondere Rolle zu, da sie maßgeblich an der Balance von Energiegewinn und Energieverlust beteiligt ist. Durch die im Vorfeld angesprochenen Möglichkeiten des Transmissions- und Lüftungswärmeverlustes ist die moderne Gebäudehülle Parameter und Masstab effizienter Gebäudeplanung. Das Thema der veränderlichen Gebäudehülle oder Aussenhaut ist erst der Anfang adaptiver und sich selbst regelnder Systeme. Dabei muss beachtet werden, dass die Steuerung eines solchen Systems durch den Nutzer oder die Automatisierung durch übergeordnete Steuerungsregelungen auch in soziologischer Hinsicht sinnvoll und nachvollziehbar sein muss. Erst das Erkennen der Zusammenhänge zwischen dem eigenen Handeln und den daraus resultierenden Folgen für das Gebäudeklima, ermöglichen einen insgesamt effizienten Betrieb des

Gebäudes. Die Hülle hat darüber hinaus jedoch auch und vor allem architektonische Leistung zu vollbringen, ist sie doch eine der gestaltprägenden und umweltbeeinflussenden Mittel der Architektur. *(Das Wort Fassade hat seinen Ursprung in lat. facies= das Gesicht, Anm. Autor).*

Moderne Hüllen oder Hüllsysteme haben darüber hinaus auch öfters weitere Funktionen wie z.B. Informationsträger oder Schallabsorber zu integrieren. Dies zeigt welche mannigfaltige Systematik in modernen Gebäudehüllen steckt und welche komplexe Planungsaufgabe sich dahinter verbirgt. In der Abb. 4.3.1 ist die Komplexität der Anforderungen an moderne Gebäudehüllen diagrammatisch dargestellt.

4.3 Technik

Die Haustechnik oder der technische Ausbau eines Gebäudes nimmt, unter energetischen Gesichtspunkten betrachtet, einen wichtigen, wenn nicht den wichtigsten Teil der Energiebilanz eines Gebäudes ein. Die Wahl des technischen Systems trägt wesentlich zum Energieverbrauch des Gebäudes bei. Ebenso entscheidend ist die Wahl eines Wärmerückgewinnungssystems. Zur Verfügung stehen dazu Aktive und Passive Systeme. Aktive Systeme sind z.B.:

- Photovoltaische Energieerzeugung
- Solarthermische Warmwassererzeugung
- Lichtwellenwandlung durch Wintergarteneffekte

Passive Systeme sind z.B.:

- Orientierung des Gebäudes zu den Himmelsrichtungen
- A/V Verhältnis des Baukörpers
- Erdwärmenutzung
- Aquiferbrunnenutzung
- Biomassenutzung

Energie	Gaspermeabilität, Klimatisierung, Heizung, Kühlung, Dämmung, Verschattung, Stromgewinnung, Wärmegegewinnung, Wärmespeicherung
Komfort	Beleuchtung, Lichtlenkung, Öffnungsmöglichkeiten, Schallschutz
Sicherheit	Brandschutz, Health Monitoring, Vandalismus, Terrorattacken
Design	Großes Maß an Funktionsintegration
Automation	Stromversorgung, BUS-Systeme, GLT, W-Lan, Integration von Bedienelementen in die Fassade
Geometrie	Geometriefreie Systemkomponenten
Betrieb	Reinigung, UV-Beständigkeit

Abb. 4.3.1: Diagrammatische Darstellung eines Anforderungskataloges moderner Gebäudehüllen

5.0 Anforderungen an die Hüllstruktur

Nach unseren Masstäben gliedern wir die Leistungsfähigkeit moderner Gebäudehüllen mit Begriffen wie Energie, Komfort, Sicherheit, Design, Automation, Geometrie oder Betrieb. Diese Anforderungen spielen in natürlichen Hüllstrukturen nur teilweise eine Rolle. Im Verlauf der konzeptionellen Entwicklung einer Bionisch inspirierten adaptiv permeablen Hüllstruktur werden die Schwerpunkte daher anders gewichtet. Der Vorsprung natürlicher Hüllen und Häute bezieht sich im Wesentlichen auf den Umgang mit energetischen Ressourcen und deren Einsatz. Da sich die Anforderungen anthropogener und natürlicher Hüllen stark unterscheiden und zum Teil gegengerichtet ausgelegt sind (*dies zumeist zu Gunsten des Komfortgedanken, Anm.: Autor*), ist es an dieser Stelle sinnvoll eine klare Definition der Spezifikationen zu erstellen, die eine möglichst direkte Affinität natürlicher Systeme ermöglicht. Dabei bilden die im Teil 3 dargestellten Recherchethemen die Grundlage

der späteren Selektion. Anhand dieser sollen die Übertragbarkeit und die Verwendbarkeit biologischer Phänomene in anthropogene Konstrukte überprüft werden. Die im Teil 2 erarbeiteten Anforderungen sollen dabei die Basis der zu erzielenden Ergebnisse bilden und bei Nichterreichen einen Weg aufzeigen, woher die Leistungs-differenz stammt.

Themenbereich	Anforderung
Energie	Gaspermeabilität
	Klimatisierung
	Dämmung
	Energiegewinnung
	Energieaustausch
Sicherheit	Brandverhalten
	Health Monitoring
	Selbstreparatur
	Entgiftung
Betrieb	Selbstreinigung
	Winddichtigkeit
	Wasserabweisung
	UV-Beständigkeit
	Sensorik

Abb. 5.0.1: Tabellarische Darstellung energetischer, sicherheitstechnischer und betriebstechnischer Anforderungen an eine Hüllstruktur

Als Basis für eine konzeptionelle Entwicklung einer Bionisch inspirierten Hüllstruktur dienen die weiter unten angegebenen Spezifikationen in den Themenbereichen Energie, Sicherheit und Betrieb. Im Bereich „Energie“ werden Anforderungen wie Gaspermeabilität, also der aktive oder passive Transport von Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid, die Klimatisierung der Luft, die Dämmeigenschaften der Hüllstruktur und vorallem die Energiegewinnung im Mittelpunkt stehen. Im Bereich „Sicherheit“ geht es vornehmlich um das Brandverhalten der verwendeten Baustoffe, das sogenannte „Health Monitoring“, eine permanente Leistungsüberprüfung der verwendeten Komponenten, die Fähigkeit zur Selbstreparatur und die Reinigung/Entgiftung der Luft. Die Anforderungen während des „Betriebes“ an die Hüllstruktur sind die Fähigkeit zur Selbstreinigung, die dauernde Winddichtigkeit zur Vermeidung unnötiger Transmissionswärmeverluste, die Eigenschaft der Oberfläche zur

Abweisung von Wassermolekülen, die Beständigkeit gegen langwellige UVA- und kurzwellige UVB-Strahlungen der Sonne sowie sensorische Eigenschaften zur Einstellung des jeweilig idealen Zustandes der Hüllstruktur. Die sensorischen Fähigkeiten umfassen dabei Eigenschaften wie:

- UVA- und UVB Strahlungsgehalt
- Lichtintensität/Lichthelligkeit
- Luftfeuchtigkeit
- Außentemperatur
- Innentemperatur
- Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
- Strahlungsenergie
- Windgeschwindigkeit
- Lärmemissionen
- Geruchsimmissionen

Im Anschluss an diese Betrachtung und einem ersten Überblick der Anforderungen, die eine ideale Hüllstruktur erfüllen sollte, stellt sich die Frage, in wie weit eine Funktion jeweils von einer Schicht oder einer dafür vorgesehenen Komponente erfüllt werden kann oder in wie weit mehrere Anforderungen von einer Komponente geleistet werden können. Aus dieser Sichtweise ergibt sich auch eine weitere Frage, die sich mit der Abhängigkeit unterschiedlicher Anforderungen zueinander beschäftigt. Diese Frage muss auch klären in wie weit sich Anforderungen gegenseitig ausschließen oder nur schwer verträglich zueinander sind. Zu Beginn der Konzeptionierung wird, vor Klärung der vorangegangenen Fragen, zunächst davon ausgegangen, jede Anforderungen mit einer Komponente zu beantworten. Diese sollen im Laufe der Untersuchung dann u.U. kombiniert und zusammengefasst werden, wenn dies der Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponente nicht abträglich ist. Es ist also vorerst von einzelnen Funktionskomponenten auszugehen, die jedoch durchgängige Grundeigenschaften haben müssen, damit einzelne Anforderungen erfüllbar werden.

5.1 Komponentenkohärente Eigenschaften

Die in der Abb. 5.0.1 ermittelten Anforderungen an eine Gebäudehülle werden nun nach den Basis- und Spezialeigenschaften unterschieden und aufgeteilt, damit leichter erkennbar wird, welche Ebene oder Schicht welche Grundeigenschaft haben muss, damit das Gesamtsystem funktioniert. Diese sogenannten „kohärenten“ Eigenschaften sind im Folgenden aufgelistet und später diagrammatisch aufbereitet.

- Permeabilität für Atemgase wie Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Argon
- Diffusionsoffenheit für Wasserdampf
- Durchlässigkeit für sichtbares Licht (300-500 nm Wellenlänge)
- Statische Beanspruchbarkeit
- Formveränderlichkeit

Das bedeutet, daß alle Komponenten, die in einer adaptiv permeablen Hüllstruktur zum Einsatz kommen sollen, diese Eigenschaften als Grundeigenschaften gewährleisten müssen. Im Vordergrund steht dabei die Permeabilität als Grundspezifikation, sei es für Atemgase oder den Wasserdampfausgleich. Auch die Permeabilität für Licht oder genauer das sichtbare Licht im Spektralbereich von ca. 300-500 nm Wellenlänge spielt eine Rolle, wobei die Transparenz- oder Transluzenzeigenschaften der Hüllstruktur später erläutert werden. Diesen Grundfunktionen sind nun inkohärente Leistungseigenschaften überlagert, wobei eine Komponente vorerst nur eine Eigenschaft übernehmen muss.

5.2 Komponenteninkohärente Eigenschaften

Bei den nun genannten „inkohärenten“ Eigenschaften handelt es sich um Spezialfähigkeiten einzelner Schichten, die nicht in jeder Ebene gebraucht werden. Diese wiederum setzen auf den kohärenten auf und erzeugen eine zumindest bifunktionale Ausrichtung.

- Klimatisierung
- Dämmfähigkeit
- Energiegewinnung
- Wärmespeicherfähigkeit/Energieaustausch
- Brandverhalten
- Health Monitoring
- Selbstreparatur
- Entgiftung
- Selbstreinigung
- Winddichtigkeit
- Wasserabweisung
- UV-Beständigkeit

5.3 Diagrammatik der Anforderungen

Durch die Zunahme an Funktionen und die bifunktionale Belegung durch kohärente und inkohärente Komponenteneigenschaften ergibt sich schon zu Beginn der Konzeptionierung ein relativ hoher Komplexitätsgrad der Hüllstruktur. Daher wird im Folgenden eine Diagrammatik entwickelt, mit deren Hilfe die unterschiedlichen Leistungsbereiche grafisch eindeutig definiert werden. Sie dient vor allem der schnellen Wiedererkennbarkeit der Komponenteneigenschaften und ermöglicht zudem leichter eine Mehrfachbelegung.

Komponentenkohärente Eigenschaften:





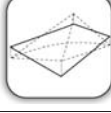




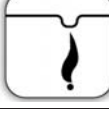


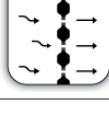
Anforderung	Diagramm
Gaspermeabilität <i>Anm.: Das Diagramm zeigt eine diffusionsoffene Doppellipidschicht, durch die hindurch Gasmoleküle diffundieren können.</i>	
Diffusionsoffenheit <i>Anm.: Das Diagramm zeigt eine perforierte Oberfläche durch die Wasserdampf diffundieren kann.</i>	
Lichtdurchlässigkeit <i>Anm.: Das Diagramm zeigt eine zweischalige Oberfläche durch die Licht eindringt und an der sich Licht reflektiert.</i>	
Statische Beanspruchbarkeit <i>Anm.: Das Diagramm zeigt ein Gewicht, das eine kragarmähnliche Oberfläche nach unten drückt.</i>	
Formveränderbarkeit <i>Anm.: Das Diagramm zeigt perspektivisch eine eben Fläche, die sich z.B. zu einer Hyperfläche verändern kann.</i>	

Abb. 5.3.1: Tabellarische Darstellung der Komponentenkohärenten Eigenschaften

Ergänzend zu den kohärenten Komponenten mit Ihren zuvor diagrammatisch dargestellten Symbolen werden nun die inkohärenten Eigenschaften zeichnerisch aufgearbeitet.

Komponenteninkohärente Eigenschaften:

Anforderung	Diagramm
<p>Klimatisierung</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt zwei gegenläufige aufgedickte Pfeile, einen mit Wärmeenergie (gefüllt) und einen mit Kälteenergie (umrahmt), die die Luft temperieren und konditionieren.</p>	
<p>Dämmung</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt mehrere Schlangenförmige Linien, die eine hohe Porosität und somit Dämmwirkung darstellen sollen.</p>	
<p>Energiegewinnung</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt eine Sonne und Energieabsorbierende Flächen, deren Ertrag gesammelt und weiterverarbeitet wird.</p>	
<p>Energieaustausch</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt zwei gegenläufige und verwobene Kreisläufe, die gegenseitig über einen Gegenstrom Energie austauschen können.</p>	
<p>Brandverhalten</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt ein horizontales Material als Schicht, das durch eine Flamme deformiert wurde.</p>	
<p>Health Monitoring/ Sensorische Eigenschaften</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt neuronale Verzweigungen, die Informationen entlang eines Stranges transportieren.</p>	
<p>Selbstreparatur</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt eine poröse Struktur, die an einer Stelle gebrochen ist. Dort haben sich die Inhalte der Poren zu einem Reparatursystem zusammengeschlossen und der Struktur wieder Stabilität verliehen.</p>	
<p>Entgiftung</p> <p>Anm.: Das Diagramm zeigt links wellige Pfeile, die Verschmutzung symbolisieren und rechts gerade Pfeile, die durch den Durchgang durch die Haut gereinigt wurden.</p>	






<p>Selbstreinigung</p> <p><i>Anm.: Das Diagramm zeigt eine leicht geneigte Fläche, auf der ein rollierender Tropfen Schmutzpartikel aufnimmt, während er die Fläche hinabrollt.</i></p>	
<p>Winddichtigkeit</p> <p><i>Anm.: Das Diagramm zeigt eine geschlossene Struktur im Schnitt, an der ein Windhauch abprallt und nicht durchgelassen wird.</i></p>	
<p>Wasserabweisung</p> <p><i>Anm.: Das Diagramm zeigt eine geschlossene Haut, durch die keine Wassertropfen diffundieren kann.</i></p>	
<p>Sensorik</p> <p><i>Anm.: Das Diagramm zeigt sensorische Meßquadrate</i></p>	
<p>UV-Beständigkeit</p> <p><i>Anm.: Das Diagramm zeigt eine Sonne, die ein Material durch UV-Strahlen deformiert hat.</i></p>	

Abb. 5.3.2: Tabellarische Darstellung unterschiedlicher Diagramme für verschiedene Leistungsbereiche

5.4 Schematischer Aufbau

In den Abb. 5.4.1 bis 5.4.3 werden nun schematische Aufbauten einer Bionisch inspirierten Hüllstruktur erstellt. Dabei werden verschiedene Funktionen zueinander gruppiert und in einem äußeren, einem mittleren und einem inneren Bereich angeordnet. Dadurch können auch erste Erkenntnisse über bifunktionale oder multifunktionale Bereiche gesammelt werden, die u.U. durch einige oder wenige Schichten belegt werden können. Die unterschiedlichen Schaltzustände oder auch die Abhängigkeiten der Schichten und ihre Beziehungen zueinander werden später im Teil 4 näher betrachtet. Ergänzend zur perspektivischen und schematischen Darstellung in den vorangegangenen Abbildungen, wird nun der Versuch unternommen die bisher

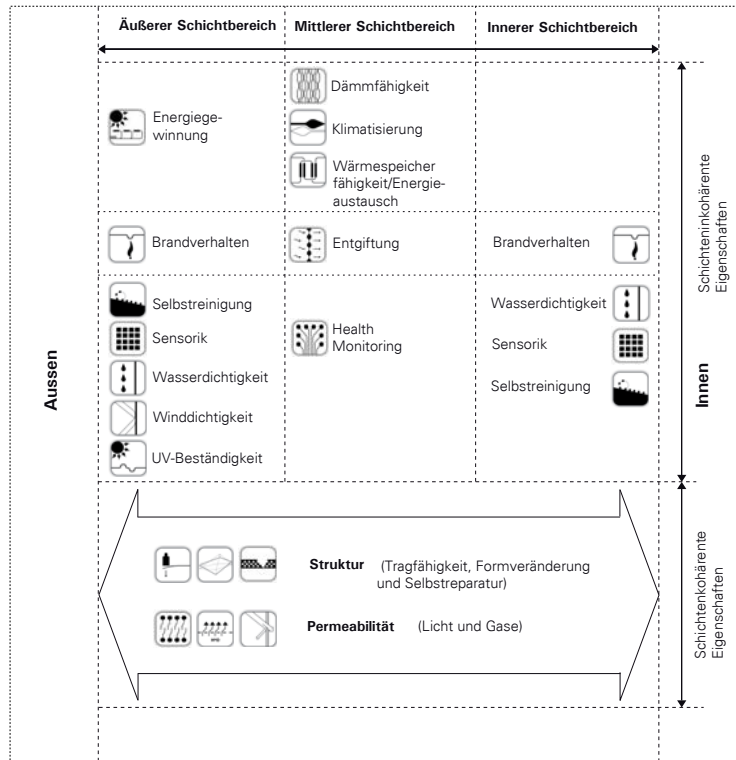


Abb. 5.4.1: Schematische Darstellung der kohärenten und inkohärenten Komponenten

vorliegenden Erkenntnisse in eine erste Schnittdarstellung einfließen zu lassen. Zu Beginn werden mit Hilfe der erarbeiteten Diagrammatik einzelne Komponenten angeordnet, die jeweils einzelne Funktionen übernehmen sollen. In dieser Darstellung soll auch zu erkennen sein, welche Komponenten eine ähnliche Platzierung haben und gegebenenfalls zu bifunktionalen oder multifunktionalen Komponenten erweitert werden können. Die kohärenten Eigenschaften wie Permeabilität und Struktur sind dabei die Grundeigenschaft aller Komponenten, d.h. bei genauer Betrachtung werden alle Komponenten zumindest bifunktional sein. In einer ersten Betrachtung ergeben sich für den äußeren, den mittleren und den inneren Schichtbereich folgende Gruppierungen:

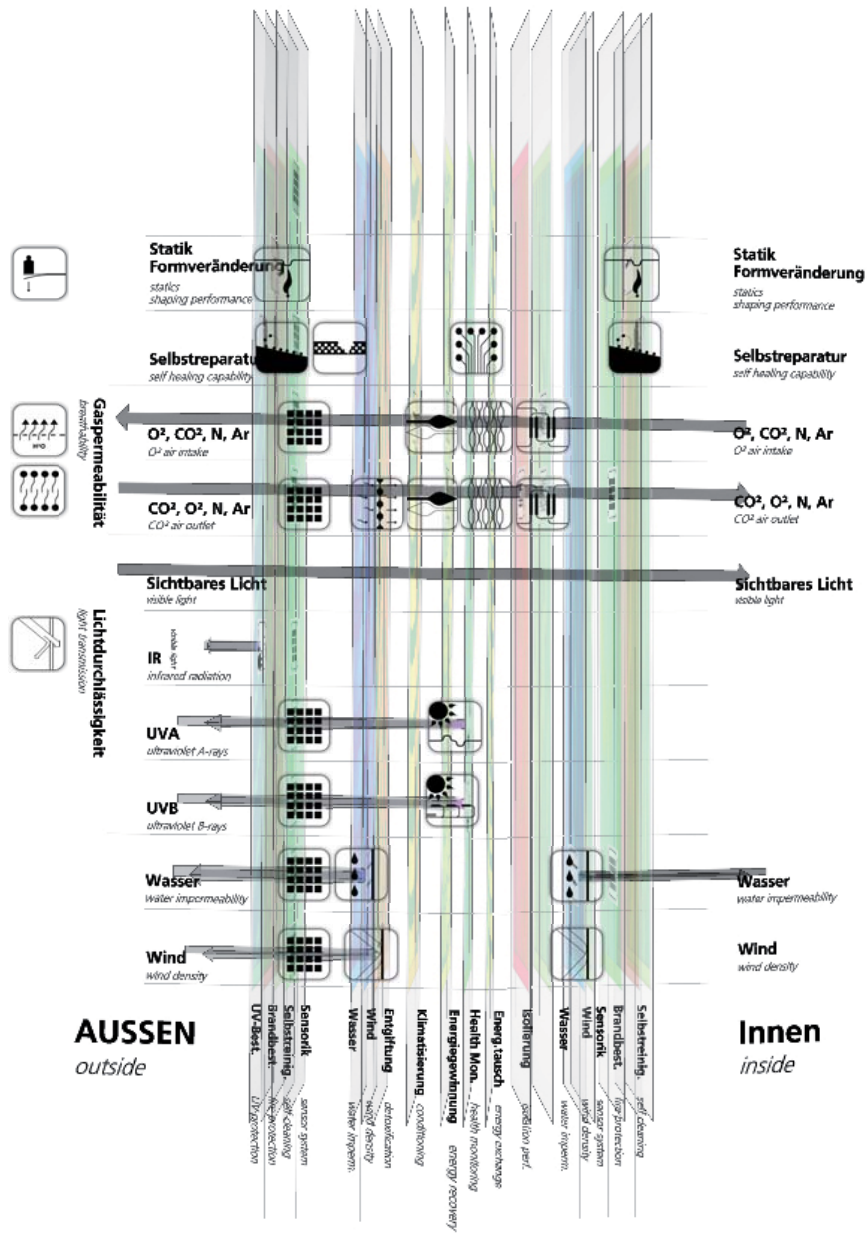


Abb. 5.4.2: Diagrammatische Darstellung einer bionisch inspirierten gaspermeablen Hüllstruktur in der Draufsicht

Äußerer Schichtbereich:

- UV-Beständigkeit
- Sensorik
- Selbstreinigung
- Energiegewinnung
- Brandbeständigkeit
- Wasserbeständigkeit

Mittlerer Schichtbereich:

- Dämmfähigkeit
- Klimatisierung
- Wärmespeicherfähigkeit/Energieaustausch
- Entgiftung
- Health Monitoring
- Winddichtigkeit

Innerer Schichtbereich:

- Brandbeständigkeit
- Sensorik
- Wasserdichtigkeit
- Selbstreinigung

Entsprechend diesen Anforderungen wurden nun 25 unterschiedliche natürliche Hüllen und Häute recherchiert und im Teil 3 aufbereitet. Ziel ist es für einzelne oder für zusammenhängende Komponenteneigenschaften natürliche Lösungsansätze zu ermitteln und auf ihre Verwendbarkeit innerhalb des Themenfeldes „Gebäudehülle“ zu überprüfen. Dieser Vorgang wurde selektiv unternommen, d.h. die einzelnen Phänomene wurden nach und nach ausgeschieden, wenn sie in ihrer Affinität zum gestellten Thema zu stark abwichen oder ihre konzeptionelle Einbindung/Umsetzung mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zu unwahrscheinlich erschienen.

Vorbemerkungen

Basierend auf einem wachsenden Verständnis für ökologische Zusammenhänge, ist der bionische Gedanke zu einem populären Schlagwort geworden. Ob Strom aus Wind- oder Wasserkraft, Photovoltaikmodulen oder Warmwasser aus Solarthermieranlagen, die Grundbegriffe und Termini Regenerativer Energiegewinnung haben Einzug in das gesellschaftliche Bewusstsein und den alltäglichen Sprachgebrauch gefunden. Nicht zuletzt die progressive Subventionspolitik der letzten Bundesregierung für Regenerative Energiesysteme, die weit über die Parteigrenzen hinweg getragen wird, hat dazu geführt, daß der Umgang mit dem Energiethema, z.B. in der Architektur, zum Entwurfsrelevanten Argument werden kann und daher in Fachkreisen auch permanent diskutiert wird. Konsens dieser Diskussion ist eindeutig: Durch drastische Energiesparmaßnahmen den CO²-Ausstoß heutiger Energiebereitstellungssysteme zu minimieren. Dies kann auch bedeuten zu alternativen Energieformen zu gelangen oder alternative Erzeugungsmethoden zu finden. Dass die Natur beim Thema Energie eine besondere „Erfahrung“ aufweist, könnte doch Ansporn sein diese Systeme näher zu analysieren und zu versuchen diese Phänomene in technische Systeme umzuwandeln oder deren Funktionsweise mit unseren Möglichkeiten zu beantworten. Im Spannungsfeld aktueller Forschung wurden im Rahmen der Forschungsarbeit biologische Hüllen und Häute von Mobilien und Immobilien gesammelt und ausgewertet. Aufgabe war die Recherche nach besonders leistungsfähigen Hüllen und Häuten von Mobilien und Immobilien, die für den Technologietransfer geeignet sind. Dabei steht die Verwendung in der Bautechnik im Vordergrund. Nach unterschiedlichen Kriterien wurde eine Sammlung von Hüllen und Häuten erarbeitet, die als Vorbilder für „state of the art“ Baustoffe dienen können. Auf der Suche nach Hüllen und Häuten wurden Kriterien wie Transluzenz, Transparenz, Opazität, Wärmetransmission, Speicherfähigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Strukturausbildung, Tragfähigkeitsverhalten und Konstruktionstechniken angewendet.

Dabei stand die Sicht des Architekten im Vordergrund, der recherchiert, der beschreibt, der auswertet, der filtert und die Potentiale und Perspektiven der natürlichen Hüllkonstruktionen aus seiner Sichtweise heraus erkennt.

1.0 Selektion Natürlicher Hüllstrukturen

Die nachfolgenden Rechercheergebnisse wurden in den Jahren 2003-2006 im Rahmen des Forschungseminars "Bionik Skins I-V" unter der Leitung des Autors erarbeitet. Die jeweiligen Arbeitsgebiete wurden vom Autor recherchiert und gemeinsam mit den Studenten vertieft und in Form von Powerpointpräsentationen dargestellt. Die weiterführenden Ansätze und Ideen der folgenden Untersuchungen wurden jeweils vom Autor initiiert, skizziert und entworfen. In der Abb. 1.0.1 sind alle 25 untersuchten Phänomene dargestellt. Die thematische Unterteilung erfolgt in den Kategorien Material, Struktur und Funktion. In einem selektiven Vorgang wurden in drei Schritten nach und nach die Phänomene ausgefiltert, deren Verwendbarkeit oder Umsetzbarkeit besonders weit entfernt vermutet wurde.

	Selektion I Recherche nach „Natürlichen Hüllsystemen“ 25 Phänomene	Selektion II Ansätze für „Bionisch inspirierte Hüllsysteme“ 19 Phänomene	Selektion III Konzeptionelle Einbindung in eine „Bionisch inspirierte Gebäudehülle“ 11 Phänomene	
Natürliche Materialien	Flüssiger Holzwerkstoff Lignin			Bionisch inspirierte Materialien
	Autosensitive Lasterkennung natürlicher Fasern	Faserbundmaterialien Cellulose		
	Progressives Leichtbaumaterial Perlmutter			
	Biominalisation Calcit			
	Dauerelastische Kinematikverbindung Resin			
Natürliche Strukturen	Biogener Glasfaserverbundwerkstoff	Glasschwammenskelett		Bionisch inspirierte Strukturen
	Strukturelle Lichtlenkung	Schmetterlingsflügel		
	Strukturelle Farbe	Schmetterlingsflügel		
	Strukturelle Reflexion	Schwarzäferpanzer		
	Selbstreinigende Struktur	Rosenzäferpanzer		
	Abrasionsteste Struktur	Sandfischhaut		
	Autosensitive Verschattungsstruktur	Schlange	Blattläuse	
	Reversible Haftstruktur	Geckfüße		
Natürliche Funktionen	Entgiftungsstrukturen	Retikulum		Bionisch inspirierte Funktionen
	Permeable Struktur	Fliegenischale		
	Thermoelektrische Beschichtung	Horissenhaut		
	Photobiologische Wasserstofffassade	Grünalgen		
	Farbsensitive Flüssigfassaden	Amphibienhaut		
	Dezentrale Flächenlüftung	Amphibienhautatmung		
	Selektiv permeable Hüllstruktur	Plasmamembran		
	Autosensitive Leuchtbeschichtung	Biolumineszenz		
	Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem	Robbenfell		
	UV-Beständigkeit	Quallenhaut		
Sensork Membranrezeptoren				
Photomechanischer Strahlungssensor	Brandkäfer			

Abb. 1.0.1: Tabellarische Darstellung der Grundrecherche nach natürlichen Materialien, Strukturen und Funktionen

Grundlage für die Auswahl natürlicher Phänomene sind Recherchen des Autors zu den Themenbereichen Hüllen und Häute, die an der Schnittstelle von thermisch kontrollierten und unkontrollierten Bereichen ähnlichen Anforderungen ausgesetzt sind, wie technische von Menschenhand entwickelte Konstruktionen. Dazu gehören auch Oberflächen, Materialien, Tragwerksstrukturen und funktionale Prozesse. Nach umfassenden Recherchen wurden aus den weiter unten aufgeführten 25 natürlichen Hüll- und Struktursystemen 19 biologische Phänomene zur weiteren Betrachtung selektiert. Im Teil 3 der vorliegenden Arbeit werden nun die in Abb. 1.0.3 angegebenen Phänomene weiter untersucht und jeweils mit einem unabhängigen Ansatz einer möglichen Umsetzung versehen. Dabei sind die Themen einer Bearbeitungsstruktur untergeordnet, die eine homogene Bearbeitungsstruktur der natürlichen Hüllen und Häute ermöglicht und als mögliche Handlungsanweisung für andere Phänomene herangezogen werden kann. Damit wird eine Vergleichbarkeit über die Themenbereiche hinweg erzeugt, die gleichzeitig möglichen Schnittstellen zur Architektur aufzeigt und u.U. Ansätze für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen liefern kann.

	Selektion I	Selektion II	Selektion III	
	Recherche nach „Natürlichen Hüllsystemen“ 25 Phänomene	Ansätze für „Bionisch inspirierte Hüllsysteme“ 19 Phänomene	Konzeptionelle Einbindung in eine „Bionisch inspirierte Gebäudehülle“ 11 Phänomene	
Natürliche Materialien	Flüssiger Holzwerkstoff Lignin			Bionisch inspirierte Materialien
	Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien Cellulose			
	Progressives Leichtbaumaterial Perlmutt			
	Biomineralisation Calcit			
	Dauerelastische Kinematikverbindung Resin			
	Biogener Glasfaserverbundwerkstoff Glasschwammkelett			
Natürliche Strukturen	Strukturelle Lichtlenkung Schmetterlingsflügel			Bionisch inspirierte Strukturen
	Strukturelle Farbe Schmetterlingsflügel			
	Strukturelle Reflexion Schwarzkäferpanzer			
	Selbstreinigende Struktur Rosenkäferpanzer			
	Abrasionfeste Struktur Sandfischhaut			
	Autosensitive Verschleißstruktur Schlangenstein			
	Reversible Haftstruktur Geckfüße			
	Entgiftungsstruktur Rebhuhn			
	Permeable Struktur Fliegenhäute			
Natürliche Funktionen	Thermoelektrische Beschichtung Hornissenhaut			Bionisch inspirierte Funktionen
	Photobiologische Wasserstoffassade Grünalgen			
	Farbsensitive Flüssigfassaden Amphibienhaut			
	Dezentrale Flächenlüftung Amphibienhautatmung			
	Selektiv permeable Hüllstruktur Plasmamembran			
	Autosensitive Leuchtbeschichtung Biolumineszenz			
	Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem Robbenfell			
	UV-Beständigkeit Qualenhaut			
	Sensorik Membranrezeptoren			
	Photomechanischer Strahlungssensor Brandkäfer			

Abb. 1.0.3: Tabellarische Darstellung der im Teil 3 untersuchten Phänomene unterteilt nach den Kategorien Material, Struktur und Funktion

1.1 Bearbeitungsstruktur der Themen

Der Bearbeitungsstruktur liegen folgende Kapitel zu Grunde:

- **Inspiration:** Zu Beginn der Selektion steht unter „Inspiration“ immer die Frage, warum diese oder jenige Hüllstruktur ausgesucht wurde. In einer kurzen Beschreibung wird dort zusammengefasst, was man sich von diesem Phänomen verspricht und wo man Entwicklungspotentiale erkannt hat. Unterstrichen wird diese Darstellung durch ein Schlüsselbild.
- **Biologische Klassifizierung:** In der „Biologischen Klassifizierung“ wird der gewählte Delinquent biologisch kategorisiert und nach bekannten Mustern aus der Biologie klassifiziert.
- **Allgemeine Beschreibung:** Dann erfolgt eine „Allgemeine Beschreibung“ zu Art und Gestalt, zu Gewicht und Proportion, zum Vorkommen, zur Fortpflanzung oder Klimatischen Randbedingungen. Dort werden begleitende Bilder gezeigt, meist als Übersicht und Detailansicht.
- **Phänomenologische Betrachtung:** In der „Phänomenologischen Betrachtung“ wird dann die Besonderheit des Materials, der Struktur oder der Funktion beschrieben, die eine Übertragung auf Architekturelevante Problemereiche möglich erscheinen lässt.
- **Schnittstellenbildung Architektur-Natur:** Im Anschluss daran erfolgt die „Schnittstellenbildung Architektur-Natur“, die einen konkretere Bauteilbereich beschreibt, in dem das natürliche Phänomen wirksam werden könnte.
- **Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen:** Als „Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen“ wird nun eine erste konzeptionelle Idee oder Vision formuliert, die mit Zeichnungen, Diagrammen und Visualisierungen erläutert wird.
- **Resümee:** Im „Resümee“ wird dann ein Ausblick auf mögliche Entwicklung- und Umsetzungspotentiale gewagt, der auch Aufschluss über aktuelle Probleme bei der Umsetzung geben kann.

In Ergänzung zu den Abb. 1.0.1 bis 1.0.4 wird nun ein kreisförmiges Diagramm erarbeitet, das die drei Kategorien Material, Struktur und Funktion jeweils einleitet und die im Folgenden bearbeitenden Themen mit einem schwarzen Punkt markiert. Dieses Diagramm zeigt darüber hinaus auch, welche der verschiedenen Themen näher im Schnittstellenbereich zwischen den Kategorien (kleinerer Kreis) angesiedelt sind als andere. Da ein Material z.B. eine Struktur erstellen kann, die wiederum eine Funktion ausführt, ist eine Unterscheidung der Phänomene immer durch den Schwerpunkt geprägt, den das Phänomen ausfüllt. Zum Beispiel steht beim Schmetterlingsflügel eindeutig die Struktur im Vordergrund, die zwar aus dem Material Chitin gebaut ist und Licht lenken kann (Funktion) kann, aber eben erst durch diese besondere Struktur funktioniert. Genauso ist der Photomechanische Strahlungssensor des Brandkäfers primär durch die Fähigkeit geprägt spezielle Strah-

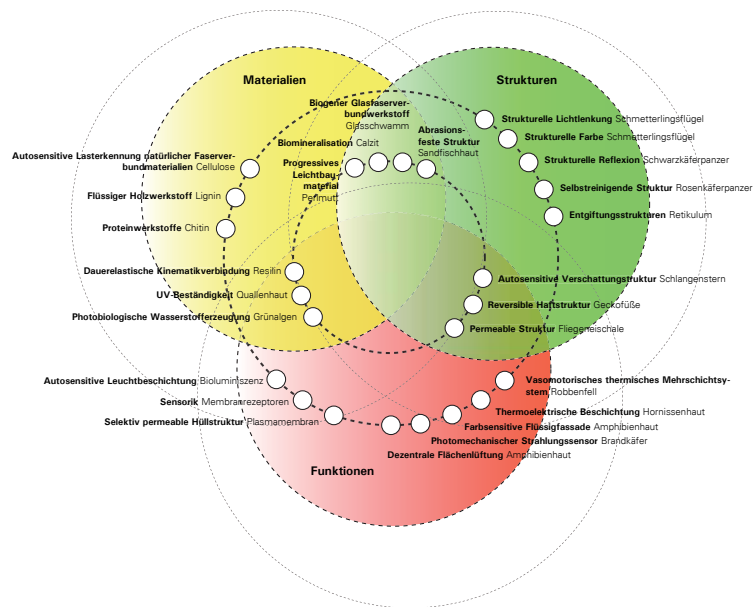


Abb. 1.1.2: Diagrammatische Darstellung der Kategorien Material, Struktur und Funktion und ihre Schnittstellenbereiche

lungsquellen messen zu können, gebaut ist er ebenso aus dem Material Chitin und besitzt eine besondere Struktur.

Im Teil 4 werden dann die wesentlichen Extrakte der vorangegangenen Untersuchungen in eine konzeptionelle Entwicklung eingearbeitet, wobei die in Abb. 1.1.3 abgebildeten Phänomene die Grundlage bilden.

	Selektion I Recherche nach „Natürlichen Hüllsystemen“ 25 Phänomene	Selektion II Ansätze für „Bionisch inspirierte Hüllsysteme“ 19 Phänomene	Selektion III Konzeptionelle Einbindung in eine „Bionisch inspirierte Gebäudehülle“ 11 Phänomene	
Natürliche Materialien	Flüssiger Holzwerkstoff Lignin Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien Cellulose Progressives Leichtbaumaterial Perlmutter Biomineralisation Calcit Dauerelastische Kinematikverbindung Resilin Biogener Glasfaserverbundwerkstoff Glasschwamm skelett			Bionisch inspirierte Materialien
Natürliche Strukturen	Strukturelle Lichtenkung Schmetterlingsflügel Strukturelle Farbe Schmetterlingsflügel Strukturelle Reflexion Schwarzkäferpanzer Selbstreinigende Struktur Rosenkäferpanzer Abrosionsfeste Struktur Sandfischhaut Autosensitive Verschattungsstruktur Schlangensterm Reversible Haftstruktur Geckofüße Entgiftungsstrukturen Retikulum Permeable Struktur Fliegeneschele			Bionisch inspirierte Strukturen
Natürliche Funktionen	Thermoelektrische Beschichtung Hornissenhaut Photobiologische Wasserstoffassade Grünalgen Farbsensitive Flüssigfassaden Amphibienhaut Dezentrale Flächenlüftung Amphibienhautatmung Selektiv permeable Hüllstruktur Plasmamembran Autosensitive Leuchtbeschichtung Biolumineszenz Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem Robbenfell UV-Beständigkeit Quallenhaut Sensorik Membranrezeptionen Photomechanischer Strahlungssensor Brandkäfer			Bionisch inspirierte Funktionen

Abb. 1.1.3: Tabellarische Darstellung der im Teil 4 untersuchten Phänomene unterteilt nach den Kategorien Material, Struktur und Funktion

2.0 Materialien

Der Abgleich der vorliegenden Rechercheergebnisse mit den Anforderungen aus Teil 2 ergab, daß die 4 weiter unten aufgeführten natürlichen Materialien selektiert werden sollten und als mögliche Ansätze neuartiger Gebäudehüllfunktionen untersucht werden. Das Selektionsdiagramm zeigt in der Übersicht die drei Kategorien Material, Struktur und Funktion und die jeweiligen Exponate als schwarze Punkte.

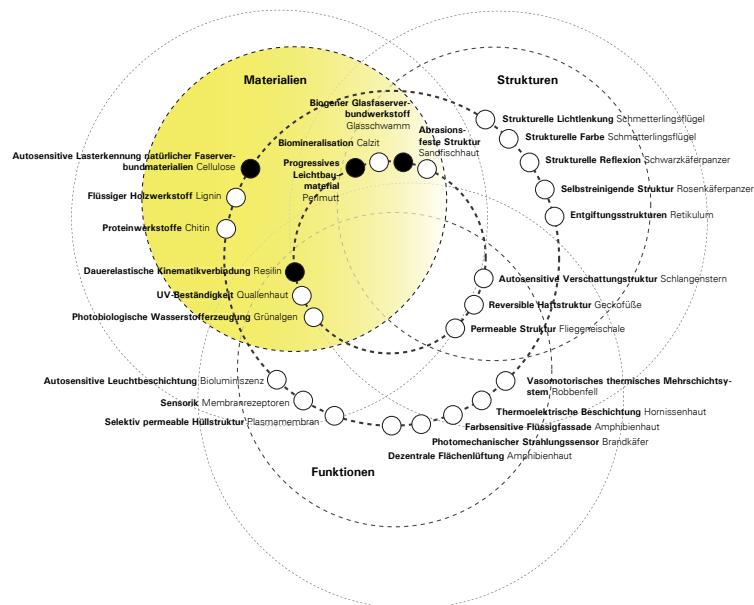


Abb. 2.0.1: Selektionsdiagramm in drei Kategorien Material, Struktur und Funktion

Als zusammenfassende Kapitelübersicht werden nun die Inspirationsgrundlagen der einzelnen natürlichen Phänomene mit ihren projektierten Anwendungen aufgelistet.

2.1 Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien

Der Bambus weist hohe Belastbarkeit auf Zug, Druck und Biegung auf. Seine Struktur ist auf gleichmäßige Lastverteilung innerhalb der Pflanze konzipiert. Je nach Belastung verändern sich Form und Anordnung der Gefäßbündel. Dazu ist er in der Lage externe Lasten zu erkennen, zu lokalisieren und diesen entgegenzuwirken. Er besitzt also ein Biologisches Erkennungsvermögen externer Lasten. Die Inspiration für eine Gebäudehülle besteht daher in der Idee, ein kurzfristig reversibles adaptives System zu entwickeln, das aktiv auf Windlasten oder Erdbeben reagieren kann. Nach dem Prinzip der Bambusstruktur, könnten einzelne tragende Bauteile zu einem adaptiven System zusammengefügt werden.

2.2 Progressives Leichtbaumaterial

Perlmutter besteht aus einer Polymer-Keramik-Verbindung, deren mechanische Eigenschaften im Verbund die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Inhaltsstoffe übertreffen. Flache polygonale Aragonitkristalle und Proteinfasern bilden eine Art Ziegel-Mörtel-Struktur. So erreicht Perlmutter eine extrem effektive Stabilität und Beständigkeit. Von ebenso großer Bedeutung sind überkreuz angeordnete ionische Verbindungen aus bündig gefalteten Makromolekülen. Die wiederholte Entfaltung der Moleküle erlaubt eine sehr große Ausdehnung und Bedarf einer signifikanten Energie. Das bedeutet hohe Zugkraft bei gleichzeitig hoher Steifigkeit, also eine Art Progressives Leichtbaumaterial. Durch Einbringen der mechanischen Eigenschaften des Perlmutter in ein Konstruktionsprinzip z.B. einer Fassade, könnte eine Verminderung der Elastizität mit zunehmender Beanspruchung (z.B. Windkraft) erreicht werden. Durch die Anwendung dieses Prinzips könnten extrem schlank dimensionierte Fassadenprofile entstehen.

2.3 Biogener Glasfaserverbundwerkstoff

Der Glasschwamm *euplectella* zeigt, welche außergewöhnlichen Materialien und Strukturen die Natur aus einfachsten Rohstoffen herstellen kann. Der in Meerestie-

fen von 500 bis 5000 Metern lebende Schwamm besitzt ein käfigartiges, aus Glasfasern bestehendes Skelett. Von diesen Glasfasern ist bereits bekannt, dass sie ausgezeichnet Licht leiten können, warum es jedoch möglich ist eine derart filigrane Struktur aus einem so spröden Material herzustellen, die den beträchtlichen mechanischen Beanspruchungen in der Tiefsee widerstehen kann, ist bis heute erst ansatzweise geklärt. Denn trotz des Einsatzes eines sprödelastischen Werkstoffes ist diese Konstruktion nahezu unzerbrechlich. Diese Biogene Glasfaserverbundwerkstoffe stehen im Fokus des vorliegenden Kapitels, könnten sie doch Ideenlieferanten für neuartige Glasverbundwerkstoffe sein, die einem sprödelastischen Material durch geschickte Fügeverfahren eine hohe Flexibilität vermitteln könnten.

2.4 Dauerelastische Kinematikverbindung

Resilin ist ein gummiartiges Eiweiß, das im Körperbau von Insekten vielfältige Anwendungen übernimmt. Im Libellenflügel z.B. bildet es ein Mikrogelenk, das den Flügel im Flug wie auch im Ruhezustand stets zum günstigsten Anstellwinkel hin ausrichtet und dabei eine optimale Profilform gewährleistet. Die durch starke Verwirbelungen auftretende kinetische Energie wird durch das Gelenk aufgenommen, gespeichert und sobald die einwirkende aerodynamische Kraft abreißt, wieder freigegeben. Dadurch schnellert der Flügel im Millisekunden wieder in sein ursprüngliches Profil zurück und gewährleistet damit stets den günstigsten Anstellwinkel und eine optimale Flugperformance. Eine Dauerelastische Kinematikverbindung. Resilin oder dessen Derivate könnten in Zukunft als dauerelastische, reißfeste und kinematisch aktive Materialien im Fassadenbau eingesetzt werden und dort zu neuartigen Verbindungstechnologien führen, die gleichsam elastisch und steif sind und dabei kinematische Energie aus Windlasten amortisieren könnten.

2.1 Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faservebundmaterialien

2.1.1 Inspiration

Der Bambus weist hohe Belastbarkeit auf Zug, Druck und Biegung auf. Seine Struktur ist auf gleichmäßige Lastverteilung innerhalb der Pflanze konzipiert. Je nach Belastung verändern sich Form und Anordnung der Gefäßbündel. Dazu ist er in der Lage externe Lasten zu erkennen, zu lokalisieren und diesen entgegenzuwirken. Er besitzt also ein Biologisches Erkennungsvermögen externer Lasten. Die Inspiration für eine Gebäudehülle besteht daher in der Idee, ein kurzfristig reversibles adaptives System zu entwickeln, das aktiv auf Windlasten oder Erdbeben reagieren kann. Nach dem Prinzip der Bambusstruktur, könnten einzelne tragende Bauteile zu einem adaptiven System zusammengefügt werden.

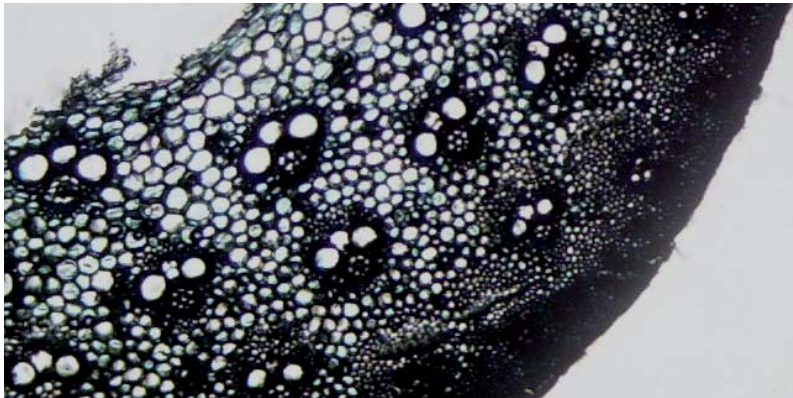


Abb. 2.1.1: Querschnitt durch die Wandung eines Bambus

2.1.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Pflanzen	<i>plantae</i>
Unterreich	Blütenpflanzen	<i>magnoliophyta</i>
Ordnung	Süßgrasartige	<i>poales</i>
Familie	Süßgräser	<i>poaceae</i>
Gattung	Bambus	<i>bambusoideae</i>

Abb. 2.1.2: Biologische Klassifizierung des Bambus

2.1.3 Allgemeine Beschreibung

Cellulose ist die häufigste organische Verbindung und Bestandteil nahezu aller Zellwände von Pflanzen (Baumwolle enthält ca. 95% Cellulose). Sie besteht aus unverzweigten, wasserunlöslichen Ketten von Kohlenwasserstoffringen. Die Ketten sind im Gegensatz zu synthetischen Polymeren unterschiedlich lang. In Lösung bilden sie Knäuel, in festem Zustand wechseln sich kristalline Regionen mit amorphen ab. Der Verbund über H-Brücken und Van-der-Waals-Kräfte verhindert eine freie Drehbarkeit der Molekülstränge und bewirkt eine relativ große Starrheit. Der Aufbau lässt sich grob in Elementarfibrillen, Mikrofibrillen und Makrofibrillen gliedern. Cellulose ist relativ hygroskop (Absorbiert 8-14% Wasser) und schmilzt nicht. Verwendet wird sie v.a. in der Papier- und Textilindustrie.

Faserverbundmaterialien sind Verbundstoffe aus zugfesten Fasern oder Drähten, die in einer druckfesten Masse (Matrix) eingelagert sind. Beispiele dafür sind Stahlbeton, Carbonfaser und Glasfaser oder verstärkte Kunststoffmaterialien. In der Natur finden wir ebenso häufig Verbundmaterialien wie zum Beispiel Süßgräser (*poaceae gramineae*), deren Anzahl weltweit auf ca. 4000 Arten geschätzt wird. In der Regel sind dies krautige Pflanzen mit stielrunden, in Knoten (Nodien) und Glieder (Internodien) gegliederten Stängeln (Halmen). Der Bambus (*Bambusoideae*) wurde als Vertreter der Süßgräser untersucht.

Werkstoff	E-Modul [kN/cm ²]	Zugfestigkeit [kN/cm ²]	Druckfestigkeit [kN/cm ²]
Beton C20/25 mittlerer Wert	20.000	2,2	28
Betonstahl S 235	21.000	21,8	21,8
Vollholz S10	7.000 - 18.000	4,9	0,85
Bambusfasern (längs zur Faser)	2.070	15	3,9

Abb.2.1.3: Physikalische Kennwerte einiger Faserverbundwerkstoffe

Der Bambus [der; malaiisch] gehört zur Unterfamilie der Süßgräser und weist ca. 115 Gattungen (*Bambusa*, *Phyllostachys*, *Pseudosasa*) und bis zu 1070 Arten auf. Sein teleskopartiges Wachstum (schnellste wachsende Pflanzenart mit 1,20m/Tag), läßt ihn von 15-30cm (d=2,5cm) bis 40m (d=30cm) wachsen. Dabei entscheidet der Standort den Wuchs und das Aussehen. Als immergrüne Pflanze kann man den Bambus weltweit in unterschiedlichsten Klimazonen und Bedingungen antreffen. Die Nutzung des Baustoffes Bambus ist altersabhängig. Unter 30 Tagen dient er als Nahrungsmittel, zwischen 6-9 Monaten als Korbflecht- oder Behältermaterial, zwischen 2-3 Jahre als Bambusbretter, zwischen 3-6 Jahre als Baumaterial, vornehmlich als Gerüstbaumaterial. Nach ca. 6 Jahre verliert der Bambus seine Festigkeit. Neuartige Verwendungszwecke des Baustoffes Bambus sind Surfboards oder Skateboards, Parkettböden und Treppen, Türblätter und Möbel. Mögliche Anwendung bestehen im Baubereich als Fassadenprofile oder Festerrahmen. Geeignet wäre der Bambus auch als Material für den Innenausbau, als Unterkonstruktionen für Parkett- oder Laminatböden und für einfache Tragkonstruktionen mit erhöhter Profilintelligenz.

Betrachtet man den Aufbau der Hohlachsen der Pflanzen, so findet man Unterteilungen des Pflanzenhalmes in mehrere Segmente (Internodien) und flache Knoten (Nodien). Umgeben ist diese Rohrform mit ringförmiger Materialverteilung und einem zentralem Hohlraum. Die Sprossbildung bis zur max. Halmdicke und kompletten Ausbildung der Internodien erfolgt unterirdisch und wächst teleskopartig nach oben (Bambus). Dabei haben sie spezielle Eigenschaften, wie hohe Belastbarkeit auf Zug, Druck und Biegung (z.B. höhere Zugfestigkeit und gleiche Druckfestigkeit wie Stahl). Das Bambusrohr ist also so fest wie Stahl, zugleich aber biegsamer und leichter. Seine lackartige Außenschicht ist zudem sehr widerstandsfähig gegen Feuer oder Chemikalien. Durch das geringe spezifische Gewicht und seine ela-

stische Struktur zeichnet sich der Baustoff mit seiner leichten Bearbeitbarkeit und seiner hohen Standsicherheit vor allem zum Einsatz in Erdbebengebieten aus. Er kann auch unter Hitze gebogen werden und behält dann seine gebogene Form, ohne an Stärke und Elastizität zu verlieren. Biomechanische Analysen haben gezeigt, dass Halme hinsichtlich ihres Nodienabstands und der Verringerung dieses Abstands zur Achsenbasis hin als „mechanisch optimierte Leichtbauwerke“ betrachtet werden können. Die Gefahr des lokalen Knickens wird durch eine Untergliederung der Stängel in hohle Internodien und massive Nodien, mit Querdiaphragmen und Nodalverdickungen, vermindert. Versuche haben gezeigt, dass bei Druck senkrecht zur Faser, die Nodien eine Festigkeitssteigerung von bis zu 45% bewirken.

Pflanzenart	Höhe [m]	Quotient
Affenbrotbaum	20	2,5
Riesenmammutbaum	135	15
Tanne	70	42
Fichte	60	60
Sonnenblume	4	100
Bambus	4	136
Zuckerrohr	6	200
Roggenhalm	1,5	500

Abb.2.1.4: Schlankheitsquotienten von Pflanzen

Gras- und Getreidehalme gehören mit Längen-/ Durchmesserhältnissen von bis zu 500:1 zu den bemerkenswertesten Konstruktionen der Natur. Die Ausbreitung der Samen und Anordnung der photosynthetisierenden Strukturen stehen in direktem Zusammenhang mit Größe und Wuchsform, deshalb ist es für die Pflanze wichtig, nach einer Deformation schnellstmöglich die optimale Wuchsform wieder einzunehmen. Schon bei Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 5 m/s ist die Windbiegebelastung die maßgebliche Beanspruchung.

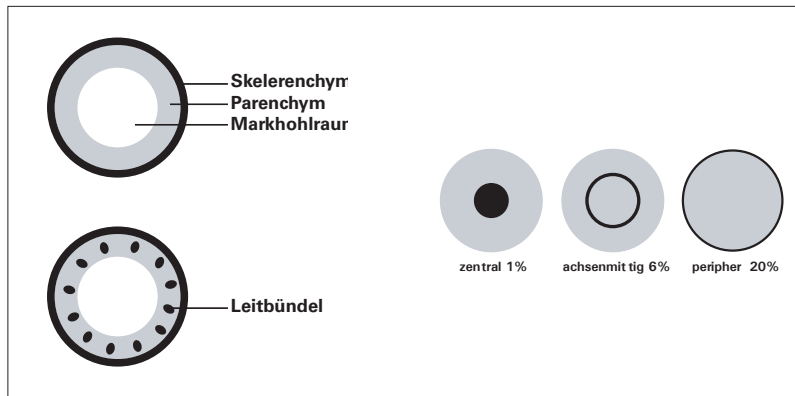


Abb.2.1.5: Gewebeverteilung bei Hohlgräsern

Abb.2.1.6: Einfluss der Anordnung des Sklerenchyms am axialen Flächenträgheitsmoment

Alle untersuchten Gräser bestehen aus drei Bereichen, dem äußeren Ring aus festigem Gewebe, dem Sklerenchym, einer inneren Manschette aus Grundgewebe, dem Parenchym, und einem Hohlraum im Achsenmittelpunkt, dem sogenannten Markhohlraum. Der Halm dient nicht nur zu statischen Zwecken, sondern zusätzlich transportiert er Wasser und Nährstoffe aus der Wurzel in die Blätter, und von dort aus organische Verbindungen zu den Verbrauchsorten und Speicherorganen. Die Anordnung der unterschiedlichen Gewebearten spielt dabei eine besondere Rolle. Nimmt man für das Sklerenchym ein 100x höheres Biegeelastizitätsmodul als für das Parenchym an, so steigt der Beitrag des Sklerenchym zur Biegesteifigkeit bei konstanter Querschnittsfläche von 55% bei zentraler Anordnung bis auf 96% bei peripherer Anordnung. Der Anteil des Sklerenchyms am axialen Flächenträgheitsmoment steigt von 1% bei zentraler Anordnung auf 20% bei peripherer Anordnung, wobei die Menge des jeweiligen Gewebes gleich bleibt.

Das mechanische Verhalten einer Pflanzenachse bei Biegebeanspruchung wird durch ihre Biegesteifigkeit bestimmt. Unter Biegesteifigkeit versteht man den Widerstand eines Körpers gegen Biegebelastung. Bei gleichbleibender Länge der Achse und konstanter abbiegender Kraft führt eine Vergrößerung der Biegestei-

figkeit zu einer Verringerung der Achsenkrümmung. Die Biegesteifigkeit lässt sich als Produkt aus axialem Flächenträgheitsmoment der Achse und Biegeelastizitätsmodul darstellen. Das axiale Flächenträgheitsmoment berücksichtigt neben der Querschnittsfläche vor allem auch die Anordnung der verschiedenen Gewebe im Achsenquerschnitt. Es gewichtet die Flächenverteilung bezüglich des senkrechten Abstands der einzelnen Flächenelemente von der neutralen Ebene. Pauschalisiert gilt, dass das axiale Flächenträgheitsmoment eines Gewebes um so höher ist, je peripherer die Flächenelemente angeordnet sind. Die zweite Größe, die in die Biegesteifigkeit eingeht, ist der sogenannte Biegeelastizitätsmodul. Beim Biegeelastizitätsmodul handelt es sich um eine Materialkonstante. Je höher der Biegeelastizitätsmodul eines Materials ist, desto größer ist der Widerstand, den dieses Material einer abbiegenden Kraft entgegensetzt. Pflanzenachsen bestehen aber nicht aus einem einzigen, homogenen Material, sondern sind in hohem Maße inhomogen, d. h. sie sind aus verschiedenen Materialien (Gewebe) mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften aufgebaut, die zudem häufig stark anisotrop bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften sind. Diesem Umstand kann Rechnung getragen werden, indem man pflanzliche Achsen als Verbundmaterialien auffasst, die aus verschiedenen Geweben mit unterschiedlichen Biegeelastizitätsmodulen aufgebaut sind. Die verschiedenen Gewebe leisten einen unterschiedlichen Beitrag zur Biegestabilität der Pflanzenachsen.

2.1.4 Phänomenologische Betrachtung

Bambus Strukturen sind auf gleichmäßige Lastverteilung innerhalb der Pflanze konzipiert (Vermeidung von Lastspitzen), sowohl axial als auch radial. Je nach Belastung verändern sich Form und Anordnung der Gefäßbündel. Dies geschieht mittels Bereitstellung verschiedener Fasergrößen an entsprechenden Stellen (feinere Fasern in Gefäßwandnähe, dadurch Möglichkeit der Verdichtung). Man kann folgende Verteilung der Gefäßbündel innerhalb des Bambusrohrs erkennen: Nach aussen sind immer mehr Gefäßbündel mit einer achtförmigen Ausprägung angelagert. Nach innen verteilen sich Gefäßbündel mit einer blütenförmigen Ausprägung, wobei insgesamt von innen nach aussen ein gradueller Verlauf sichtbar wird. Um die Wirkungsweise dieser veränderlichen Steifigkeit besser zu verstehen, wurde ein Versuchsaufbau

zum Nachweis von Reaktionen auf externe Stimulation des Bambus erstellt [NO-GATA, 2000]. Dabei wurden Elektroden mit selbstklebender Paste an einem Bambus angebracht, um mittels EKG die Reaktionen unter Belastung (Druck/Zug) zu messen. Ein leicht erhöhtes Spannungssignal an der Druckseite beweist, dass lebende Bambuszelle die externe mechanische Stimulation erkennen, wobei die Sensibilität zur Erkennung von Druck besser als die von Zug ist. Beim Mechanismus zur Erzeugung biologisch elektrischer Signale bei Pflanzen, kann man bei Belastung des Stamms/Stängels einer Pflanze folgendes beobachten:

1. Deformation der Zellmembrane
2. Öffnen eines sensitiven Ionenkanals
3. Austausch von diversen Ionen dies- und jenseitig der Zellmembran
4. Änderung der elektrischen Spannung

Es wäre denkbar die Strukturen einer Pflanze zu kontrollieren, indem man Pseudo-Signale sendet um das Öffnen und Schließen des Ionenkanals zu bewirken. Dieses Phänomen findet man auch in der Tierwelt, denkt man zum Beispiel an das Nachwachsen eines Haifischzahns durch Anlegen von elektrischen Spannungen.

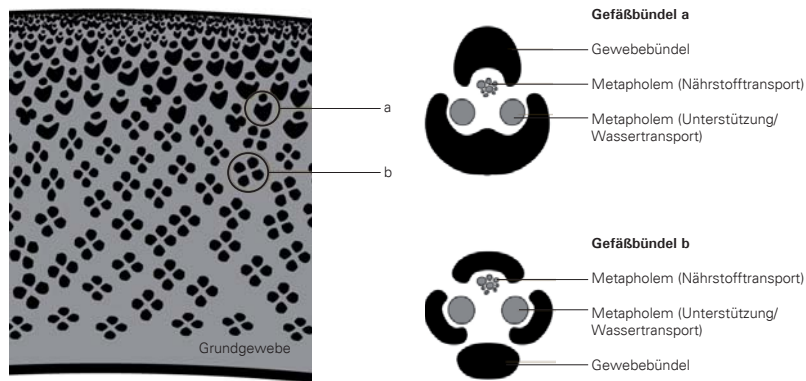


Abb. 2.1.7: Querschnitt durch die Wandung eines Bambus und diagrammatische Darstellung der Gefäßbündel a und b

Die Gefäßbündel bestehen aus 400-500 feinen Fasern und werden an entsprechende Stellen zur Verstärkung angelagert. Dabei entspricht die Anordnung der Fasern der Spannungsverteilung um das „Loch“ (Metapholem/Metaxylem). Beim Wachstum von Bambus auf steilem Untergrund ist zu beobachten, daß der Querschnitt eines solchen Bambusstammes nicht mehr rund, sondern entsprechend durch die auftretenden Lasten oval, also deformiert ist. Ebenso verhält es sich bei den Gefäßbündeln, ein weiteres eindeutiges Anzeichen für die adaptive Ausbildung der Tragstruktur des Bambus. Es wird also von einer Selbst-optimierung der Struktur ausgegangen, bei der ein System, das biologische Pflanzenzellen als „Fühler“ für externe mechanische Lasten nutzt, eingesetzt wird, um die adaptive Steuerung des Wachstumsprozesses zu gewährleisten.

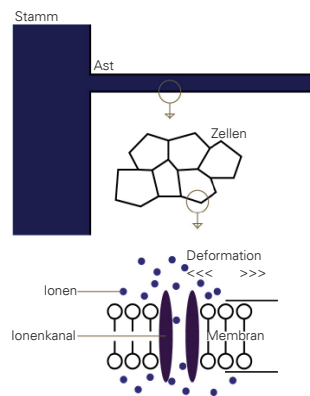


Abb. 2.1.8: Diagramm zur Erzeugung biologischer elektrischer Signale

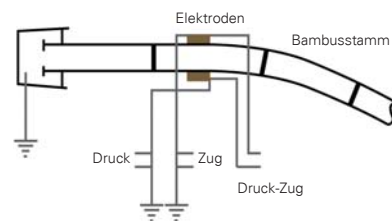


Abb. 2.1.9: Versuchsanordnung zur Messung mechanischer Stimulation

2.1.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Im Folgenden werden ein Grashalm und ein Turm ähnlicher Proportion verglichen. Nach [CIESIELSKI et al. 1985] basieren beide Konstruktionen auf ähnlichen Ansät-

zen. Beide sind Hochbaukonstruktionen mit großem Schlankheitsgrad und annähernd rundem, röhrenförmigem Querschnitt. Konfiguriert sind der Grashalm als auch die Turmkonstruktion mit in die Röhrenmatrix integrierten Bewehrungen, deren Konfiguration sich nur relativ langsam mit der Höhe ändert. Abschnitte von etwa 5 bis 10% der Länge in erster Näherung kann man als homogen konfiguriert ansehen. Die vertikale Last bei Turm und Halm - zumindest beim senkrecht gewachsenen Halm mit aufrechter Ähre unter Windstille - belasten als Zusatzlast den Schaft zentrisch und achsenparallel. Bei beiden induzieren exzentrische Belastungen in ähnlicher Weise Biegespannungen, die statisch von größerer Bedeutung sind, als die vertikalen Lasten. Darüber hinaus sind beide statischen und dynamischen Windlasten unterworfen, die noch höhere Biegespannungen induzieren können. Beim Turm induziert einseitige thermische Ausdehnung (durch Sonneneinstrahlung) hohe Eigenspannungen. Beim nicht ausgetrockneten Halm sind wachstumsbedingte Eigenspannungen relevant. Beide besitzen eine Bodenverankerung als Fundament: Der Halm das Wurzelwerk, der Turm die Basisplatte.

Funktion	Halm	Turm
Massenschwerpunkt	Blütenstand	Kopf
Vertikale Elemente	Halm	Schafthölung
Füllmaterial	Parenchym	Beton
Festigkeitselemente	Skelerenchymzüge	Stahlbewehrung
Unterteilung / Aussteifung	Knoten / Internodium	Zwischendecke
Verstärkungen	Blattscheide	Ringanker
Verankerung	Wurzel	Fundament
Äußerer Abschluss	Epidermis	Schutzanstrich
Leitungssystem	Leitbündel	Vertikale Versorgungsschächte

Abb. 2.1.10: Funktionale Gegenüberstellung von Halm und Turm

Die inneren Druckmanschetten von hohlen Pflanzenorganen sind aus einem äußeren Ring aus festigendem Gewebe und einer inneren Manschette aus Grundgewebe zusammengesetzt. Interessant ist vor allem, daß sich die Steifigkeit mit dem Binnendruck der Zellen des Grundgewebes ändern kann. Daraus ergeben sich zwei grundlegende Fragen, die für eine Umsetzung der Schlankheit eines Halmes in ein Bauwerk bzw. Tragwerk interessant erscheinen: Können Pflanzen durch aktive Ver-

änderung des Turgors, die mechanischen Eigenschaften Ihrer Halme kurzfristig ändern und können sie damit Steifigkeit und Dämpfungseigenschaften an dynamische Lasten anpassen? Und können wir dieses Wissen auf adaptive Tragwerke anwenden, die mit wesentlich weniger Material schlanker und effizientere Strukturen ausbilden können?

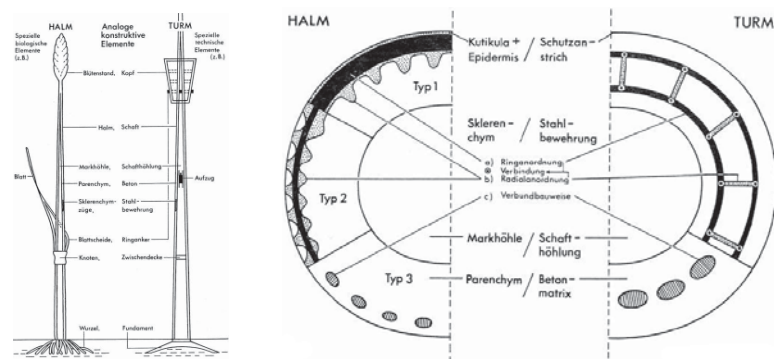


Abb. 2.1.11: Diagrammatische Zeichnerische Gegenüberstellung im Querschnitt und Grundriss

Durch den in den Zellen des Parenchymgewebes herrschenden Binnendruck (Turgor) wird die dünne Sklerenchymschicht stabilisiert. Beim Brasilianischen Riesenschachtelhalm zum Beispiel nimmt das E-Modul in Querrichtung bei sinkenden Turgordruck um den Faktor 5 ab. Um die Funktion der Druckmanschette zu gewährleisten, müssen die mechanisch sehr unterschiedlichen Gewebe verbunden werden. Dies geschieht z.B. durch keilförmige Ausbuchtungen. Bei der Mimose (*mimosa pudica*) können zum Beispiel alle Gelenke nach Reizungen Bewegungen ausführen, es handelt sich dabei um seismonastische Bewegungen, die schnellsten Bewegungen im Pflanzenreich. Bei einer direkten Gelenkreizung wird durch steife Borstenhaare eine Kettenreaktion (Hebelwirkung - Zelldeformation - Reaktion) erzeugt in deren Verlauf sich die Pflanze z.B. als Schutzmaßnahme zusammenklappt. In einer „Alles-oder-Nichts-Reaktion“ entsteht eine Bewegung durch momentanes Zusammenbrechen des Turgors in einem Zeitraum von 0,1 - 1 Sekunde.

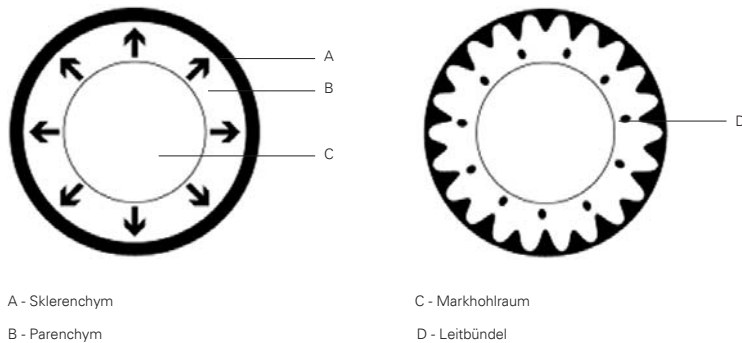


Abb. 2.1.12: Schematischer Aufbau der Druckmanschette

2.1.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Die Anordnung eines kurzfristigen reversiblen adaptiven Systems, welches aktiv auf Windlasten und Erdbeben reagiert hat den Vorteil, dass es nicht an der gesamten Höhe eines Gebäudes angeordnet sein muss, um effektiv reagieren zu können. Ausreichend für eine effektive Reaktion des Systems wären adaptive Elemente in einem Abstand ähnlich den Proportionen der Internodien beim Bambus. Nach dem Prinzip der Druckmanschette beim Bambus, könnte man einzelne tragende Bauteile zu einem adaptiven System zusammenfügen: In Rohren befinden sich elastische Pneus, welche sich sensorisch gesteuert, je nach Belastung, unterschiedlich stark aufblasen können. Der Druck des Pneus auf die Innenseite des Rohres verstärkt so dessen Trägheitswiderstandsmoment. Dies führt zu einer variablen Steifigkeit dieses Elementes, womit man auftretenden Lasten entgegenwirken könnte. Ähnlich einer variablen Vorspannung, könnte sich dieses System als besonders effektiv bei gekrümmten Einzelelementen erweisen, da ein Pneu in einem derartigen Element, dieses dazu veranlässt, seinen Zustand der Krümmung zu ändern.

In Annäherung an das Verhalten von Bambus, der mit einer Vermehrung seiner Fasern um das Leitbündel auf externe Lasten reagiert, könnten auch Tragwerke

von Bauwerken spezifischer auf ihren Standort und die dabei auftretenden Lasten reagieren. Durch Computersimulationen werden die auftretenden Lasten spezifisch für den entsprechenden Standort über einen längeren Zeitraum gemessen, um eine Überdimensionierung zu verhindern. Somit erhält man für jedes tragende Bauteil eine perfekte Anpassung an die am Standort auftretende Last.

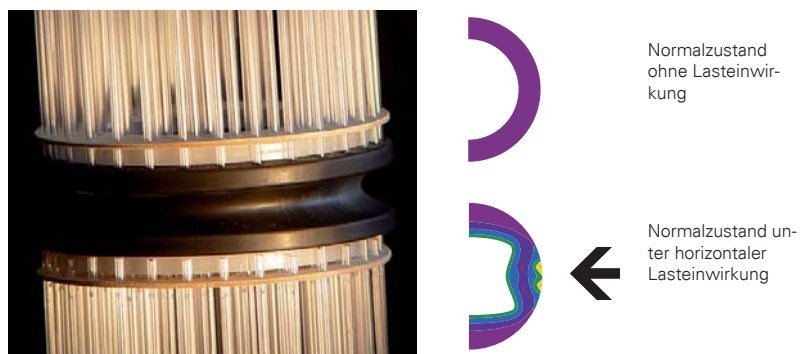


Abb. 2.1.13: Versuchsmodell und diagrammatische Darstellung der lokalen Verformung

Aufgrund der Tatsache, daß die maßgeblichen Lasten bei hohen Gebäuden kurzfristig und dynamisch auftreten, wäre eine Beschleunigung, der vom Bambus auf Lasten vollzogenen Reaktion, für eine Übertragung günstig. Die Energie der einwirkenden Kraft (Wind, Erdbeben) müsste analog zum Bambus die Gegenreaktion auslösen bzw. antreiben. Im Gegensatz zum Bambus wäre die Reaktion nur für den Zeitraum der Belastung erforderlich und sollte nicht zu einer permanenten Veränderung des Tragwerks führen. In einem Versuchsmodell wurde diese Wirkungsweise visualisiert. Die Abb. XX zeigt, wie sich die Flüssigkeiten in einem Modell verhalten, wenn eine Kraft einwirkt. Die weiche Struktur im Bereich der Internodien verformt sich und drückt dabei eine Flüssigkeit aus seinen Zwischenelementen in die Plexiglasröhren. Dabei sieht man genau, wo eine Verstärkung des Tragwerkes notwendig wäre. Bei Abnahme der Last sinkt auch wieder der Wasserspiegel.

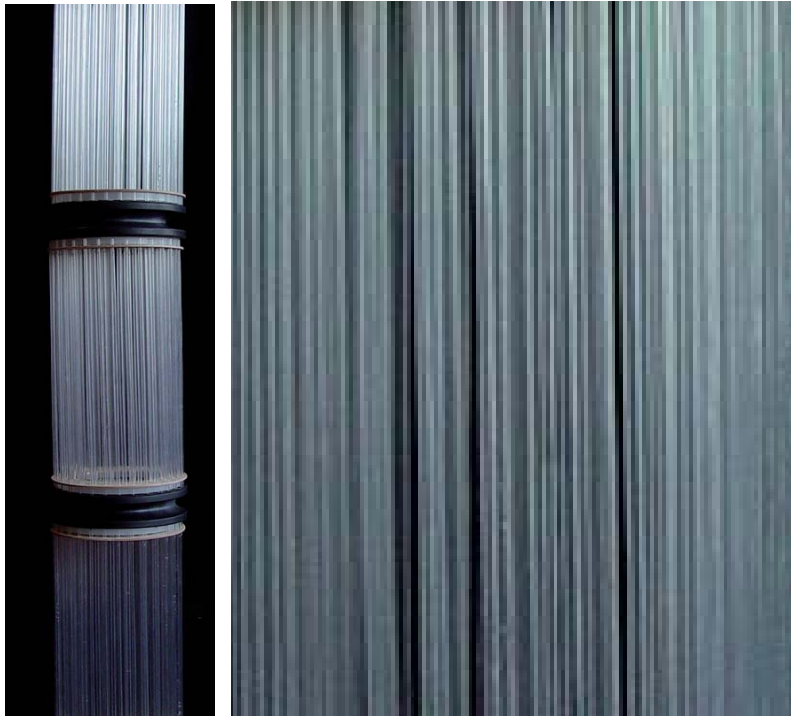


Abb. 2.1.14: Visualisierungsmodell einer Bambus affinen adaptiven Tragstruktur

2.1.7 Resümee

Die Möglichkeiten einer Umsetzung „Natürlicher Faserverbundmaterialien“ mit ihren Eigenschaften eines Biologischen Erkennungsvermögens externer Lasten sind noch lange nicht ausgeschöpft. Diese könnten zu adaptiven, spontanen Tragstrukturen für gesamte Gebäude oder Fassaden führen, die sich ihren externen Lasten autosensitiv anpassen können. Zur Zeit werden vornehmlich die Mechanismen zum Verständnis des Erkennungsvorganges erforscht wie auch die direkte Herstellung dreidimensionaler Flechtwerke mit ähnlichen Wirkungsweisen wie das Paren-

chymgewebe des Bambus.

Ein mögliches Forschungsfeld in diesem Themenbereich könnte eine zwei- bis dreigeschossige Fassadenstruktur sein, die die eintreffenden Windlasten selbstständig ermittelt und durch spontanadaptive Vorgänge entgegenbewegt.

2.2 Progressives Leichtbaumaterial

2.2.1 Inspiration

Perlmutter besteht aus einer Polymer-Keramik-Verbindung, deren mechanische Eigenschaften im Verbund die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Inhaltsstoffe übertreffen. Flache polygonale Aragonitkristalle und Proteinfasern bilden eine Art Ziegel-Mörtel-Struktur. So erreicht Perlmutter eine extrem effektive Stabilität und Beständigkeit. Von ebenso großer Bedeutung sind überkreuz angeordnete ionische Verbindungen aus bündig gefalteten Makromolekülen. Die wiederholte Entfaltung der Moleküle erlaubt eine sehr große Ausdehnung und Bedarf einer signifikanten Energie. Das bedeutet hohe Zugkraft bei gleichzeitig hoher Steifigkeit, also eine Art Progressives Leichtbaumaterial. Durch Einbringen der mechanischen Eigenschaften des Perlmutter in ein Konstruktionsprinzip z.B. einer Fassade, könnte eine Verminderung der Elastizität mit zunehmender Beanspruchung (z.B. Windkraft) erreicht werden. Durch die Anwendung dieses Prinzips könnten extrem schlank dimensionierte Fassadenprofile entstehen.

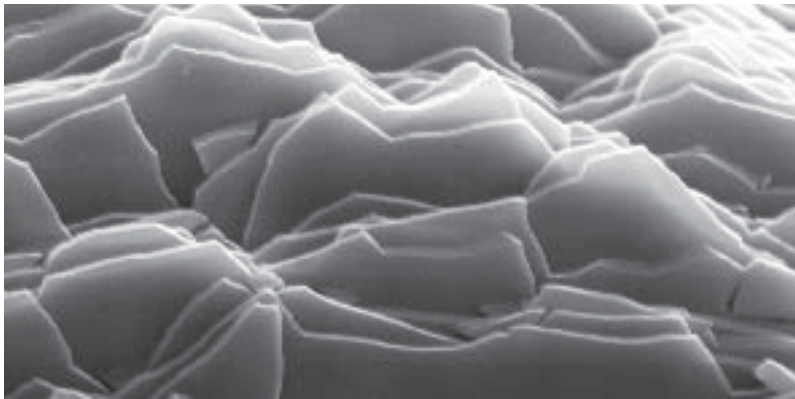


Abb. 2.2.1: Gewellte Perlmutteroberfläche durch Schichten aus ungeordneten Molekülen

2.2.2 Biologische Klassifizierung

Art	Verbundstoff	
Gesamtaufbau	Polymer-Keramik-Verbindung	
Hauptbestandteil	Kalziumcarbonat	
Nebenbestandteil	organische Substanzen	
Aufbau Nebenbestandteile	Bindemoleküle Chitin und Eiweiß	
Vorkommen	Bildung durch Weichtierarten	

Abb. 2.2.2: Biologische Klassifizierung des Bambus

2.2.3 Allgemeine Beschreibung

Der Name „Perlmutter“ entstand durch die wörtliche Übersetzung des lateinischen „mater perlarum“ (Mutter der Perlen). Der ursprüngliche Begriff bezog sich auf die perlbildenden Muschelarten. Später wurde er auf die Muschelschale und schließlich auf das innere Material der Schale übertragen. Es handelt sich hierbei um eine Polymer-Keramik-Verbindung, die in einem Selbstorganisationsprozess bei Raumtemperatur und Normaldruck entsteht. Die mechanischen Eigenschaften dieses Verbundmaterials übersteigen bei weitem die der einzelnen Inhaltsstoffe. Perlmutter ist beispielsweise hochresistent gegen Korrosion durch Seewasser. Zugleich wird Perlmutter auch wegen seiner irisierenden Ästhetik vor allem im Bereich der Schmuckherstellung sowie für Intarsienarbeiten und Verzierungen verwendet.

Der Stamm der *Mollusca* (lat. *mollis=weich*) ist mit ca. 130.000 Arten nach dem Stamm der *Arthropoda* (Gliedertiere) der artenreichste. Mollusken haben alle Lebensräume im Meer, im Süßwasser und an Land besiedelt.

Aplacophora	Wurmschnecken	gr. <i>plax</i> =Platte u. <i>phorein</i> =tragen
Polyplocophora	Käferschnecken	mit vielen Schalenplatten
Monoplacophora	nur Neopilina	mit einer Schale
Gastropoda	Schnecken	von gr. <i>gaster</i> =Bauch u. <i>pos</i> =Fuß
Bivalvia	Muscheln	von lat. <i>bivalvae</i> =Klapptüren
Scaphopoda	Kahnfüßer	von gr. <i>scaphos</i> =Kahn; <i>pos</i> =Fuß
Cephalopoda	Kopffüßer	von gr. <i>kephale</i> = Kopf

Abb. 2.2.3: Übersichtsaufstellung der Klassen des Stammes Mollusca

Der Körper der Mollusken besteht aus einem Kopf, einem Fuß und einem Eingeweidesack. Die Schale besteht aus drei Schichten, dem Periostracum (Schutzschicht aus Protein (Conchiolin) außen, dem Ostracum (Prismenschicht aus Calcit, einer Kristallform des Calciumcarbonats in der Mitte und dem Hypostracum (hier liegen Plättchen aus Calcit horizontal) innen. Die innerste Schicht bildet dabei das Perlmutter. Periostracum und Ostracum (von gr. ostrakon = Schale) entstehen am Mantelrand, das Hypostracum wird vom gesamten Mantelepithel abgeschieden. Mantelepithel und Schale liegen dabei sehr eng aneinander, nur an den Muskelansatzstellen gibt es keinen Zwischenraum. Die Perlmuttertschicht besteht aus feinsten Blättchen des rhombischen Aragonits in einer Stärke von 0,0004 bis 0,0006 mm bei einem Durchmesser von 0,01 mm. Die Aragonitblättchen sind ebenfalls in Conchyolin eingebettet und bilden lamellenartige Schichten, die sich im Schnitt als feine Streifung des Perlmutterts darstellen.

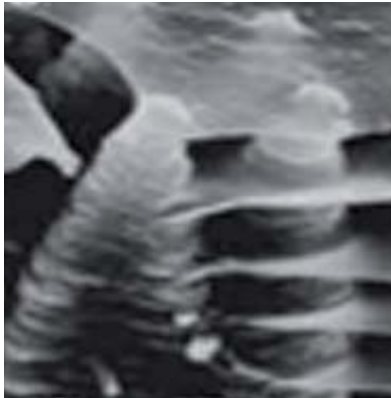


Abb. 2.2.4: REM-Aufnahmen der Perlmutterstruktur in der Perspektive

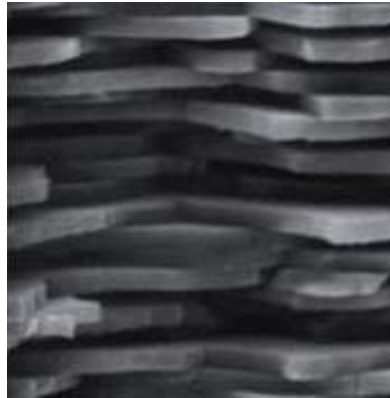


Abb. 2.2.5: REM-Aufnahmen der Perlmutterstruktur in der Schnittansicht

Perlmutter und Perlen entstehen durch Abscheidungen (Sekretionen) der im Mantelgewebe der Muschel oder Schnecke ausgebildeten Epithelzellen. Daher bestehen Perlen und Perlmutter aus den gleichen chemischen Bestandteilen, die allerdings in

sehr unterschiedlichen Mengen auftreten. Der höhere Wassergehalt des Perlmutter hat eine Steigerung der Transparenz gegenüber der Perle zur Folge. Der niedrigere Gehalt an Concholin macht zugleich Perlmutter etwas weniger empfindlich gegen Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge, die z.B. durch Erwärmung hervorgerufen werden können. Dagegen ist die Säureempfindlichkeit des Perlmutter ebenso groß wie die der Perle. Die Elastizität des Perlmutter ist deutlich geringer als bei Perlen und bewirkt eine gesteigerte Empfindlichkeit gegen Schlag und Druck. Lässt man ein Perlmutterstück auf eine harte Unterlage fallen, so kann es entlang seiner Wachstumsschichten platzen.

Die Struktur ist ein Mörtel-Ziegel Aufbau: Die Ziegel sind hierbei flache polygonale Kristalle aus Aragonit und der Mörtel besteht aus Polysaccharid und Proteinfasern, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind und die Aragonitplättchen verbinden. Die Zellen des Tieres, die für den Aufbau der Schale verantwortlich sind, produzieren zuerst die organische Matrix. Erst im Nachgang werden die Zwischenräume mit den formgebenden Kristallen ausgefüllt. Durch Poren in der Proteinmatrix kann, entfernt von den produzierenden Zellen, der Ionenaustausch stattfinden, ohne dass die Zufuhr des erforderlichen Rohmaterials für das Wachstum vor Ort gestört wird. Das Wachstum durch diese Mineralbrücken sichert wiederum die Anpassung der Achsen der Kristalle entlang des Stapels ohne dabei den Wechsel zwischen Mörtel und Ziegelschicht zu unterbrechen was schließlich für die Elastizität des Materials sorgt und somit die Bruchfestigkeit erhöht.

2.2.4 Phänomenologische Betrachtung

Durch die Analogieforschung des Perlmutter und anderer Knochenmaterialien wurden grundlegende Meilensteine in der Entwicklung von Kompositmaterialien gelegt. Die Ziegel-Mörtelanordnung von organischen und anorganischen Schichten beim Perlmutter wurde als die entscheidende Eigenschaft extrem effizienter Kompositwerkstoffe lokalisiert und als eine der effektivsten Strategien moderner Materialwissenschaften erkannt. Diese Komposition ist ideal für Materialeigenschaften wie Stabilität und Elastizität. Von großer Bedeutung sind dabei überkreuz angeordnete ionische Verbindungen bestehend aus bündig gefalteten Makromo-

lekülen. In der Abb. 2.2.7 erkennt man ein fortlaufendes Spannungs-Dehnungsdiagramm, das während eines Zugversuchs der Perlmuttertschicht einer Meerohrschale aufgezeichnet wurde. Diese Bruchergebnisse, die ein Sägezahnprinzip abbilden sind in jeder dieser Kurven sichtbar. Da die Oberfläche zwischen den Zugversuchen nicht beeinträchtigt worden ist, ist dies ein Beweis für eine Art Zurückfalten der Moleküle.

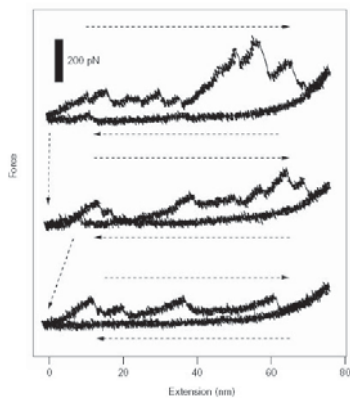


Abb. 2.2.6: Fortlaufende Spannungs-Dehnungskurven an der Perlmuttertschicht einer Meerohrschale

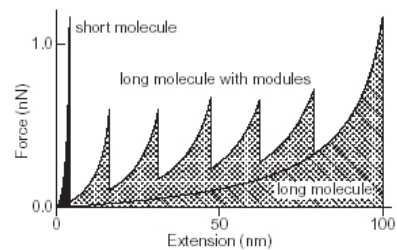


Abb. 2.2.7: Vergrößerter Teilausschnitt

In der Abb. 2.2.6 sind drei unterschiedliche Situationen dargestellt, die kurzen Moleküle, die langen Moleküle und die langen Moleküle mit Modulen. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm zeigt, daß die Verbindungen der kurzen Moleküle bis zur erreichten Bruchspannung mit nur kleiner Deformation bestehen. Das bedeutet die aufzubringende Energie (Fläche unter der Kurve) bleibt klein. Das lange Molekül verhält sich wie eine Feder und gibt der Zugkraft erst nach einer sehr großen Änderungen nach. Die Energie ist dabei zum kurzen Molekül bei gleicher Bruchspannung vergleichsweise größer, die Längenänderung ist jedoch schon bei kleinern Kräften sehr groß. Anders verhält sich das lange Molekül mit Modulen, das aus zwischengelagerten Verbindungen besteht. Dieses hält größeren Kräften schon bei ge-

ringerer Dehnung stand. Die wiederholte Entfaltung dieses Moleküls erlaubt eine sehr große Ausdehnung und Bedarf einer signifikanten Energie. Das bedeutet hohe Zugkraft bei gleichzeitig hoher Steifigkeit, eine besonders spannende Kombination, denkt man dabei an Tragwerks- oder Fassadenstrukturen.

Das E-Modul ist dabei das Maß für die Festigkeit eines Materials. Es gibt an, um wieviel sich ein Werkstoff unter einer bestimmten Belastung dehnt. In der Abb. 2.2.8 sind mehrere Materialien mittels Spannungs-/Dehnungskurven dargestellt:

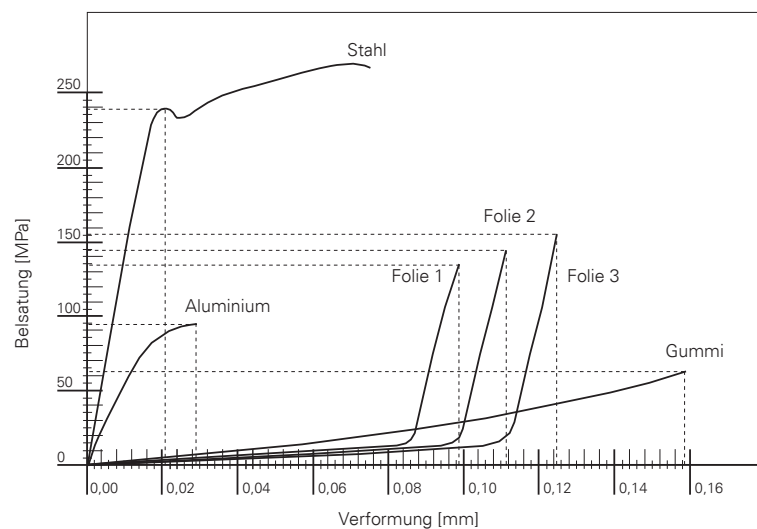


Abb. 2.2.8: Diagrammatische Darstellung der Spannungsverläufe verschiedener Materialien

Das Verhalten von künstlichem Perlmutter (dazu mehr im Resümee) ähnelt bei geringer Beanspruchung (1. Phase) dem Verhalten von Gummi und bei zunehmender Beanspruchung (2. Phase) dem von Stahl. In der Abb. 2.2.9 sind die jeweiligen Kennwerte für das künstliche Perlmutter in zwei Phasen aufgetragen. Daraus lässt sich ableiten, daß der Kompositwerkstoff Perlmutter quasi ein progressives Verhalten

aufweist, indem es bei geringer Beanspruchung oder Verformung elastisch bleibt und bei zunehmender Beanspruchung seine Steifigkeit ändert.

Werkstoff	E-Modul [N/mm ²]	zul. Zugspannung [N/mm ²]
Stahl	210.000	210
Kupfer	130.000	
Aluminium	72.000	150
Beton (Druckbeanspruchung)	50.000	
Bronze	118.000	
Laubholz (senkrecht zur Faserrichtung)	600	0,05
Natürliches Perlmutter	64.000	130
Künstliches Perlmutter (1. Phase)	11.000	100
Künstliches Perlmutter (2. Phase)	100.000	180

Abb. 2.2.9: Darstellung des E-Moduls und der zulässigen Zugspannung verschiedener Materialien

2.2.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Diese besonderen Materialeigenschaften könnte man in der Architektur und dort vor allem im Fassadenbau gut nutzen, denkt man z.B. an das Belastungsverhalten einer mehrgeschossigen Glasfassade bei eintreffenden Horizontallasten aus Wind- oder Erdbebenkräften. Dimensioniert werden moderne Fassadenkonstruktion für auftretende Lasten immer mit Annahme der ungünstigsten Belastung plus einen zusätzlichen Sicherheitsbeiwert, der nicht selten bei Faktor 2 liegt. Die Natur kann sich einen solch ineffizienten Umgang mit Material oder besser Ressourcen nicht leisten und kommt daher immer zu Lösungen, die sich ihrer Umgebung anpassen können, dies entweder evolutionär einmalig oder sogar permanent adaptiv.

2.2.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Die mechanischen Eigenschaften des Perlmutter könnten also zu neuartigen Konstruktionen aus neuartigen Materialien führen, z.B. zu einem Konstruktionsprinzip im modernen Fassadenbau, das durch Verminderung der Elastizität bei zunehmender Beanspruchung, z.B. durch Windkraft, eine höhere Steifigkeit aufbaut. Profile aus

diesem Material wären ergo wesentlich schlanker und ihren Anforderungen perfekt angepasst. In Modellstudien wurde des Aufbau der Perlmutterarchitektur exemplarisch nachgebildet um sich ein räumliches Verständnis dieses komplexen Materialaufbaus vor Augen führen zu können.

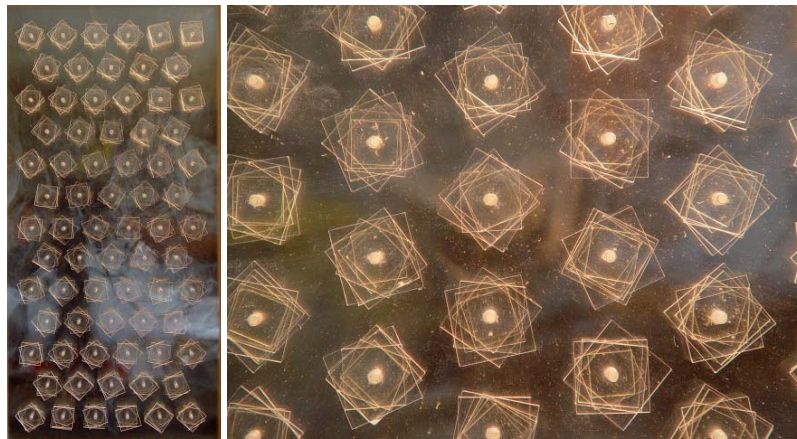


Abb. 2.2.10: Visualisierungsmodell der Perlmutterarchitektur in zwei Größen

2.2.7 Resümee

Durch eine abwechselnde Anordnung von Polyelektrolyten und Tonplättchen in mehreren Spülvorgängen wurde Ende Mai 2003 von N. A. Kotov und seinem Team erstmals demonstriert, dass beide konstruktiven Eigenschaften künstlich reproduziert werden konnten. Kotov erzeugte dabei eine Folie von ca. 2 x 4 cm Größe und 2 μm Dicke. Durch diesen einfachen Vorgang erhält man eine Art Miniaturversion des natürlichen Perlmutter mit alternierenden organischen und anorganischen Schichten, eine Art von Progressivem Leichtbaumaterial. Die gefalteten Makromoleküle wiederum bilden sich in genau dem Sägezahnprinzip von Differenzialdehnungskurven ab, die auf das Aufbrechen der ionischen Verbindungen innerhalb des jeweiligen Makromoleküls zurückzuführen sind. So erreichen die hergestellten Multilayer na-

hezu Zugfestigkeiten von Perlmutter. Ähnlichkeiten in Konstruktion und Funktionalität machen diese Ton-Polyelektrolyt Multilayer zu einer Nachahmung natürlicher Bio-kompositwerkstoffe.

Dabei werden die Aragonitplättchen und das Conchym durch Tonplättchen und Polyelektrolytketten ersetzt. Leider ist bei dieser Lösung der organische Anteil wesentlich höher als im natürlichem Perlmutter. Die Herstellung erfolgt schichtweise mit Polyelektrolyten (P) und Tonplättchen (C=clay), die Stärke eines Tonplättchens beträgt ca. 0,9 nm (vgl. Aragonit: 400 - 600 nm), wobei dazwischen Spülvorgang nötig sind, damit nicht gebundenes Material weggespült wird. Die Verbindungen zwischen den Schichten werden über Ladungen eingegangen, wobei die Tonplättchen negativ und die Polyelektrolyten positiv geladen sind. Mit zunehmender Beanspruchung werden die Polyelektrolytketten gedehnt, die Verbindungen lösen sich dann teilweise und bilden sich wieder neu. Durch diese Rückfalten der Molekülverbindungen werden die eingegangenen Verbindungen von mal zu mal fester.

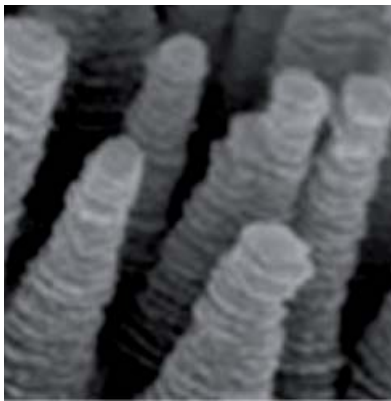


Abb. 2.2.11: REM-Aufnahmen des künstlichen Perlmutter

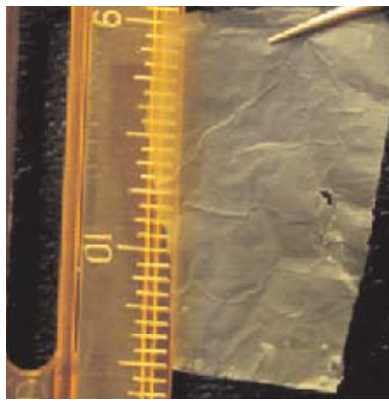


Abb. 2.2.12: Künstliches Perlmutter

2.3 Biogener Glasfaserverbundwerkstoff

2.3.1 Inspiration

Der Glasschwamm *euplectella* zeigt, welche außergewöhnlichen Materialien und Strukturen die Natur aus einfachsten Rohstoffen herstellen kann. Der in Meerestiefen von 500 bis 5000 Metern lebende Schwamm besitzt ein käfigartiges, aus Glasfasern bestehendes Skelett. Von diesen Glasfasern ist bereits bekannt, dass sie ausgezeichnet Licht leiten können, warum es jedoch möglich ist eine derart filigrane Struktur aus einem so spröden Material herzustellen, die den beträchtlichen mechanischen Beanspruchungen in der Tiefsee widerstehen kann, ist bis heute erst ansatzweise geklärt. Denn trotz des Einsatzes eines sprödelastischen Werkstoffes ist diese Konstruktion nahezu unzerbrechlich. Diese Biogene Glasfaserverbundwerkstoffe stehen im Fokus des vorliegenden Kapitels, könnten sie doch Ideenlieferanten für neuartige Glasverbundwerkstoffe sein, die einem sprödelastischen Material durch geschickte Fügeverfahren eine hohe Flexibilität vermitteln könnten.

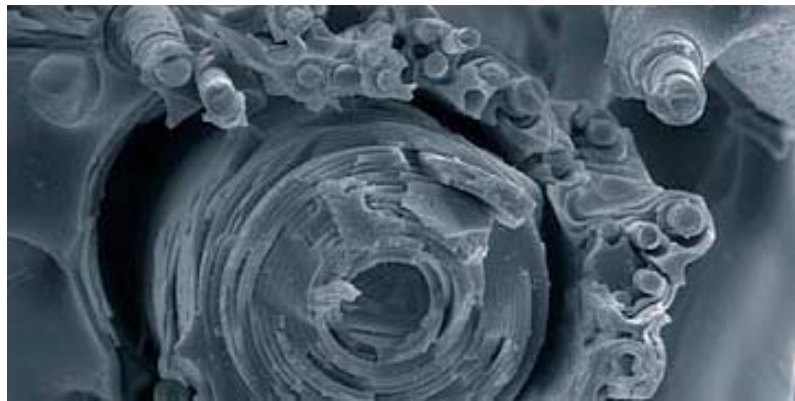


Abb. 2.3.1: Glasschwammstruktur

2.3.2 Biologische Klassifizierung

Klasse	Glasschwämme	<i>hexactinellida</i>
Ordnung	Lyssacinosida	<i>lyssacinosida</i>
Familie	Euplectellida	<i>euplectellida</i>
Gattung	Euplectella	<i>euplectella</i>

Abb. 2.3.2: Biologische Klassifizierung des Glasschwamms

2.3.3 Allgemeine Beschreibung

Der *euplectella aspergillum* gehört zur Klasse der Glasschwämme (*hexactinellida*) aus dem Stamm der Schwämme (*porifera*). Zu den Glasschwämmen zählen etwa 500 Arten, die ausschließlich im Meer und bis in die Tiefsee leben. Glasschwämme stellen 7% aller bekannten Schwammarten in der Ordnung der Porifera dar. Glasschwämme bilden in ihrem Skelett grundsätzlich verschiedene Nadelformen auf, die aus amorphem, wasserhaltigem Siliziumdioxid (biogenem Glas) aufgebaut sind. Paläontologisch gesehen, gehören die Glasschwämme zu den ältesten vielzelligen Tieren der Erdgeschichte. Sie wurden schon in etwa 540 Millionen Jahre alten Gesteinsschichten nachgewiesen und erreichten Ihre höchste Verbreitung vor etwa 200 Millionen Jahren im Oberen Jura. Die *hexactinellida* waren bedeutende Riffbildner, vergleichbar mit den heute lebenden Korallen.

Der Lebensraum der *euplectella aspergillum* ist der Westpazifik nahe der Philippinen. Der Schwamm findet sich in Tiefen zwischen 500 und 5000 Metern angehaftet an Gesteinsformationen auf dem Meeresgrund. *Euplectella aspergillum* ist nahezu radial symmetrisch und kann Größen von 7,5 cm bis zu 1,3 m erreichen. Im Durchschnitt ist der Schwamm 20 bis 25 cm groß. Die seitlichen Öffnungen „Osculare“ haben einen Durchmesser von bis zu 3 mm, wobei die Größe dieser Öffnungen mit zunehmender Höhe des Schwammes ansteigt. Das Skelett des lebenden Schwammes besteht aus einem Gewebe aus nur zwei unterschiedlichen Zelltypen, die das Skelett überziehen. Mittels verlängerter peitschenartiger Fortsätze, die in das Schwamminnere hineinragen, nimmt der *euplectella aspergillum* Mikroorganismen und organische Rückstände aus dem Meerwasser auf, während seine durch-

lässige Struktur durchströmt wird. Leider ist über den *euplectella aspergillum* sehr wenig über sein Wachstum, das aktive Leben und die Reproduktion dieser Art bekannt, da er nur in großen bis sehr großen Tiefen gefunden werden konnte.

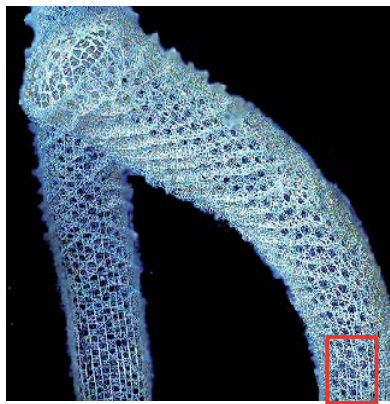


Abb. 2.3.3: Skelett zweier *euplectella aspergillum* nebeneinander

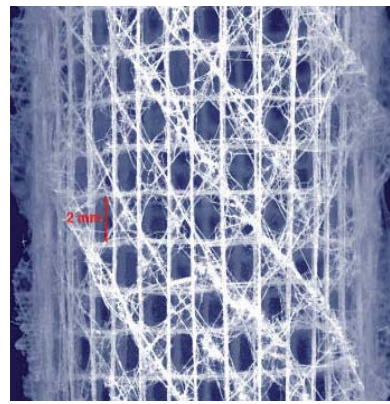


Abb. 2.3.4: Skelettausschnitt des *euplectella aspergillum*

2.3.4 Phänomenologische Betrachtung

Wissenschaftler der Bell Labs an der Universität in Kalifornien und des Max-Planck-Instituts für Kolloid und Grenzflächenforschung in Potsdam haben den Tiefseeschwamm *euplectella aspergillum* vor kurzem eingehend untersucht. Die Fasern sind über viele Größenordnungen, vom Nanometer- bis zum Zentimeterbereich, und in insgesamt sieben hierarchischen Ebenen optimal miteinander verknüpft. Diese natürliche Konstruktion ist ein erstaunliches Beispiel, wie sich mit spröden Materialien wie z.B. Glas bruchfeste Strukturen erzeugen lassen. Einzelne dieser Prinzipien sind in der Werkstoffwissenschaft, in der Mechanik und in der Architektur bereits bekannt und werden in Ansätzen auch eingesetzt. Wirklich erstaunlich ist jedoch der Umstand, dass der Schwamm in der Lage ist eine ganze Reihe von mechanischen Konstruktionsprinzipien in unterschiedlichen Maßstäben vom Nanometer-

bis zum Zentimeterbereich gleichzeitig zu kombinieren. Der grundlegende Prozess für den Aufbau von Hartsubstanzen bei Lebewesen ist die Biomineralisation. Die meisten Lebewesen mineralisieren zumindest einen Teil ihres Körpers, meist ein Skelett oder eine Schale. Die Biomineralisation gliedert sich in zwei Bereiche, das Entstehen des Biominerals und den hoch komplexen Prozess der Steuerung des Wachstums. Wirbeltiere, also auch der Mensch, produzieren im genetisch gesteuerten Prozess der Biomineralisation Knochen und Zähne auf Basis vom Kalzium. Bei einfacheren Lebensformen, so auch beim Glasschwamm *euplectella aspergillum*, dient häufig auch einfaches Silizium als Ausgangsmaterial für die Mineralisierung des Skelettes.

Die Erdkruste besteht zu 28 Gewichtsprozent aus Silizium und zu 47 Gewichtsprozent aus Sauerstoff. Daher ist die Silizium-Sauerstoff-Bindung mit Abstand am häufigsten in den Mineralien der Erdkruste zu finden. Im Meerwasser jedoch ist Silizium nur in geringen Spuren vorhanden. Dennoch ist das Element Silizium für eine Reihe von im Meerwasser lebenden Organismen von wesentlicher Bedeutung. Verglichen mit der grossen Anzahl von Organismen, deren Hartsubstanz aus Carbonaten besteht, existieren nur wenige, die ihre Hartsubstanz aus amorpher Kieselsäure aufbauen. Dazu gehören z.B. die Radiolarien, die Diatomeen, einige höhere Pflanzen und einige Schwämme. Immer dort, wo Kieselsäure bei Organismen zur Anwendung kommt, fungiert sie als einziges Bauelement und wird in ihrer endgültigen Erscheinungsform nicht mit organischen Komponenten kombiniert. Im Gegensatz zu menschlichen Knochen sind in silikatischen Hartsubstanzen Spuren von anderen organischen oder anorganischen Substanzen nur dann enthalten, wenn es sich um Verunreinigungen handelt. Diese Verunreinigungen erfolgen während der Abscheidung, da hierbei organisch Moleküle beteiligt sind.

Kieselsäure (Monokieselsäure) bzw. hydratisiertes Siliciumdioxid $\text{Si}(\text{OH})_4$ findet sich in der Natur in allen Gewässern und Flüssigkeiten von Pflanzen und Tieren. Ihre Konzentration beträgt in der Regel nur wenige Milligramm pro Liter. Die Monokieselsäure bildet ein tetraedrisch gebautes Silikat-Ion, wobei die Monokieselsäure eine starke Tendenz zur intermolekularen Kondensation hat (d.h. die Wasserabspaltung erfolgt zwischen den beiden Molekülen). Durch weitere Kondensation entstehen Tri- und Tetrakieselsäuren, bzw. Polykieselsäuren. Die Kondensation der Kie-

säure erfolgt nicht geordnet, so dass nur kettenartige Kondensationsprodukte entstehen, sondern ohne Bevorzugung einer bestimmten Kondensationsart. Daher entstehen auch bänder-, schicht-, und gerüstartige Vernetzungen der Monokieselsäure, die dann in kugelförmige übergehen. Solche Polykieselsäuren werden als Kieselgel bezeichnet. Bei weiterer Kondensation entsteht Kieselsäuregel. Der Ablauf der Polykondensation trifft auf wässrige silikathaltige Lösungen zu, wobei in den Körperflüssigkeiten von Pflanzen und Tieren auch eine Vielzahl anderer Komponenten wie z.B. Proteine und Enzyme gelöst sind. Diese treten mit der Kieselsäure in Wechselwirkung und tragen entscheidend auch zu den Eigenschaften der entstehenden Hartsubstanz bei. Im Gegensatz zu industriellen Bedingungen findet die enzymkatalysierte Polykondensation bei Umgebungstemperatur und Luftdruck und bei neutralem pH-Wert statt.

Die entscheidende Rolle im Ablauf der enzymkatalysierten Kondensation spielen organische Filamente von 1 bis 2 μm Stärke, die im Zentrum jeder einzelnen Faser axial über die gesamte Länge verlaufen. Die Form im Querschnitt kann dabei stark schwanken, dies sogar innerhalb einer einzelnen Gattung. Diese Filamente dienen als Trägersubstanz auf deren Oberfläche 50-80 nm starke Silizium-Nanosphären in konzentrischen, mehreren Partikel starken Schichten abgelagert werden. Der mit funktionalen Gruppen besetzte organische Faden dient hierbei auch als Kristallisationskeim. Zusätzlich zu ihrer Rolle als Träger steuern und katalysieren die organischen Filamente durch die Abgabe von Enzymen an die nächste Umgebung die Polykondensation der Kieselsäure. Die organischen Substanzen, die hierbei in die Polykieselsäure eingebunden werden, tragen maßgeblich zu den Eigenschaften des entstehenden biogenen Glasfaserverbundwerkstoffes bei. Durch die gezielte Abgabe von Enzymen kann der Organismus die Ablagerung des Siliziums auch dann noch kontrollieren, wenn das organische Filament nach den ersten Stufen der Mineralisation komplett bedeckt ist. Das Wachstum der Skelettstruktur des *euplectella aspergillum* ist also in Morphologie und Orientierung durch die grundlegende Gerüststruktur der Filamente bereits vorgeprägt. Es ist jedoch noch nicht klar, ob die Abscheidung der Kieselsäure bereits während des Wachstums des organischen Fadens stattfindet oder erst später einsetzt. So wurde beim Glasschwamm *ephydatia* beobachtet, dass die Abscheidung nicht gleichzeitig über den ganzen Faden, sondern von dessen Mitte zu den Enden erfolgt. Ob diese Beobachtung verall-

gemeinert werden kann, ist momentan noch nicht bekannt.

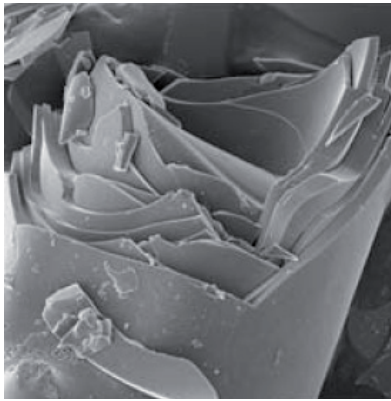


Abb. 2.3.5: Bruchstelle einer Faser

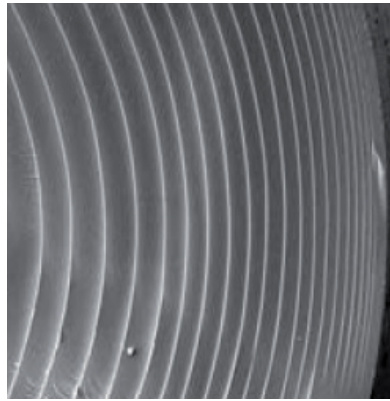


Abb. 2.3.6: REM: Konzentrische Schichten 5 μm

Von besonderer Bedeutung für die strukturelle Festigkeit des vorab beschriebenen Glasschwammskelettes ist die auffällig ausgeprägte Strukturhierarchie, die u.U. zu neuen Erkenntnissen bei der Überlagerung sprödelastischer Materialien führen könnte.

- **Siliciumnanosphären - Ebene 1:** Auf der untersten Ebene der strukturellen Hierarchie sind nanometer große Siliziumpartikel um ein organisches, axiale ausgerichtetes Filament angeordnet.

Diese erste hierarchische Ebene ist biologisch erzeugtes Glas, das aus zusammengesetzten Siliziumnanosphären besteht, die in konzentrischen, wenige Partikel starken Schichten um ein Protein Filament herum abgelagert werden. Glas als Material für Konstruktionen leidet unter seiner Zerbrechlichkeit. Das bedeutet, dass seine Stärke hauptsächlich von Beschädigungen der Oberfläche begrenzt wird, an denen sich die auftretenden Kräfte konzentrieren. Ein Kratzer in der Oberfläche des Glases bedeutet häufig einen sofortigen

Bruch. Wenn man den Lebensraum von *euplectella aspergillum* bedenkt, so erscheint eine Beschädigung der Fasern (auf biologische oder mechanische Art) und damit ein Versagen der Glasfaser sehr wahrscheinlich.

- **Fasern - Ebene 2:** Auf der zweiten Ebene darüber formen wechselnden Schichten aus Siliziumpartikeln und organischen Zwischenlagen dünne Fasern aus.

Die eingeschränkte Verwendbarkeit von Glas als Baumaterial wird auf der nächsten strukturellen Ebene ausgeglichen. Die gesamte Faser kann als laminiertes Verbundwerkstoff aus Silizium und organischen Zwischenlagen, die als Bruchstopper dienen, betrachtet werden. Sollte eine solche Faser Punktlasten ausgesetzt werden, so beschränkt sich der entstandene Schaden auf die äußersten Lagen. Eine große Zahl einzelner Siliziumlagen sollte die Versagertoleranz der Fasern wesentlich erhöhen. Die abnehmende Stärke der Siliziumschichten vom Zentrum der Faser nach Aussen hin stellt eine weitere Optimierung der Fasern dar. Die Dicke der inneren Schichten verstärken die mechanische Stabilität der Faser. Zahlreiche dünnere Außenschichten stellen eine wirkungsvolle Ablenkung des Risspfades in der Faser sicher.

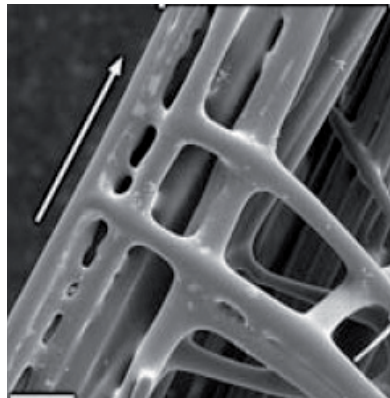


Abb. 2.3.7: REM-Aufnahme: Faser-Verbund-Struktur der Stränge; 20 μm



Abb.2.3.8: REM-Aufnahme: Knotenpunkte der Gitterstruktur; 100 μm

- **Stränge - Ebene 3:** Auf der dritten Ebene werden mehrere Fasern zu größeren, tragfähigeren Strängen gebündelt.

Bündel aus einzelnen, parallel verlaufenden Fasern werden auf einer weiteren Ebene zu stärkeren Strängen zusammengefasst, ein bekanntes Konstruktionsprinzip bei Verbundwerkstoffen. Das Faserbündel ist in einem Mantel aus weniger stark kondensiertem, bzw. stärker hydratisiertem Silizium eingebettet. Die weniger stark ausgeprägte Struktur des Mantelmaterials bewirkt eine vergleichsweise erhöhte Flexibilität und eine geringere Härte wie bei den einzelnen Fasern. Auch der Mantel selbst weist einen schichtweisen Aufbau auf. Eine Beschädigung der Fasern wird weiter erschwert.

- **Gitterstruktur - Ebene 4:** Auf der vierten Ebene werden diese Stränge zu einer Gitterstruktur zusammengefügt. Diese Stränge sind dann mit einem Mantel aus Silizium überzogen, der in den Knotenpunkten die Verbindung herstellt.

Die Stränge aus gebündelten Fasern bilden auf der nächsten Stufe der Hierarchie eine Gitterstruktur aus. Die in den Knotenpunkten übereinander verlaufenden Stränge werden ebenfalls über den die gesamte Struktur überziehenden Siliziummantel fest verbunden. Meist bilden mehrere parallel zueinander verlaufende und punktuell über Brücken des Mantels verbundene Stränge nochmals stärkere Strangbündel aus. Die so entstandenen, besonders tragfähigen Elemente finden sich an den am stärksten beanspruchten Stellen der Gitterstruktur.

- **Zylindrische Gitterstruktur - Ebene 5:** Auf der fünften Ebene wird eine zylindrische Gitterstruktur mit vertikalen, horizontalen und diagonalen Streben ausgebildet, die allen auftretenden Belastungen extrem gut widerstehen kann. Die einzelnen Stränge sind horizontal und vertikal zu einer stabilen Gitterstruktur angeordnet. Unterstützende diagonale Stränge verlaufen in beide Richtungen über den Zylinder. Theoretische Analysen von Stab-Strukturen haben gezeigt, dass eine Struktur auch dann, wenn die Knoten frei rotieren können, stabil ist, wenn die Anzahl der Stäbe pro Knoten (Z) einen bestimmten

Wert übersteigt. Nach Deshpande ist die Stabilitätsgrenze für Gitter in $D=2$ oder $D=3$ Dimensionen $Z > 6(D-1)$. Ein einfaches, rechtwinkliges Gitter mit $D=2$ und $Z=4$ ist somit deutlich instabil. (z.B. in Bezug auf Scherkräfte) Im Skelett-System von *euplectella aspergillum* treffen sich drei Faserstränge in jedem Knoten (Horizontale, Vertikale und eine der zwei möglichen Diagonalen). Z ist somit 6, genau die richtige Anzahl für ein zweidimensional stabiles Gitter.



Abb. 2.3.9: REM-Aufnahme: Aufbau eines Stranges aus unterschiedlich grossen Fasern; 50 μm

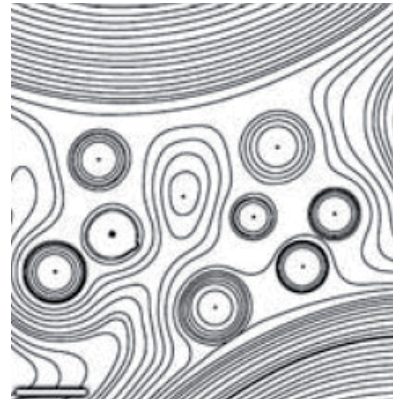


Abb. 2.3.10: Schnitt durch einen Strang

Erstaunlicherweise ist nun, daß genau in jedem zweiten Feld der diagonale Strang fehlt, denn zusätzliche Diagonalen in diesen Feldern ($Z=8$; genügt nicht um dreidimensionale Stabilität zu erreichen) würden keine zusätzlichen strukturellen Vorteile bringen. D.h. die Natur verzichtet genau an der Stelle auf eine Diagonale, an der auch Deshpande keine vorgesehen hatte. Die Anordnung der Stränge in der Gitterstruktur entspricht der effizientesten Lösung bezogen auf das perfekte Verhältnis zwischen Stabilität und Materialaufwand. Die Lage der Diagonalen in der Struktur stimmt nicht genau mit der der Knoten aus den Horizontalen und Vertikalen überein. Meist besteht eine Diagonale auch aus

zwei separaten Strängen, die jeweils leicht versetzt zu den Knoten über den Zylinder verlaufen. In keinem der Knotenpunkte müssen so mehr als zwei Faserstränge miteinander verbunden werden, wodurch möglicherweise eine Überbeanspruchung der Verbindungen vermieden wird. Die aus dieser Anordnung resultierende Gitterstruktur stellt eine sehr gute Stabilität in zwei Dimensionen sicher und beinhaltet bereits mehrere Maßnahmen um die Zerbrechlichkeit der biogenen Glasfasern auf lokaler Ebene zu mindern.

- **Ringförmige Grate - Ebene 6:** In der sechsten Ebene der Hierarchie verstärken ringförmige Grate den Zylinder weiter und verhindern Torsion und Ovalisierung der Struktur.

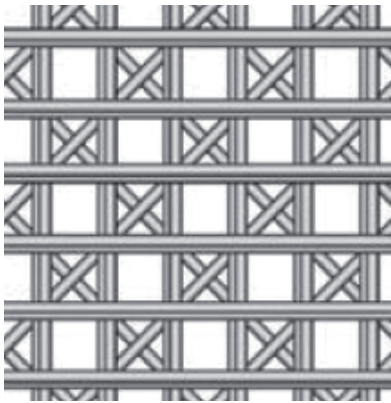


Abb. 2.3.11: Schematisches Diagramm der zylindrischen Gitterstruktur

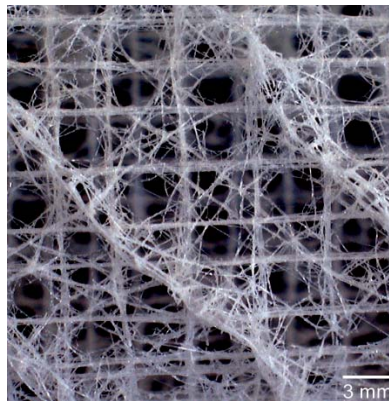


Abb. 2.3.12: Detail der Gitterstruktur, Lage der Diagonalen, 3 mm

Da die zylindrische Gitterstruktur auch dreidimensional stabilisiert werden muss, sind in der sechsten Ebene Elemente gegen den Hauptversagensmechanismen (Torsion und Ovalisierung des Zylinders) eingesetzt. Torsion und Ovalisierung würden die Biegestabilität des röhrenartigen Käfigs deutlich herabsetzen. Zu diesem Zweck verlaufen ringförmige, verstärkte Grate schräg

über den Zylinder. Diese Grate fehlen im unteren Bereich der Struktur gänzlich, nehmen dann aber mit der Höhe des Skelettes an Stärke und Dichte zu, genauso proportional wie auch die Belastungen auf die Struktur in größerer Höhe ansteigt.

- **Verankerung - Ebene 7:** Auf der siebten Ebene ist die gesamte Struktur über ein flexibles Faserbündel im Meeresboden verankert.

Auf das im Meeresgrund verankerte, starken Strömungen ausgesetzte, Schwammskelett wirken Biegemomente, die sich in der Verankerung der Struktur konzentrieren. Es bestehen zwei unterschiedliche Möglichkeiten diesen Belastungen zu begegnen: Eine Verstärkung der Verankerung, die den auftretenden Kräften dann bis zu einem gewissen Grad widerstehen kann und dann bricht, oder aber eine flexible Verankerung. Bei *euplectella aspergillum* ist das letztere Prinzip zu finden. Der Schwamm ist über ein Bündel Fasern, das nicht mit dem Siliciummantel überzogen und daher noch sehr flexibel ist, im Meeresboden verankert. Die Tiefe der Verankerung beträgt meist nur wenige Zentimeter. Der Vorteil dieser flexiblen Verbindung ist, daß keine Kräfte aus Meeresströmungen auf die Struktur wirken. Der Schwamm bewegt sich einfach mit den wechselnden Strömungen.

2.3.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Ein Vergleich der Eigenschaften von biogenen Glasfasern mit denen von technisch hergestellten Glasfasern lässt sich anhand des Glasschwammes *monorhaphis* anstellen. Die Fasern dieses Schwammes sind denen des *euplectella aspergillum* in Struktur und chemischer Zusammensetzung ähnlich, weisen aber häufig einen Durchmesser von mehreren Millimetern auf. Fasern dieser Stärke sind bei Glasschwämmen sonst ungewöhnlich, machen aber vergleichende Versuche mit anderen Materialien erst möglich. Die Elastizität und die Belastbarkeit von biogenen Glasfasern wurden anhand eines 3-Punkt Biegetests mit denen von technisch hergestellten Glasstäbchen von ungefähr gleicher Stärke verglichen. Die Ergebnisse bestätigen den generellen Eindruck der hohen Flexibilität biogener Glasfasern: Die

Bruchspannung liegt viermal so hoch wie die der Glasstäbchen, der Elastizitätsmodul beträgt nur ungefähr die Hälfte. Diese Eigenschaften lassen sich letztendlich auf die Hydratisierung des Siliciumdioxids, aus dem die biogenen Fasern aufgebaut sind, zurückführen.

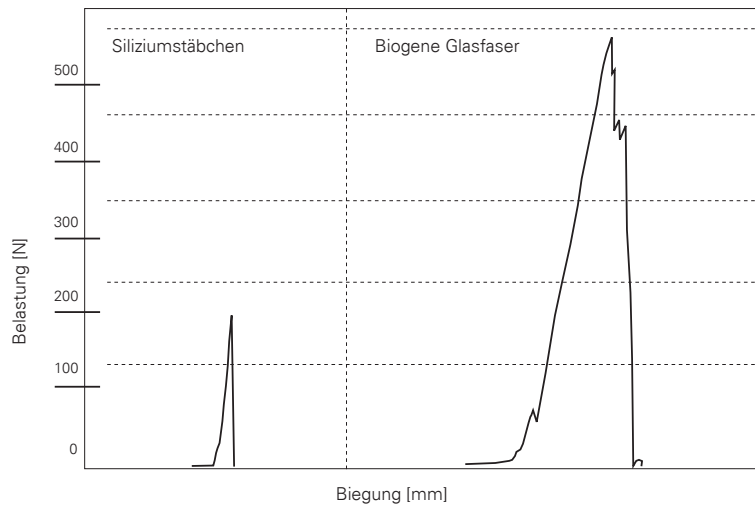


Abb. 2.3.13: Diagrammatische Darstellung des Spannungsverlaufes eines Siliziumstäbchens und einer Biogenen Glasfaser

	Siliziumstäbchen	Biogene Glasfaser
Anzahl der Muster	12	12
Durchmesser [mm]	1.98-2.08	1.59-2.30
Durchschnittliche Bruchbelastung [MPa]	155	593
Standard Deviation [MPa]	28	165
Biegung [mm]	0.5	2.7

Abb. 2.3.14: 3-Punkt Bruchversuch (Abstand zwischen den Auflagerpunkten = 30 mm)

Der schichtweise Aufbau hat hingegen keinen Einfluss auf das geringe Elastizitätsmodul. Die Flexibilität eines Körpers ist, unabhängig davon ob er monolithisch oder

aus mehreren konzentrischen Rohren aufgebaut ist, immer gleich. Vielmehr machen die Schichtstruktur bzw. die organischen Zwischenlagen das „Durchbrechen“ energetisch aufwendiger, die inneren Lagen der Faser werden geschützt und der Spannungsverlauf des Diagrammes kann mehrere Maxima zeigen, bevor die Faser endgültig versagt. Dieses Verhalten ist für Verbundwerkstoffe charakteristisch.

2.3.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Die Umsetzung eines solchen Verbundwerkstoffes wäre sicherlich im Bereich der Rohglasherstellung von Interesse, bedenkt man die großen Schwierigkeiten im modernen Glasbau auf Grund des sprödelastischen Verhaltens. Auch das Fügen und Verbinden könnte durch die Untersuchungen am Glasschwamm inspiriert werden.

2.3.7 Resümee

Biogenes Glas ist in der biologischen Welt trotz seiner Zerbrechlichkeit ein häufig verwendetes Baumaterial. Zahlreiche Organismen haben Maßnahmen entwickelt um dieses spröde Material wirkungsvoll zu verstärken. Es hat sich gezeigt, dass Fasern von Glasschwämmen, verglichen mit den zerbrechlichen, technisch hergestellten Glasfasern gleicher Größenordnung, eine außergewöhnliche Flexibilität und Tragfähigkeit aufweisen. Der Glasschwamm *euplectella aspergillum* ist ein herausragendes Beispiel für diese Eigenschaften. Die Fasern dieses Schwammes haben nicht nur optische Eigenschaften, die denen von technisch hergestellten Glasfasern ähnlich sind, sondern auch eine hohe strukturelle Festigkeit.

2.4 Dauerelastische Kinematikverbindung

2.4.1 Inspiration

Resilin ist ein gummiartiges Eiweiß, das im Körperbau von Insekten vielfältige Anwendungen übernimmt. Im Libellenflügel z.B. bildet es ein Mikrogelenk, das den Flügel im Flug wie auch im Ruhezustand stets zum günstigsten Anstellwinkel hin ausrichtet und dabei eine optimale Profilform gewährleistet. Die durch starke Verwirbelungen auftretende kinetische Energie wird durch das Gelenk aufgenommen, gespeichert und sobald die einwirkende aerodynamische Kraft abreißt, wieder freigegeben. Dadurch schnellert der Flügel im Millisekunden wieder in sein ursprüngliches Profil zurück und gewährleistet damit ähnlich einer dauerelastischen Kinematikverbindung stets den günstigsten Anstellwinkel und eine optimale Flugperformance. Resilin oder dessen Derivate könnten in Zukunft als dauerelastische, reißfeste und kinematisch aktive Materialien im Fassadenbau eingesetzt werden und dort zu neuartigen Verbindungstechnologien führen, die gleichsam elastisch und steif sind und dabei kinematische Energie aus Windlasten amortisieren könnten.



Abb. 2.4.1: REM - Aufnahme eines Resilinknotens

2.4.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Insekten
Vorkommen	Natur, vor allem bei Insekten
Stoff	Eiweiß
Aufbau	langkettiges Protein
Struktur	Makromoleküle
Bestandteile	Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff
Material	Resilin

Abb. 2.4.2: Biologische Klassifizierung

2.4.3 Allgemeine Beschreibung

Resilin kommt in einer Vielzahl von Insekten vor, wobei es unterschiedliche Funktionen übernehmen kann. Bei den Heuschrecken (*Acrididea*) und Flöhen (*Siphonaptera*) z.B. dient das Resilin hauptsächlich der Fortbewegung. Sie komprimieren das in ihren hinteren Sprungbeinen befindliche Resilin und lassen sich von der frei werdenden Bewegungsenergie in die Luft katapultieren. Scheinbar ohne jegliche Abnutzungserscheinung der Sprunggelenke kann ein Floh damit seine 100-fache Körpergröße mühelos überspringen. Das Insekt wird dabei mit 4000 m/s^2 beschleunigt, das entspricht der 400-fachen Erdbeschleunigung [g]. Den Fliegen (*Diptera*) dagegen verhilft das Resilin dazu, an jeder beliebigen Oberfläche mit jedem beliebigen Steigungsgrad zu laufen. Dank zweier sogenannter „Resilin-Pads“ an ihren Füßen können Fliegen mühelos 90° steile Wände hinauflaufen und problemlos kopfüber an Decken entlang krabbeln ohne dabei die Haftung zu verlieren.

Bei den Libellen (*Odonata*) wirkt das Resilin gänzlich anders als bei Flöhen, Heuschrecken oder Fliegen. Hier übernimmt das Resilin die Funktion eines elastischen Knotenpunktes, der die steifen Flügelgerüststränge, die gleichzeitig als Atemkanäle dienen, miteinander verbindet. Das sogenannte „Rubber-Protein“ bewirkt eine nichtbrechende, dauerelastische Verbindung, die trotz hoher Beanspruchung von ca. 500 Millionen Flügelbewegungen im Laufe eines Libellenlebens keine Abnutzungen aufweist. Von etwa 4700 bekannten Libellenarten weltweit kommen 80 in

Europa vor. Diese werden in zwei Gattungen unterschieden: Die Großlibellen (*Anisoptera*) sowie die Kleinlibellen (*Zygoptera*). Die Flügelspannweiten reichen dabei von 20 mm bis zu erstaunlichen 110 mm. Bei ihrer Entwicklung durchläuft die Libelle bis zur vollständigen Ausbildung zum fliegenden Insekt eine Metamorphose, die im Folgenden stichpunktartig beschrieben wird. Aus den Libelleneiern schlüpfen Larven, deren Lebensraum Teiche und Seen sind. Sie leben am Grund ruhiger Gewässer in dichtem Bewuchs und lauern anderen Wasserinsekten wie Kleinkrebsen, Kaulquappen und kleinen Fischen auf. Dieses Larvenstadium dauert drei Jahre in denen sich die Larve wachstumsbedingt mehrfach häutet. Danach verlassen die Larven die Gewässer und suchen sich einen meist vertikalen Ort wie Felswände oder Bäume, um dort zu schlüpfen. Auch im vollständig ausgebildetem Stadium halten sich die meisten Libellenarten in der Nähe von Gewässern oder feuchten Gebieten auf. Es ist jedoch auch zu beobachten, daß sie ihren Lebensraum der Beute entsprechend ausweiten und dabei erstaunlich abpassungsfähig sind.



Abb. 2.4.3: Nahaufnahme des Adergerüsts eines Libellenflügels



Abb. 2.4.4: Libelle

Der Flugapparat der Libelle zeichnet sich durch seine außergewöhnlichen Eigenschaften aus beide Flügelpaare unabhängig voneinander steuern zu können. Dieses

einzigartige Konzept macht aus den Libellen wahre Flugartisten, die Manöver fliegen können, die anderen Insekten nicht möglich sind. Diese aerodynamische Höchstleistung ist nur durch die besondere Ausbildung der Flügel möglich. Der Flügel besteht aus einem feinen Aderengeäst, das die Membranzellen der Flügel durchzieht und ihnen damit ihr Profil verleiht. An den Flügelspitzen, an denen sich keine Adern mehr befinden, bilden die sogenannten Spreiten eine Wellblech ähnliche Struktur, die den Flügel stabilisieren. Das Aderngerüst ist je nach Art der Libelle sehr unterschiedlich. So sind Libellenflügel nicht etwa planare Konstruktionen, sondern ähnlich einer Wellblechstruktur vertikal in zick-zack Formen ausgebildet, um eine gewisse Faltungssteifigkeit zu erzeugen.

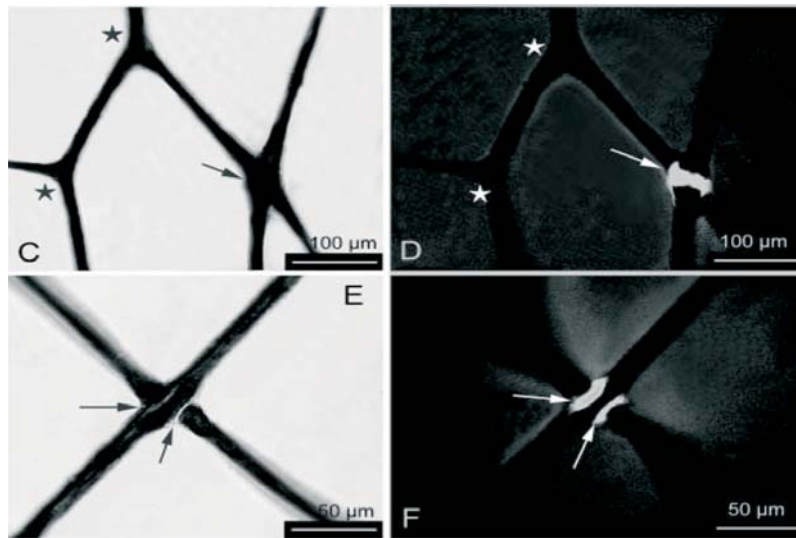


Abb. 2.4.5: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Resilinknoten im Aderengeäst eines Libellenflügels

Im Gegensatz zu anderen Insektenarten setzen bei den Libellen die Flugmuskeln direkt an den Flügeln an. Da sich bei der Libelle im Gegensatz zu Vögeln z.B. keine Muskeln vom Körper bis zu den Flügelspitzen erstrecken und diesen elastisch

machen, übernimmt das Resilin diese überlebenswichtige Funktion. Einige Adern des Gerüsts fungieren darüber hinaus als Atemkanäle und versorgen die Libelle mit Sauerstoff. Eine weiterer Beleg der multifunktionalen Strategie natürlicher Systeme.

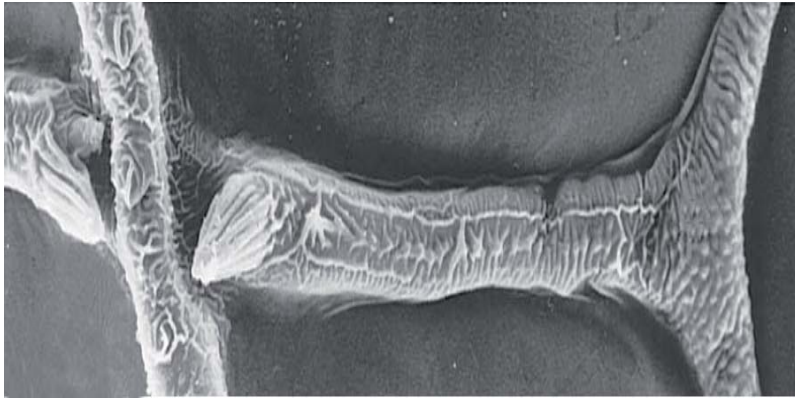


Abb. 2.4.6: REM Aufnahme einer starren Verbindung (rechts) und einer flexiblen Verbindung (links)

Der Flügel muss nämlich im Betrieb gänzlich diametralen Anforderungen gerecht werden, da er zum einen nicht zu weich sein darf, um aerodynamischen Kräften den richtigen Flugwiderstand zu geben und zum anderen auch nicht zu steif sein darf, da ihn sonst die aerodynamischen Kräfte zerreißen würden. Einige der Adern im Libellenflügel, die sich schneiden und dabei Verbindungen bilden, werden mit Resilin zu einem Kontenkonstrukt verbunden. Sie bilden also hohle und bewegliche Verbindungen im Gegensatz denen, die miteinander verwachsen und somit starr sind. In der Wissenschaft werden solche Verbindungen als „mobile-/immobiler joints“ bezeichnet. Adern mit Atemkanälen laufen von der Flügelspitze bis zum Rumpf durch, während andere Adern, die auf die Atemadern treffen, kurz vorher durchbrochen zu sein scheinen. Statt einer direkten Verbindung zum Atemkanal werden beide Adern mit Resilin als elastische Vermittlermasse quasi aneinander angeschlossen. Dadurch besteht kein direkter Kontakt zwischen den Adern statt und ihre Verbin-

derung bleibt dauerhaft elastisch verformbar. Die Anordnung der beweglichen Resilinverbindungen ist maßgeblich an der Stabilität des Libellenflügels beteiligt. Wissenschaftler fanden heraus, dass die Verbindungen auf bestimmte Art und Weise über die gesamte Fläche des Flügels verteilt sind und nur so das optimale Ergebnis der absoluten Stabilität erreicht wird. So verlaufen Achsen zwischen Resilinverbindung vom Körper der Libelle bis zu den Flügelspitzen. An eben diesen Achsen verändert sich das Profil des Flügels und passt sich den aerodynamischen Kräften an. Dadurch entsteht eine elastische Konstruktion, die extrem leicht und äußerst stabil ist. Bei Käfern sitzt das Resilin ähnlich wie bei den Libellen an bestimmten Punkten im Aderngerüst des Flügels. Dadurch bilden sich faltbare Achsen, die den gesamten Flügel durchziehen. So können Käfer ihre Flügel trotz des Aderngerüsts „zusammenlegen“ und sie unter ihrem Panzer verstauen ohne Schäden an der Flügelstruktur zu nehmen. Der Käfer besitzt einen bestimmten Faltpfad für seine Flügel, wobei das Resilinprotein die strukturelle Voraussetzung für diesen Faltpfad ist. Wie bei Libellen befindet sich das Resilin an genau definierten Stellen innerhalb der Flügelstruktur und ermöglicht es dem Tier seinen Flugapparat auf eine kleinstmögliche Fläche zusammen zu falten. Dies gewährleistet einen Schutz der lebensnotwendigen Flügel unter dem Rückenpanzer, die damit keiner Gefahr unterliegen, beim Vorankommen am Boden zerstört oder beschädigt zu werden.

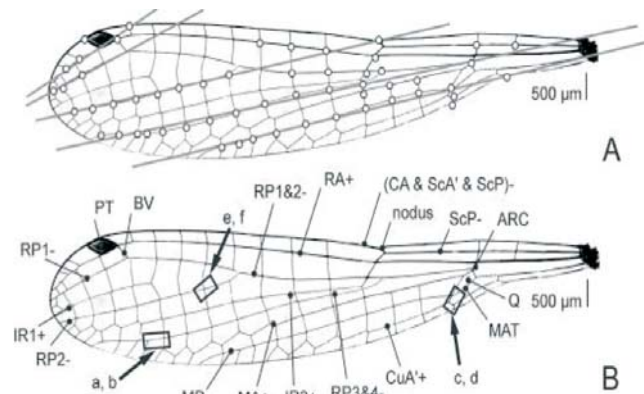


Abb. 2.4.7: Libellenflügel mit Resilinknotenachse

2.4.4 Phänomenologische Betrachtung

Resilin (*von lat. recello=zurückschnellen*) ist schon seit Mitte der sechziger Jahre bekannt. Die genaue chemische Struktur des Resilins konnte in den letzten 40 Jahren aber noch immer nicht rekonstruiert werden und gibt den Forschern bis heute Rätsel auf. Stanislav Gorb hat die Eigenschaften von Resilin mit den Flugfähigkeiten der Libellen in Zusammenhang gebracht und weitgehend erforscht. Resilin ist ein langkettiges Protein, das in der Natur zahlreich vertreten ist und außergewöhnlich dehnbar ist. Diese gummiartige, elastische Eigenschaft macht Resilin zu einer gelartige Substanz, die zu 80% aus Wasser besteht. Diesem Umstand verdankt es auch seinen Beinamen Hydrogel. Wenn kein Wasser vorhanden ist, trocknet es aus, erhält jedoch sofort wieder die ursprünglichen elastischen Eigenschaften zurück, sobald wieder Wasser zugefügt wird. Versuche mit Libellensehnen, die über mehrere Monate permanent über 200% gedehnt wurden, erhielten unmittelbar nach Beendigung der Dehnung sofort ihre Ausgangslänge zurück. Das Resilin nimmt während des Fluges einer Libelle die durch starke Verwirbelungen auftretende kinetische Energie auf, welche das Profil der Flügel verändern, und speichert die Energie der Torsion. Sobald die einwirkende aerodynamische Kraft abreißt, gibt das Resilin die gespeicherte Energie frei und der Flügel schnell in sein ursprüngliches Profil zurück. Dadurch wird stets der günstigste Anstellwinkel und eine optimale Profilform gewährleistet.

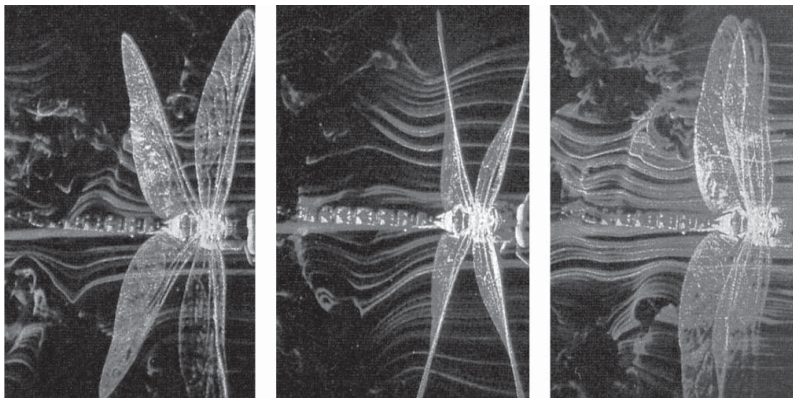


Abb. 2.4.8: Libelle im „Windkanal“: Anpassung der Flügel an aerodynamische Kräfte

2.4.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Prinzipiell ist der Einsatz eines natürlich gewonnen oder eines künstlich reproduzierten Resilinmaterials immer an Stellen denkbar, an denen Eigenschaften wie Elastizität, Kinematische Energiewandlung oder UV-Beständigkeit gefordert sind. Im Baugewerbe ergo überall dort wo z.B. mit silikonartigen Baustoffe gedichtet oder verfugt wird. In der Tragkonstruktion, z.B. bei weich gelagerten Loslagern in Brücken oder höheren Gebäuden, könnte dieser Proteinwerkstoff ein Einsatzgebiet etablieren. Im textilen Leichtbau könnte man sich darüber hinaus einen Einsatz als Teil des Gewebes vorstellen, das analog zum Libellenflügel, immer wieder seinen Ursprungszustand einnimmt, sobald die Krafteinwirkung z.B. durch Winddruck- oder Windsog sich verändert. Dieses Konzept müsste ergo bedeuten, daß die hohen Vorspannkräfte, mit denen eine membranartige Konstruktion heute in eine Kraftbalance gebracht werden, durch eine gummiartige, kinematisch aktive Gewebeeinlage geringer ausfallen und die Konstruktion, vor allem im Auflagerbereich, deutlich schlanker ausfallen müsste. Sicherlich ist die Frage der zulässigen Verformungen (gerade im Anschluss von Fassaden) umsichtig zu klären. Ebenso denkbar wären ganze Tragsystem aus diesem Werkstoff, die sich kinematisch immer wieder ihrer Optimalform nähern, auch wenn sie deformiert belastet werden.

2.4.6 Ansatz für eine Bionisch inspirierte Gebäudehülle

Greift man den Gedanken einer formveränderlichen, adaptiven, dauerelastischen, kinematisch aktiven Verbindung auf und überträgt diese strukturellen Eigenschaften auf eine Fugenverbindung z.B. einer ephemeren Hüllkonstruktion, könnte eine nahezu immaterielle Überdachung entstehen, die sich bei unterschiedlichen Lastwirkungen adaptiv verhält. Eine Art Dauerelastische Kinematikverbindung, die auch im Einsatz UV-Strahlung ausgesetzter Bauteile kein Probleme macht, da das Resilin auch nach jahrelangem Einsatz nicht porös wird und wie Versuche gezeigt haben auch seine Wirksamkeit nicht verliert. Interessant konnte auch sein, wie sich das Material unter Einwirkung von Wasser verhält, denkt man eine Elastizitäts- oder Steifigkeitsänderung im Material durch Einwirkung von Wasser.

2.4.7 Resümee

Aktive Forschungsarbeit an der Nutzung des Proteins Resilin als Humanimplantat findet zur Zeit im Australischen St. Lucia bei der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) statt.

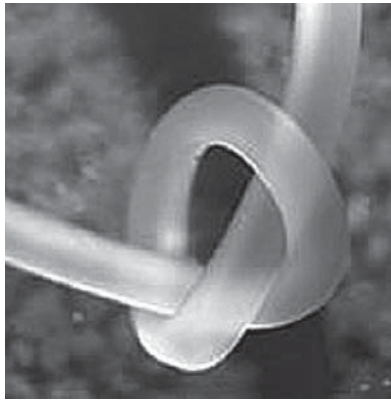


Abb. 2.4.9: Synthetischer Resilin-Strang

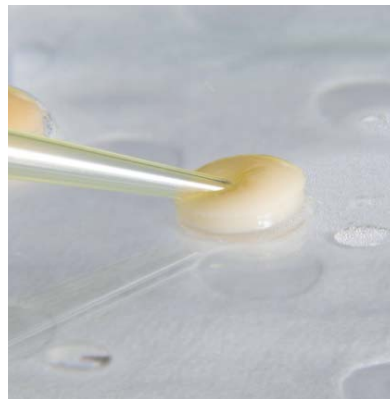


Abb. 2.4.10: Synthetisches Resilin aus dem Labor CSIRO

Dort wird versucht Resilin als Humanimplantat für die Medizin nutzbar zu machen und eventuelle Nebenwirkungen wie etwa das Abstoßen des Proteins durch das menschliche Immunsystem zu verhindern. Dazu gehören auch Bestrebungen das Protein künstlich in größeren Mengen herzustellen um es einem industriellen Nutzen zugänglich zu machen, eine entscheidende Entwicklung auch für den Einsatz im Baugewerbe. Die künstliche Herstellung in kleinen Mengen ist bereits gelungen und basiert auf dem Einarbeiten von Resilin-Genen in ein Escherichia-Coli-Bakterium. So wurden einige Gramm synthetisches Pro-Resilin Protein, eine Vorstufe des Gel-/Silikonartigen Resilin Proteins, gewonnen. Mittels eines Ruthenium-Katalysators wurde das Pro-Resilin Protein unter Zugabe von Licht, das die Verknüpfung von Teilen der Aminosäure Tyrosin mit den Resilinmolekülen bewirkt,

zum gummiartigen Resilin Protein gemischt. Diese besitzt, nach Aussagen der CSIRO, die gleichen Eigenschaften wie sein natürliches Vorbild. Anderer Ansicht ist Dr. Stanislav Gorb aus Tübingen: seiner Ansicht nach wird Resilin aufgrund der noch recht umständlichen Herstellung des Proteins das herkömmliche Gummi vorerst nicht ersetzen können.

3.0 Strukturen

Der Abgleich der vorliegenden Rechercheergebnisse mit den Anforderungen aus Teil 2 ergab, daß die 7 weiter unten aufgeführten Strukturen selektiert werden sollten und als mögliche Ansätze neuartiger Gebäudehüllfunktionen untersucht werden. Das Selektionsdiagramm zeigt in der Übersicht die drei Kategorien Material, Struktur und Funktion und die jeweiligen Exponate im grauen Kreis.

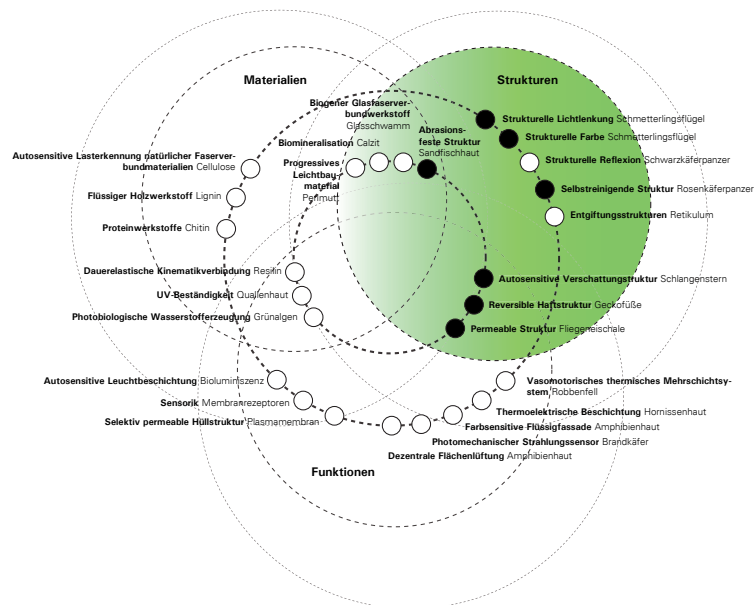


Abb. 3.0.1: Selektionsdiagramm in drei Kategorien Material, Struktur und Funktion

Zum besseren Verständnis und als zusammenfassende Übersicht werden hier die Inspirationsgrundlagen der einzelnen natürlichen Phänomene mit ihren projizierten Anwendungen aufgelistet.

3.1 Strukturelle Lichtlenkungen und Strukturelle Farben

Faszinierend an diesen Strukturen sind, neben dem ungeheuer leistungsfähigen Leichtbau der Flügel, vor allem die lichtlenkenden und farbgebenden Eigenschaften ihrer Oberflächenstrukturen. So werden die Flügel in der morgendlichen Sonne als Reflektor benutzt um damit wärmende Sonnenstrahlen auf dem Thorax zu lenken. Dieses hocheffiziente System könnte Inspiration für eine Strukturelle Lichtlenkungen an Gebäudefassade sein. Ein anderes Phänomen ist das Erzeugen von Licht durch Struktur, eine Interferenzüberlagerung, die eindeutige Farben erzeugt. Dies könnte zur Entwicklung von Strukturellen Farben führen, die nie verblassen oder ihre Leuchtkraft durch nachlassende Pigmentierung verlieren.

3.2 Selbstreinigende Strukturen

Rosenkäfer haben in ihrer Evolutionsgeschichte gänzlich unterschiedliche Systeme zur Selbstreinigung ihrer Panzeroberfläche entwickelt. Diese arbeiten mit einer Kombination aus Wachsbeschichtung und unterschiedlich hohen Stippenstrukturen, die nicht nur ein rückstandsloses Abperlen von Wassertropfen ermöglichen, sondern zugleich auch feinste innenliegende Schmutzpartikel mit entsorgen können. Für eine Gebäudehülle könnte dies ein optimales Anschmutzverhalten sowie eine dauerhaft funktionsfähige Oberflächenwirkung bedeuten, was wiederum zu einer dauerhaften Reduktion von Wartungs- und Betriebsarbeiten führen würde. Im Unterschied zum bereits bekannten Selbstreinigungseffekt bei Lotuspflanzen, haben die Käfer eine chitinöse Struktur mit dem selben Ergebnis evolutioniert und diese mit einer wachsbenezten Oberfläche kombiniert. In unterschiedlichen Varianten haben die Insekten unterschiedlich effektive Systeme ausgebildet, die im Folgenden erläutert werden.

3.3 Abrasionsfeste Strukturen

Der Sandfisch legt jeden Tag eine Strecke von ca. 500 bis 1000 m zurück. Bei dieser Fortbewegung schleift seine Hautpanzerung permanent im Wüstensand und zeigt

trotz der ständigen Reibung keine Abriebstellen. Zudem ist sie dauerhaft glänzend und reflektiert damit die für das Tier schädlichen Sonnenstrahlen. Die Widerstandsfähigkeit der Haut basiert auf Keratinschuppen, in die winzige Minerale wie Silizium- oder Kalziumkristalle eingelagert sind. Sie bilden quer zur Bewegungsrichtung Schwellen auf dem Körper der Sandfische aus, die so klein sind, dass ein Sandkorn auf etwa 100 Schwellen zugleich gleiten und seine Kraft verteilen kann. Die Entwicklung eines Materials, das so abrasionsbeständig ist wie die Sandfischhaut würde für Gebäudehüllen einen enorme Steigerung der Dauerhaftigkeit bedeuten. In Gebieten, in denen hohe Korrosionsanfälligkeiten durch z.B. Wüstensand oder den Salzgehalt in der Luft bestehen, könnten diese Oberflächen zur Minimierung der Wartungs- und Betriebszyklen führen, da die abrasionsfesten Strukturen bei bleibend glänzender Oberfläche nicht an Qualität verlieren.

3.4 Autosensitives Verschattungsstruktur

Verschiedene Schlangensterntarten sind in der Lage mit Hilfe ihrer Oberflächenstruktur Distanzen wahrzunehmen, obwohl sie weder Augen noch ein Gehirn besitzen. Allein durch die besondere Ausformung der Oberfläche können diese Tiere einfallendes Licht derart exakt brechen, daß sie den Abstand eines möglichen Feindes so genau einschätzen können wie es für ihre Sicherheit notwendig erscheint. Mittels einer sehr einfachen Sensorik können die Tiere Informationen direkt erfassen und weiterleiten. Diese durch Lichtimpulse gesteuerte Sensorik könnte zu einem Strukturellen Lichtsensor führen, der nur durch die Oberflächenbeschaffenheit in der Lage ist z.B. den UV-Gehalt des Lichtes zu messen oder die Intensität der Sonnenstrahlung zu ermitteln. Dies wiederum wären wichtige Informationen, mit denen weitere Subsysteme wie Verschattungsvorrichtungen oder Solarkollektoren orientiert werden können.

3.5 Reversible Haftstrukturen

Mittels Van-der-Waals-Kräfte schaffen es Geckos scheinbar mühelos entlang von Wänden und Decken zu kriechen. Das Wissen um die Fähigkeiten der molekularen

Haftkraft der Geckozehen bietet Anlass über die Möglichkeit gänzlich neuer Reversibler Haftstrukturen im Bereich von Fassaden und deren Fügungstechniken nachzudenken. Die Umsetzung des extrem filigranen Aufbaus und der hierarchischen Anordnung der Härchenstruktur der Geckozehen könnte zu völlig neuartigen umweltschonenderen Herstellungsverfahren für Verbundsicherheitsgläser oder andere Fügetechnologien führen. Das reversible Verhalten dieser Strukturen bietet auch im Renovations- oder Redundanzbereich neue Potentiale.

3.6 Permeable Struktur

Die Schale der Schmeissfliegeneier sind zugleich permeabel für eindringenden Sauerstoff und ausströmendes Kohlendioxid und resistent gegen eindringende Feuchte. Diese gegensätzlichen Eigenschaften löst die Schmeissfliege durch eine besonders ausgeklügelte chitinöse Mehrschalenstruktur, die es dem heranwachsenden Fliegengewebe ermöglicht auf, im oder sogar unter dem Wasser zu atmen. Darüber hinaus ist sie in der Lage ihren Wärmehaushalt mittels der Hüllstruktur zu regulieren, eine Eigenschaften, die sie direkt interessant für neuartige Ansätze moderner Hüllstrukturen macht.

3.1 Strukturelle Lichlenkungen und Strukturelle Farben

3.1.1. Inspiration

Faszinierend an diesen Strukturen sind, neben dem ungeheuer leistungsfähigen Leichtbau der Flügel, vor allem die lichtlenkenden und farbgebenden Eigenschaften ihrer Oberflächenstrukturen. So werden die Flügel in der morgendlichen Sonne als Reflektor benutzt um damit wärmende Sonnenstrahlen auf den Thorax zu lenken. Dieses hocheffiziente System könnte Inspiration für eine Strukturelle Lichlenkungen an Gebäudefassade sein. Ein anderes Phänomen ist das Erzeugen von Licht durch Struktur, eine Interferenzüberlagerung, die eindeutige nicht irisierende Unifarben erzeugt. Dies könnte zur Entwicklung von Strukturellen Farben führen, die nie verblasen oder ihre Leuchtkraft durch nachlassende Pigmentierung verlieren.

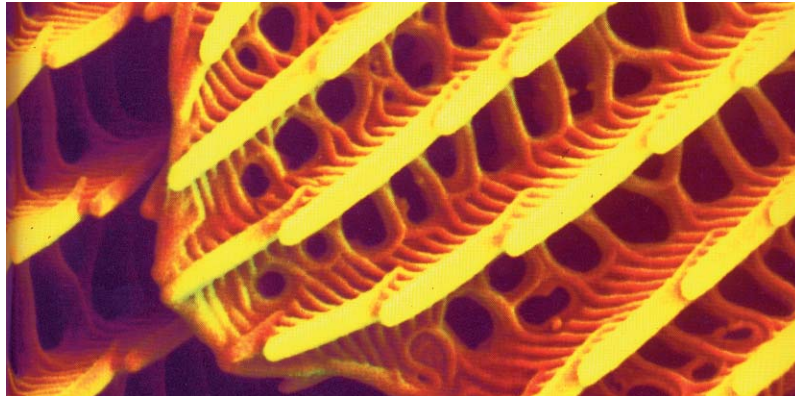


Abb. 3.1.1: Lamellenstruktur der Schuppe eines Schmetterlingflügels

3.1.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	
Unterstamm	Tracheentiere	<i>tracheata</i>
Überklasse	Sechsfüßer	<i>hexapoda</i>
Klasse	Insekten	<i>insecta</i>
Unterklasse	Fluginsekten	<i>pterygota</i>
Überordnung	Neuflügler	<i>neoptera</i>
Ordnung	Schmetterlinge	<i>lepidoptera</i>

Abb. 3.1.2: Biologische Klassifizierung des Schmetterlings

3.1.3 Allgemeine Beschreibung

Die Schmetterlinge aus der Gattung der Schuppenflügler (*Lepidoptera*) gehören zu den holometabolen Insekten. Bei der Entwicklung von Schmetterlingen spricht man allgemein von Generationen, die die gesamte Entwicklung vom Ei bis zum Falter beschreibt. Anhand der Eifarbe und der Gestalt kann man meist die Familienzugehörigkeit der Generation bestimmen. Einige Falterarten legen ihren gesamten Eivorrat auf einmal ab (bis zu 600 Eier), andere befestigen die Eier an Blattunterseiten oder lassen sie im Flug fallen. Die nächste Entwicklungsstufe ist die Verrauung, deren einzige Aufgabe darin besteht zu fressen und zu wachsen. Bis zur Verpuppung sind einzelne Gattungen in der Lage ihr Gewicht zu vertausendfachen, wobei dies innerhalb von einigen Wochen und mehreren Jahren stattfindet. Die Verwandlungsphase zum geschlechtsreifen Falter erfolgt in der Verpuppungsphase, bei der man allgemein drei Gruppen unterscheidet: Freie Puppe (*pupa libera*), Freigliedrige Puppe (*pupa semilibera*) und Mumienpuppe (*pupa obtecta*). Die Einteilung erfolgt nach der Gestalt der Puppen und in Abhängigkeit ihrer Aktivität und Beweglichkeit. Die Lebensdauer der Falter hängt dann sehr stark von der Witterung und dem vorherrschenden Nahrungsangebot ab und kann dabei sehr unterschiedlich sein. Im Durchschnitt beträgt sie ca. 14 Tage.

Der Aufbau des Flügels ist bei vielen Schmetterlingsarten ähnlich und besteht aus Haupt- und Einzelrippen, die eine Grundtragstruktur für den Flügel bilden. Dieser

Aufbau ermöglicht es dem Tier, die Luftkräfte, die von vorn und von hinten auf den Flügel treffen, aufzunehmen und dabei die entstehenden Drillmomente abzubauen. Zwischen den Haupt- und Einzelrippen, auch Flügeldern genannt, ist eine elastische Haut aus Chitin gespannt, die leicht gewellt und nicht eben ist. Dies hat zur Folge, daß die zwischengespannten Hautbereiche eine hohe Biegesteifigkeit aufweisen. Erstaunlich ist das minimale Flächengewicht eines Schmetterlingsflügels mit ca. 11 g/m^2 , setzt man es in Relation zu den enormen Windkräften, denen die Flügelkonstruktion ausgesetzt ist. Ohne Zweifel eine besondere Leichtbaumeisterleistung der Natur. Die Ober- und Unterseite des Flügels ist meist mit Chitinschuppen besetzt, die eine dachziegelartige, geschuppte Struktur aufweisen und je nach Gattung in ihrer Größe, ihrer Ausformung und ihrem Abstand zueinander variieren. Zudem können die Schuppenenden abgerundet, eckig oder spitz zulaufen oder sogar in haarähnlichen Strukturen enden. Einige Schmetterlingweibchen besitzen darüber hinaus Duftschuppen, die Pheromone absondern, um damit Männchen aus weiter Entfernung anzulocken.



Abb. 3.1.3: Schmetterlingflügel



Abb. 3.1.4: Blue Morpho Schmetterling

Betrachtet man die die Schuppen des Schmetterlingsflügels etwas genauer, stellt man fest, daß diese aus einer Rippen- und Stegstruktur bestehen, die ein Verhält-

nis von Luft zu Konstruktionsmasse von 94% aufweisen, wobei die Oberfläche der Rippenstrukturen auf den Schuppen dabei so fein ist, daß Wassertropfen nicht haften bleiben und an der Oberfläche abperlen. Während des Abrollen nehmen Sie zusätzlich Schmutzpartikel auf der Oberfläche mit sich und reinigen so die Oberfläche, einen Effekt, der auch aus dem Pflanzenreich bekannt ist.

Für das Starten benötigen die meisten Schmetterlingsarten eine Flugmuskulaturtemperatur von ca. 40° C. Dafür hat sich in Jahrmillionen eine Art „Strukturelle Lichtlenkung“ entwickelt. Zur Optimierung dieses Vorgangs haben sich, vor allem in kälteren Regionen, Strukturen auf der Ober- oder Unterseite der Flügel herausgebildet, die Sonnenstrahlen in einem optimalen Winkel auf den Muskelkörper reflektieren können. Die Leistungsfähigkeit der Reflexion ist dabei abhängig von der Art und der Farbe des Schmetterlingsflügels sowie deren Stellung zueinander. Ziel ist es bei den häufigsten Schmetterlingsarten, die Luft zwischen den Flügeln zu erwärmen und damit gleichzeitig eine Konvektion dieser warmen Luft zu verhindern. Dafür haben sich im evolutionären Prozess verschiedene Strategien entwickelt, z.B. gibt es Arten, die ihre Flügel waagrecht und in geringem Abstand zum Boden positionieren, um damit die Luft zwischen ihrer Flügelunterseite und dem Boden zu erwärmen, oder andere Gattungen, die nicht nur durch Reflexion, sondern auch durch Absorption Wärmeenergien erzeugen. Der Flügel absorbiert die Wärme und leitet sie mittels den Hämolymphe an den Thorax weiter. Die Gattung *pachliopta* z.B. legt seine Flügel zusammen und absorbiert die Wärme über die schwarzen Flügelunterseiten.

Auch das Erzeugen von Farbe zu Zwecken der Gravidität, ist ein Evolutionsergebnis verschiedener Schmetterlingsarten. Für die Flügelfärbung gibt es dabei zwei unterschiedliche Prinzipien, die Pigmentierung und die Erzeugung von Farben durch Lichtbrechung. Meist treten beide Prinzipien in gemischter Form auf, wie z.B. beim Pfauenauge. Das leuchtende Blau wird hier durch Lichtbrechung erzeugt, während die übrige Zeichnung des Flügels durch Lichtabsorption und durch Farbpigmente entstehen. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich vornehmlich auf die Schmetterlinge aus der Familie der *morphidae*, da diese in der Lage sind nur eine einzelne Farbe zu erzeugen und nicht den bekannten Interferenzeffekt schillernder CD-Oberflächen. Diese Schmetterlinge zählen zur Gattung der Morpho-Falter, von

denen derzeit ca. 80 verschiedene Arten bekannt sind, die meist in Südamerika vorkommen. Die bis ca. 20cm großen Morpho-Falter erzeugen Ihre blaue Farbe nur durch Lichtbrechung und Lichtreflexion. Erstaunlich ist dabei, daß die Oberseite der Flügel eigentlich durchsichtig ist und lediglich am Rand schwarze Pigmente auftauchen. Die blaue Farbe ist derart leuchtstark, daß man sie bis zu einem halben Kilometer Entfernung sehen kann. Den Männchen, die meist farbenfroher und prachtvoller erscheinen, dient die Farbgebung als Lockmittel für die Weibchen, als Paarungsvorsprung sozusagen. Sobald sich das Tier jedoch in Gefahr befindet, schließt es blitzartig die Flügel, die an der Unterseite mit Pigmenten in Brauntönen eingefärbt sind und verschwimmt so mit seiner Umwelt, eine perfekte Tarnung. Es ist sogar erwiesen, daß manche Morpho-Falter eine Art „an-aus“ Zeichen entwickelt haben, eine Blinken zwischen blau und braun.

3.1.4 Phänomenologische Betrachtung

Die Schuppen- und Rippenstrukturen der Schmetterlingsflügel erzeugen die Schillerfarbe mittels Lichtbrechung und Lichtreflexion, wobei diese dann auch die Reflexion der Sonnenstrahlen auf den Körper beeinflussen. Dieses Phänomen entsteht durch die Überlagerung zweier oder mehrerer Wellen, die sich am gleichen Ort überlagern und so Interferenzen erzeugen. Bekannt ist dieses Phänomen bei Schall-, Radio-, Licht- und Materiewellen. Mit dem Auge sichtbar wird es besonders an dünnen, durchlässigen Schichten wie z.B. bei der Reflexion des Lichtes an einer Seifenschicht, einer öligen Schicht oder eben der weiter oben beschriebenen Schmetterlingsschuppe. Die Lichtwellen, die an der Ober- und der Unterseite einer solchen Schicht reflektiert werden, interferieren und ergeben so Interferenzfarben ähnlich den Spektralfarben des Regenbogens. Die so erzeugten, pigmentlosen Reflexionsfarben sind abhängig von der Schichtdicke, dem Brechungsindex des Stoffes, dem Einfallswinkel des Lichtes sowie der Lichtfarbe (UV-Licht, IR-Licht oder Sonnenlicht). Allgemein gilt, daß dünne Schichten kurzwelliges Licht reflektieren und dickere Schichten langwelliges Licht. Fokussiert wird die reflektierte Lichtfarbe, wenn die Höhepunkte oder Interferenzspitzen der Lichtwellen näher zueinander wandern oder gänzlich zusammentreffen. Man spricht nun von einer Wellenphase, die eine konstruktive Interferenz erzeugt. Beim Schmetterlingsflü-

gel ist für die Interferenzerscheinung die Schuppenausbildung verantwortlich, wobei die für die Interferenz notwendigen Schichten beim Schmetterling als Multilayer ausgeführt sind und sich je nach Schuppentyp in ihrer Layerart unterscheiden. Nachfolgend werden anhand der Schuppentypen des Morpho-Falters drei verschiedene Ausprägungen erläutert.

Beim Schuppentyp I (s. Abb. 3.1.5 und Abb. 3.1.6) wird das Licht an Multilayerstrukturen gebrochen, die sich als Aufbau auf den Rippen befinden und eine Art „Christbaumstruktur“ bilden. Durch die horizontalen Ausprägungen entstehen Interferenzerscheinungen, die dann die irisierenden Farben erzeugen, die man von den Morpho-Faltern kennt. Je mehr Schichten eine solche Struktur besitzt, desto intensiver wird die daraus entstehende Farbe. Die größte Anzahl von Schichten, die bis dato bei einem Morpho-Falter gefunden wurde, liegt bei 12 horizontalen Schichten übereinander. Die Farbe ist je nach Betrachtungswinkel unterschiedlich intensiv ausgeprägt, da der Reflexionswinkel dieser Schuppentypen relativ beschränkt ist.

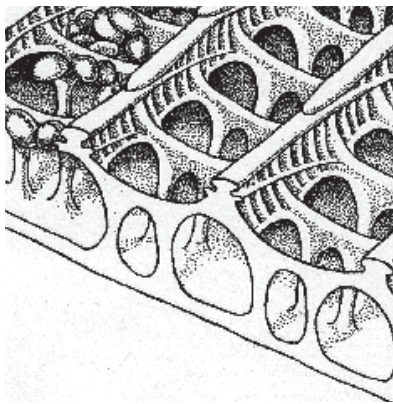


Abb. 3.1.5: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps I in der Übersicht

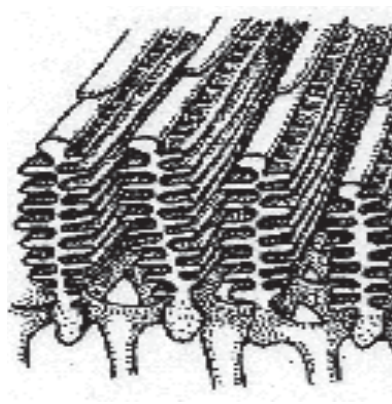


Abb. 3.1.6: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps I als Querschnitt mit den „Christbaumstrukturen“

Beim Schuppentyp II sind ebenfalls Multilayerstrukturen für die Lichtbrechung verantwortlich. Hier wandern die reflektierenden Schichten jedoch von aufgesetzten

Konzept des Types I in das Innere der Schuppen. Konstruktionsbedingt ist bei diesem Typ nur eine geringere Anzahl von Schichten möglich, da sonst das Gewicht der Schuppe proportional zunehmen würde. Die Layer sind im Randbereich etwas dünner ausgebildet als im zentralen Bereich, wodurch eine konkave Form entsteht, die Mischfarben erzeugen kann. Dies geschieht durch unterschiedliche Farben, die sich in einem System an unterschiedlichen Schichtdicken reflektieren lassen. Das menschliche Auge nimmt dann die zwei erzeugten Farben, ähnlich wie bei einem Farbfernseher, als Mischfarbe wahr. Spannend ist hier, abseits der Fähigkeit mit unterschiedlichen Schichtdicken Mischfarben zu erzeugen, auch, daß eine Polarisationsänderung des Lichts erfolgt, d.h. die Lichtwellen werden durch die zweimalige Spiegelung im Raum gedreht.

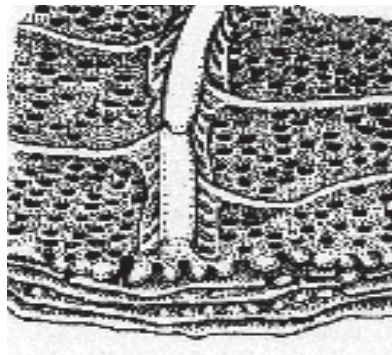


Abb. 3.1.7: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps II in der Übersicht

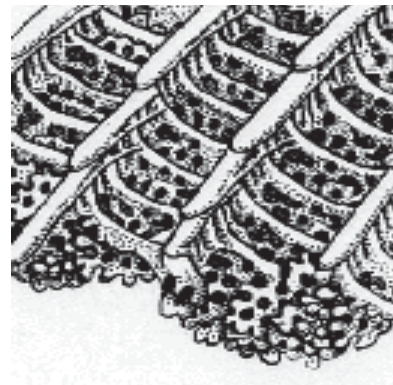


Abb. 3.1.8: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps III in der Übersicht

Beim Schuppentyp III handelt es sich um einen speziellen Typ, da hier keine Multilayerstrukturen zur Lichtbrechung genutzt werden, sondern eine Hohlraummatrix, die das Licht im Innern einer Schuppe erzeugt. Man kann sich dieses System als eine Art Schwamm vorstellen, bei dem jedoch alle Hohlräume gleich groß sind und exakt den gleichen Abstand zueinander haben. Die Lichtwellen werden in den Hohlräumen systematisch gebrochen und in alle Richtungen zerstreut, so dass es mög-

lich wird, die gleiche Farbe aus jedem Blickwinkel heraus zu erkennen. Physikalisch betrachtet, funktioniert die Lichtstreuung ähnlich einem grobmaschigen Kristallgitter, das aus Hohlräumen aufgebaut ist. Das Licht wird hier von der Oberfläche der Schuppen bis in den inneren Bereich hinein gestreut, wobei die Struktur deutlich effizienter ist als die Dünnschichtinterferenz der Schuppentypen I und II, da sie Licht in alle Richtungen streuen kann. Prinzipiell streuen die Kristalle das Licht zwar analog einer Dünnschichtinterferenz, durch ihre Anordnung im Gitter der Hohlraummatrix ermöglichen sie jedoch eine gleichbleibende Farbwiedergabe.

3.1.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Schon auf den ersten Blick entstehen mehrere Überlappungen und Schnittstellen zwischen den Phänomenen der Flügelstrukturen eines Schmetterlings und architektonisch relevanten Themenbereichen. An dieser Stelle sollen vorerst nur zwei Ansätze angedacht werden, die eine relativ zeitnahe Umsetzbarkeit in Aussicht stellen. Zum einen die lichtlenkenden Eigenschaften des Schuppentypes II und zum anderen die farbegebenden Strukturen des Schuppentypes III. Die lichtlenkenden Eigenschaften könnte man sich im Fassadenbereich zur Verbesserung der Tiefenausleuchtung anschließender Räume vorstellen oder als Diffuslichtsammelkollektoren in Kombination mit Röhrenkollektoren, die konzentriertes und diffuses Licht in Wärmeenergie umwandeln. Die farbegebenden Eigenschaften, z.B. die des Morphofalters, könnte man einsetzen, um das Lichtspektrum nach gewünschten Farben zu filtern. Man würde damit u.U. reine und völlig klare Farben erhalten, die nie verblassen und keine chemischen Farbstoffe oder Pigmente zur Farberzeugung enthalten.

3.1.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Ein Ansatz für eine „Strukturelle Farbe“ könnte sein, eine Art Sandwichplatte zu entwickeln, die inspiriert durch die Hohlraummatrix des Schuppentypes III, eine eindeutige, klare und nie verblassende Farbe erzeugt. Dazu wurde im Computer ein räumliches abstrahiertes Modell einer Typ III-Schuppe erzeugt, das schon erstaun-

liche Ähnlichkeiten zum abstrahierten Modell eines Photonischen Kristalls besitzt. Dieser Ansatz wurde dann in Form einer zwieschaligen Platte weiterentwickelt, bei der das einfallende Licht mittels Beugungsflächen und Farbverdeckungen zu einer strukturellen Farbe modifiziert wird. Dabei wird der Ansatz verfolgt, daß man das sichtbare Lichtspektrum nach der gewünschten Lichtfarbe filtert könnte oder, analog zum Morpho-Falter, nur eine Farbe reflektieren lassen würde.

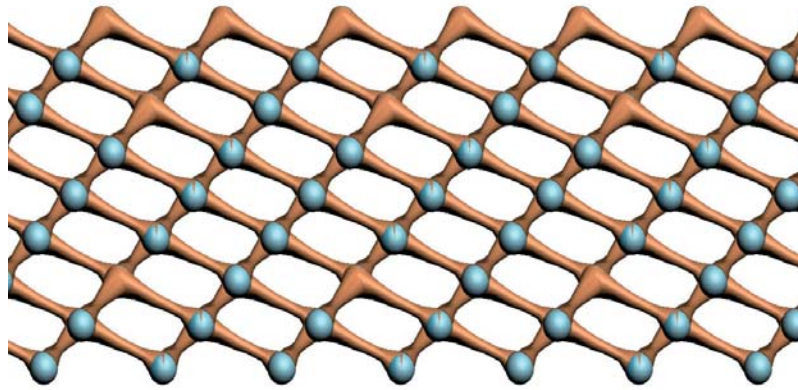


Abb. 3.1.9: 3D-Modell einer einlagigen Kristallstruktur

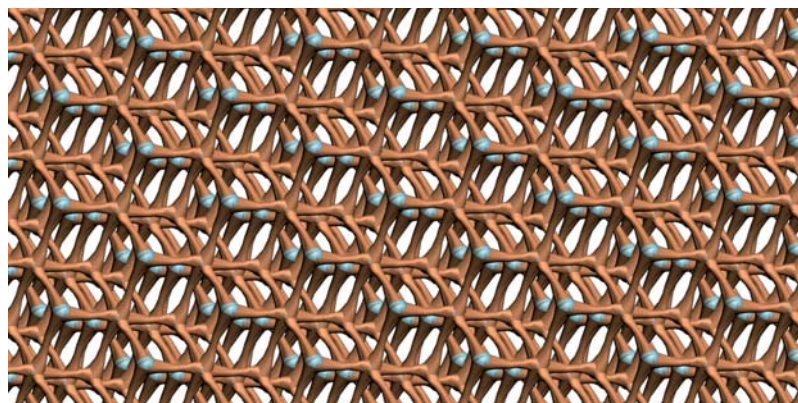


Abb. 3.1.10: 3D-Modell bei überlagernden Layern zu einer Hohlraummatrixstruktur

Da die Struktur, die eine Lichtbrechung erzeugen kann im nanoskaligen Bereich liegen muss, also bei einem millionstel Meter, ist sie für unser Auge nicht sichtbar. Durch Verschiebung der reflektierenden Flächen könnte man sogar einen Farbwechsel innerhalb der Struktur erzeugen, ohne daß das Auge die „nanoskalige Strukturänderung“ wahrnehmen würde. Denkt man noch weiter, könnte man untersuchen, welche Konfiguration die strukturelle Matrix vorweisen müsste, damit sich die Farbe, z.B. im Verlauf eines Tages, verändern würde. Koppelt man diese Idee mit Parametern aus der unmittelbaren Umgebung des Gebäudes, wie z.B. UV-Gehalt des Lichtes oder Temperaturniveau der Oberflächen, könnte sich das Gebäude adaptiv oder selbstregulierend verhalten, indem es z.B. bei direkter Sonneneinstrahlung heller wird, um den Wärmeeintrag zu minimieren.

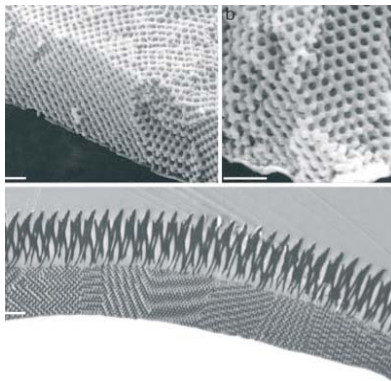


Abb. 3.1.11: Photonische Kristallstrukturen des Schuppentypes III

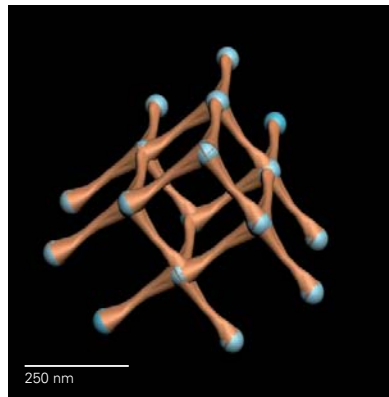


Abb. 3.1.12: 3D-Modell einer Photonischen Hohlraummatrix

Ein weiterer Ansatz zur Entwicklung einer „Strukturellen Lichtlenkung“ könnte sein die aktuell handelsüblichen Kollektoren, die mit der Umwandlung direkter und indirekter Strahlung in Wärme arbeiten, durch den Einsatz der hocheffektiven Lichtlenkstrukturen des Schuppentypes I zu optimieren. Die Kollektoren arbeiten meist mit einer gewölbten Reflexionsfläche unterhalb des Medienträgers, damit eine

gleichmäßige Nutzung der Solarstrahlung auch bei geringen Einstrahlungen und bei Änderung des Einstrahlungswinkels im Tagesverlauf gewährleistet wird. Mit der Verwendung von Lichtlenkstrukturen analog dem Schuppentyp I würden zwei wesentliche Verbesserungen der bestehenden Systeme möglich. Zum einen ein deutlich verbessertes Anschmutzverhalten der Oberflächen der Reflektoren durch Selbstreinigungseffekte und die gesteigerte Effizienz der Reflektorfläche durch eine proportionale Vergrößerung der diffusreflektierenden Bereiche.

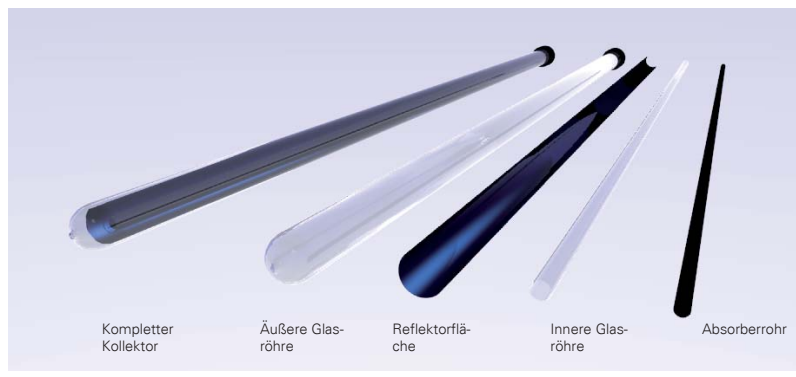


Abb. 3.1.13: 3D-Darstellung eines konventionellen Vakuumröhrenkollektors und seiner einzelnen Bestandteile

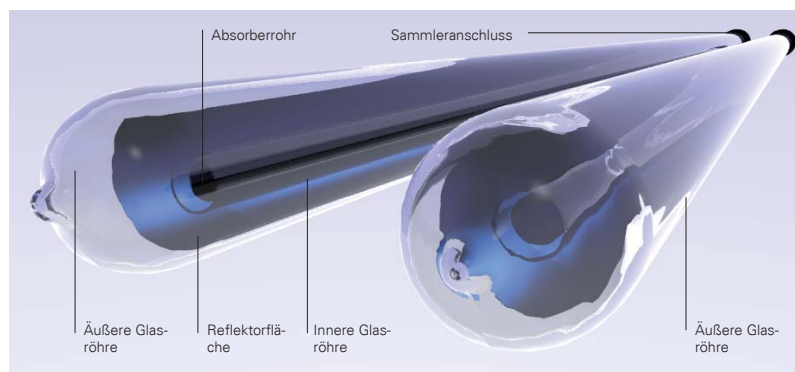


Abb. 3.1.14: 3D-Darstellung zweier Vakuumröhrenkollektoren in komplettierten Zustand

In der Abb. 3.1.13 und der Abb. 3.1.14 sind ein moderner konventioneller Vakuumröhrenkollektor als kompletter Kollektor und mit seinen wesentlichen Baukomponenten dargestellt. In Fokus liegt nun die sogenannte Reflektorfläche, die mittels der Schuppengeometrie des Schuppentyps I optimiert werden soll. In Abb. 3.1.15 ist eine normale Reflektorfläche und eine mittels Schuppengeometrie optimierte Reflektorfläche abgebildet. Die optimierte Version entspricht ungefähr dem Schuppentyp I.

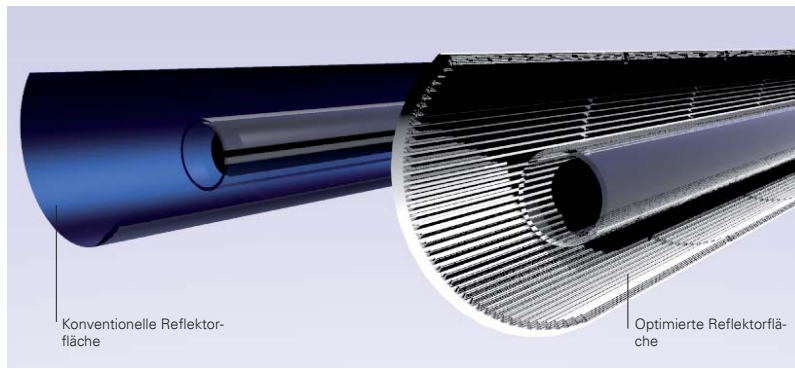


Abb. 3.1.15: 3D-Darstellung einer konventionellen und einer optimierten Reflektorfläche



Abb. 3.1.16: 3D-Detaildarstellung einer optimierten Reflektorfläche nach dem Vorbild des Schuppentyps I

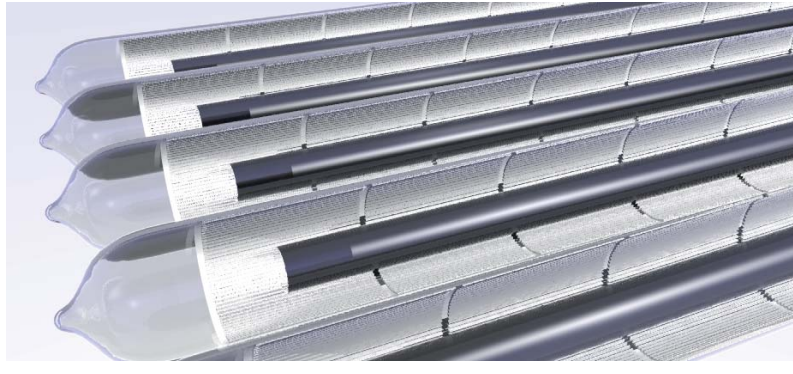


Abb. 3.1.17: 3D-Darstellung mehrerer optimierter Reflektorfläche in der Abfolgewirkung

3.1.7 Resümee

Zum Teil werden in der Nanotechnologie schon verschiedene Prinzipien des Schmetterlings angewandt. An der Kanagawa Academy of Science and Technologie in Japan wird an einer strukturellen Oberflächenfarbe gearbeitet, die aus dreidimensionalen Waben in Form Silikat-Partikeln ($d=6\text{nm}$) und Kunststoff-Kügelchen besteht. Dabei ist die Maschenweite der Struktur durch die Größe der Kunststoffkügelchen einstellbar. Durch marginale Veränderung des Kugel-Abstands können alle Farben des sichtbaren Lichtspektrums ohne Farbstoff erzeugt werden. Polypropylen und Silica-Kugeln in zwei Größen werden auf ein Substrat gelegt und organisieren sich wechselseitig aneinander. In einem Verbackungsvorgang verkalken die Silica-Kugeln während die Polypropylene ausdunsten. Dadurch entsteht eine der Schmetterlingsschuppe Typ I sehr ähnliche Struktur in Form eines Photonischen Kristalls. Durch die Größe der Kugeln und deren Abstand zueinander wird dem Exponat die gewünschte Farbe entlockt. Würde man diese Kristalle nun plattenartig herstellen können, hätte man umgehende eine Fassadenanwendung mit nie verblassender Farbigkeit. An einen Konkurrenzinstitut ebenfalls in Japan, dem National Institute for Materials Science in Tsukuba, wurde ein ähnlicher Vorgang zur Erzeugung struktureller Farbe entwickelt, wobei hier Kügelchen die Braggsche Diffraktion einleiten während sie in einer Gummisubstanz eingebunden sind. Bei diesem Ansatz können

je nach Streckgrad des gummierten Trägermaterials die Kugelabstände und somit die Farben verändert werden. denkbar wäre hier nun ein Trägermaterial zu verwenden, das je nach Klima reagieren könnte, z.B. auf Regen, sich verändertes Luftfeuchtigkeit, fallende oder steigende Temperaturen.

Für die Lichtsammelnde Anwendung eines Vakuumröhrenkollektors mit optimierter Reflektorfläche müssten zunächst Technologien entwickelt werden, wie man die feinsten christbaumartigen Interferenzstrukturen auf ein Trägermaterial applizieren kann. Dafür ist die Genauigkeit der Struktur von entscheidender Bedeutung, da erst sie in der Lage ist eine Steigerung der Lichtreflektion auf das Wärmeabsorbierende Medium zu generieren. Dann erst könnte man gezielte Aussagen zur Leistungsfähigkeit eines solchen Systems im Vergleich zu konventionellen System herstellen. Die Forschungsanstrengungen im nanoskalaigen Maßstäben sind jedoch gerade im Bereich von Oberflächenbeschichtungen schon sehr weit fortgeschritten und es ist eine Frage der Zeit, wann sich diese Feinststrukturen auch mit o.a. Funktionalen Umsetzungen belegen lassen.

3.2 Selbstreinigende Strukturen

3.2.1 Inspiration

Rosenkäfer haben in ihrer Evolutionsgeschichte gänzlich unterschiedliche Systeme zur Selbstreinigung ihrer Panzeroberfläche entwickelt. Diese arbeiten mit einer Kombination aus Wachsbeschichtung und unterschiedlich hohen Stippenstrukturen, die nicht nur ein rückstandsloses Abperlen von Wassertropfen ermöglichen, sondern zugleich auch feinste innenliegende Schmutzpartikel mit entsorgen können.

Für eine Gebäudehülle könnte dies ein optimales Anschmutzverhalten sowie eine dauerhaft funktionsfähige Oberflächenwirkung bedeuten, was wiederum zu einer dauerhaften Reduktion von Wartungs- und Betriebsarbeiten führen würde. Im Unterschied zum bereits bekannten Selbstreinigungseffekt bei Lotuspflanzen, haben die Käfer eine chitinöse Struktur mit dem selben Ergebnis evolutioniert und diese mit einer wachsbenezten Oberfläche kombiniert. In unterschiedlichen Varianten haben die Insekten unterschiedlich effektive Systeme ausgebildet, die im Folgenden erläutert werden.

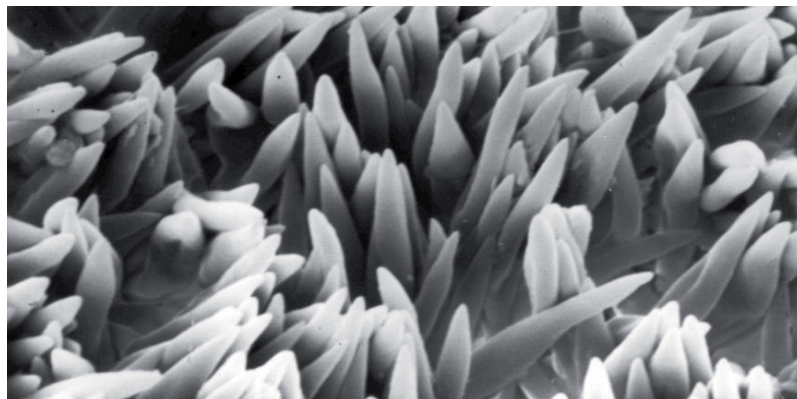


Abb. 3.2.1: Panzeroberfläche eines Rosenkäfers

3.2.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Abteilung	Gewebetiere	<i>eumetazoa</i>
Klasse	Insekten	<i>insecta</i>
Ordnung	Käfer	<i>coleoptera</i>
Familie	Rosenkäfer	<i>cetonia aurata</i>

Abb. 3.2.2: Biologische Klassifizierung des Rosenkäfer

3.2.3 Allgemeine Beschreibung

Der Gemeine Rosenkäfer (*cetonia aurata*) gehört zum Stamm der Insekten und zur Familie der Rosenkäfer, von denen es weltweit ca. 2600 Arten gibt. Die Rosenkäfer entwickeln sich sehr schnell, vom Ei bis zum Käfer vergehen nur ca. fünf Monate. Die Larven leben im Boden, meist in der Nähe eines Komposthaufen. Nach der Verpuppung in einem Kokon aus Erdteilchen schlüpfen die Käfer, wobei die Färbung der Käfer je nach Art variabel ist, meist oben grüngold und unten goldrot. Ihr schillernder Panzer ist in so gut wie allen Farbvarianten zu finden. Rosenkäfer haben einen extrem festen Panzer aus Chitin, einem stickstoffhaltigen Polysaccharid. Die Flügeldecken tragen einige weißliche längliche Fleckenzeichnungen und auf jeder Flügeldecke befinden sich zwei längliche dicke Rippen. Die Flügeldecken der Rosenkäfer sind an ihrer Naht fest miteinander verwachsen und deshalb nicht einzeln hochklappbar wie bei anderen Käferarten. Rosenkäfer können gut fliegen, weil seitliche Ausbuchtungen das Ausbreiten der Hautflügel ermöglichen. Aufgrund ihrer mikrostrukturierten Oberfläche fühlen sich die Flügeldecken wie Samt an. Rosenkäfer besitzen sechs Beine, zwei harte Deckflügel und zwei weiche Hinterflügel. Ihr Körper ist in Kopf, Brust und Hinterleib gegliedert. Sie werden je nach Art etwa 14 bis 25 mm (max. 40 mm) lang. Das Gewicht der Rosenkäfer liegt maximal bei circa 100 g.

3.2.4 Phänomenologische Betrachtung

Auffallend ist beim Rosenkäfer vor allem der leicht schillernde Panzer, der niemals verschmutzt wirkt. Wie auch bei den Blättern der Lotuspflanze, lässt sich bei Rosenkäfern das Phänomen beobachten, dass sie trotz schmutziger und nasser Umwelt sauber bleiben und von Wassertropfen nicht benetzt werden. Dies liegt an der Panzeroberfläche des Rosenkäfers, welche mit einer Wachsstruktur beschichtet ist und für den Selbstreinigungseffekt sorgt.

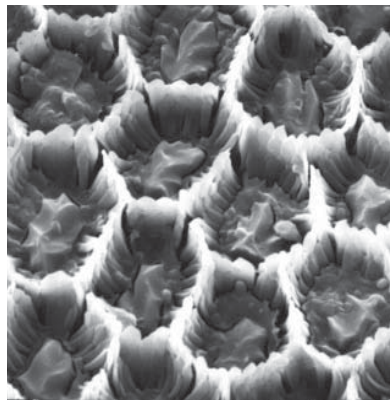


Abb. 3.2.3: REM-Aufnahme eines Kongo Rosenkäfers



Abb. 3.2.4: Kongo-Rosenkäfer (*pachnoda marginata*)

Wenn man einen Rosenkäfer unter einem Rasterelektronenmikroskop betrachtet, sieht man sofort, dass die Oberfläche des Panzers keineswegs glatt, sondern mit einer rauen Struktur überzogen ist. Die Oberflächenstruktur ist mit Wachs, das hydrophob, d.h. wasserabstoßend ist, beschichtet. Dadurch kann das Wasser die Oberfläche von vornherein schlecht benetzen. Die aufgerauhte Oberfläche unterstützt diesen Effekt noch zusätzlich, da das Wasser aufgrund seiner Oberflächenspannung nicht in die Vertiefungen eindringen kann und sich dadurch abperlende Tröpfchen bilden. Damit stehen dem Wasser nur die Spitzen dieser Strukturen als Berührungsfläche zur Verfügung und dies hat zur Folge, dass sich der Neigung des

Panzer gemäß abperlende Tropfen bilden können. Auch die Schmutzpartikel liegen nur auf den Spitzen der Struktur auf. Die Berührungsfläche zwischen ihnen und der Oberfläche ist nur noch einen Bruchteil so groß wie bei einer ebenen Fläche. Dementsprechend verringern sich die Kräfte, die sie an der Oberfläche festhalten. Es treten so gut wie keine Adhäsionskräfte auf. Das abfließende Wasser schwemmt die Partikel einfach mit fort. Um den Effekt nachzubilden reicht es jedoch nicht aus einfach eine feine oder grobe Struktur aufzubringen, sondern erst die Kombination beider Strukturen erhöht den Wirkungsgrad. Je mehr Größenebenen an Strukturen hervorgehen, desto deutlicher ist der Effekt. Es zeigt sich also, dass die Hydrophobie alleine nicht ausreicht um den Selbstreinigungseffekt hervorzurufen, genauso wenig wie es eine reine Rauigkeit der Oberfläche vermag. Vielmehr muss eine mikrostrukturierte und hydrophobe Oberfläche vorliegen, d.h. das Beziehungsgefüge zwischen Oberflächenrauigkeit, reduzierter Partikeladhäsion und Wasserabweisung muss vorhanden sein, damit die Oberfläche selbstreinigend ist. Staub und Schmutz, der sich ansammelt, wird so vom nächsten Regen rückstandsfrei „abgerollt“.

Wenn man technische Oberflächen wie Glas und Paraffin vergleicht, kommt man zum Ergebnis, daß bei benetzbaren Oberflächen nach der Reinigung noch etwa 50 bis 75% aller Partikel haften, bei unbenetzbaren dagegen nur noch einige wenige Prozent. Am allerwenigsten haftet der Schmutz, wenn die Oberfläche mit einer wachsbeschichteten Mikrostruktur versehen ist, wie es sich bei der Lotusblume (*Nelumbo nucifera*) aber auch bei Käfern, wie z.B. dem Rosenkäfer zeigte. Dabei ist wichtig, dass eben nicht die Energie der aufklatschenden Wassertropfen die Oberfläche reinigt.

Durch Aufnahmen verschiedener Panzerstrukturen mit dem Rasterelektronenmikroskop lassen sich unterschiedliche Käferarten in differenzierbare Gruppen unterteilen. Gemessen an der äußeren Wirkung lässt sich so eine in der Effektivität der Wasserabweisung ansteigende Abfolge der Strukturen aufstellen. Im Folgenden werden nun die einzelnen Strukturen detailliert vorgestellt und analysiert.

- **Wachsbeschichtete Oberfläche:** Die wachsbeschichtete Oberfläche ist relativ plan. Einzelne Erhebungen sind in ihrer Höhe und ihrem Abstand zueinander

der zu flach bzw. zu weit entfernt um einen mit dem Selbstreinigungseffekt vergleichbaren Effekt hervorzurufen. Daher ist es nötig, dass die Oberfläche stark strukturiert ist. Trotzdem hat die Oberfläche wasserabweisende Eigenschaften, aufgrund ihrer Beschichtung. Eine wachsartige Schicht überzieht hier den Körper des Käfers *eudicella gralli*. Der gemessene Kontaktwinkel ist kleiner als 90° , es liegt also noch nicht einmal eine ausgeprägte Hydrophobie vor. Wachsbeschichtete Oberflächen alleine rufen keinen Selbstreinigungseffekt hervor.

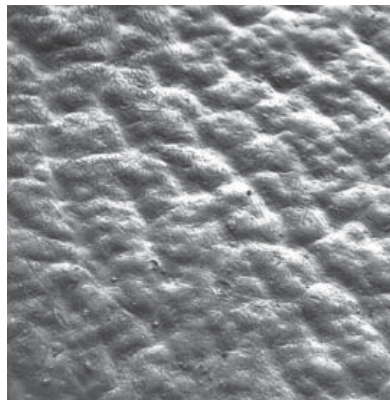


Abb. 3.2.5: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Goliathrosenkäfers (Wachsbeschichtete Oberfläche)

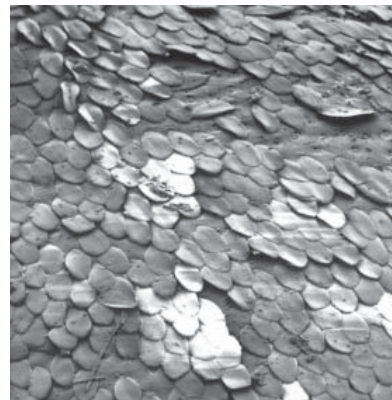


Abb. 3.2.6: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Asiatischen Rosenkäfers (Schuppenstruktur)

- **Schuppenstrukturen:** Die Oberfläche dieser Asiatischen Käfer ist deutlich und gleichmäßig strukturiert. Einzelne Schuppen lassen dicht aneinander gesetzt eine von starken Höhenunterschieden gekennzeichnete Struktur entstehen. Aber auch hier ist der Abstand einzelner Erhebungen zueinander zu groß. Sie lassen sich sogar mit einem einfachen Lichtmikroskop ausmachen. Die Wassertropfen perlen hier zwar besser ab, aber ein Selbstreinigungseffekt wird auch hier nicht hervorgerufen.

- **Stippenstruktur:** Käfer mit Stippenstruktur-Oberfläche (*pachnoda marginata*) weisen recht gute wasser- und schmutzabweisende Eigenschaft auf. Erkennbar ist hierbei, dass sich ein immer wiederkehrendes Muster von Erhebungen und Absenkungen im Bereich von circa 10 µm ergibt, das nicht durch Schuppen oder Haare entsteht, sondern durch an den Zellgrenzen entstehenden Stippen. Die Größenordnung der Abstände zwischen den einzelnen Stippen liegt nun in dem Bereich, in dem Wasser nicht in die Vertiefungen gelangen kann. Wassertropfen liegen nun vielmehr nur noch auf, da sie durch ihre Oberflächenspannung in Wechselwirkung mit der wachsartigen Beschichtung, sowie dem in den Absenkungen entstehendem Luftdruck oberhalb der Stippen gehalten werden. Man kann die Wirkungsweise dieser Oberfläche auf den Selbstreinigungseffekt der Lotuspflanzen zurückführen.

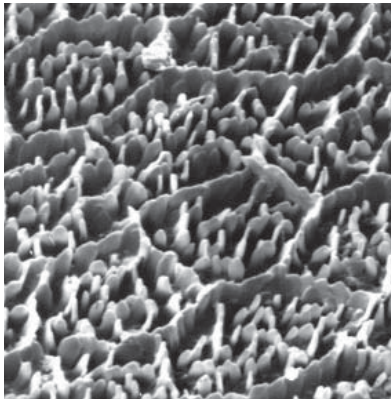


Abb. 3.2.7: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Kongo Rosenkäfers (Stippenstruktur mit Härchenstruktur)

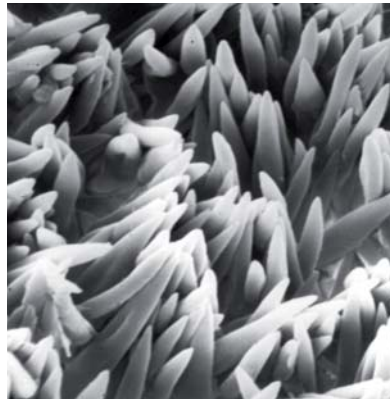


Abb. 3.2.8: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Rosenkäfers (Härchenstruktur)

- **Flächendeckende Stippenstruktur:** Der Unterschied zu der zuletzt beschriebenen Struktur besteht ausschließlich darin, dass nun auch die bisher unausgefüllten Bereiche mit Stippen versehen sind (s. Abb. 3.2.7). Kleinere Schmutzpartikel von einem bis zehn Mikrometern können nicht mehr in diesen Bereich

fallen, sondern liegen ebenfalls auf den Stippen auf. Auf die Oberfläche aufgebraachte Tröpfchen perlen hier sehr schnell ab, ohne dass ein Teil des Wassers die Oberfläche benetzen kann. Der Käfer bleibt trocken.

- **Härchenstruktur:** Beim Rosenkäfer ließ sich zudem eine Härchenstruktur feststellen. Die Haare sind länger und nicht so dicht wie die Stippenstruktur. Die schmutzabweisende Eigenschaft ist jedoch so gut ausgeprägt wie bei der Stippenstruktur.

Bei manchen Käferarten lässt sich sogar eine schuppenartige Oberfläche und Stippenstruktur bzw. Stippenstruktur und Härchenstruktur direkt nebeneinander feststellen. Bei diesen Käfern kann vom Selbstreinigungseffekt gesprochen werden. Bei Wasserabperlversuchen stellte sich heraus, dass der Effekt auch bei länger toten Käfern wirksam blieb.

3.2.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Die Vorstellung dauerhaft unverschmutzbarer Oberflächen ist gerade in der Architektur äußerst verlockend. Es würde sämtliche Rezyklierkreisläufe bei immer wiederkehrenden Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten enorm vereinfachen, denkt man z.B. an Fassaden, die normalerweise alle 10 Jahre neu gestrichen werden müssen und mittels einer intelligenten selbstreinigenden Struktur über 50 Jahre wartungsfrei bleiben. Oder an Anwendungen im Haushalt oder dem Betrieb von Gebäuden. Verschmutztes Geschirr ließe sich einfach mit kaltem Wasser reinigen und Sanitäranlagen würden stets hygienisch sein, da sich weder Keime noch Pilze anlagern könnten. Man denke nur an die Favelas oder Slums moderner Metropolen, deren Wasserhaushalt, ergo Hygienehaushalt, zum Teil einfach nicht vorhanden ist. Selbstreinigende Strukturen wären gerade hier von enormer Effektivität.

Ein entscheidender Punkt bei der Übertragung der Selbstreinigung auf Oberflächen ist deren mechanische Beständigkeit. Wenn an einer Oberfläche mit Selbstreinigungseffekt Abriebserscheinungen auftreten, ist die Eigenschaft für immer verloren. Bei Dachziegeln durch das Begehen, bei Autolacken durch einen Hagelscha-

den, bei Geschirr durch Stapeln oder allgemein durch Alterserscheinungen. Die Natur löst dieses Problem durch regelmäßiges Regenerieren der Oberflächen, ein Vorgang der bei anthropogenen Lösungen selten verwendet wird. Ein weiteres Kriterium ist die sachgemäße Behandlung der Oberflächen. Sollten diese in Kontakt mit Tensiden kommen, so wird ihre selbstreinigende Eigenschaft abgeschwächt und ihre hydrophobe Eigenschaft wird unterdrückt. Ein Handwaschbecken mit Selbstreinigungseffekt z.B. ist demnach schwer realisierbar, da es regelmäßigen Kontakt zu Seifenlösungen hat. Die Oberflächen dürfen daher nicht mit herkömmlichen Putzmitteln gereinigt werden. Mikrostrukturierte Oberflächen stellen zudem eine Art Lichtfalle dar. Es ist daher noch nicht möglich glänzende Lacke und Oberflächen herzustellen. Zur Implementierung des Selbstreinigungseffektes müsste man auf vielen Einsatzgebieten zusätzlich erwünschte Sekundäreigenschaften, wie eine belastbarere Struktur der Oberfläche, eine höhere Hitzebelastbarkeit oder UV-Beständigkeit vernachlässigen oder eine Kompromisslösung mit geringerer Effizienz eingehen.

Unter dem Blickwinkel der Umweltverträglichkeit, ist einer der Hauptvorteile des Selbstreinigungseffektes, dass durch ihn umweltschädigende Chemikalien, die in Reinigungsmitteln und in verschiedenen wasserabweisenden Beschichtungen enthalten sind, in enormen Maße eingespart werden können. Wenn man Oberflächen mit dem Selbstreinigungseffekt versieht, müssten diese um ein Vielfaches weniger gereinigt werden, was wiederum die Abwassermengen verkleinert. Bei Autos würde ein Regenschauer schon vollkommen zur Reinigung des Fahrzeuges ausreichen. Hochgerechnet auf den jährlichen Wasserverbrauch für Autowäschen könnte man somit 20 Milliarden Liter Trinkwasser einsparen. Der Verbrauch von Rohstoffen durch Material- und Energieersparnis ist ein weiterer positiver Nebeneffekt. Verschiedene Reinigungsmechanismen, z. B. Scheibenwischer und Waschanlagen wären durch die Fähigkeit zur Selbstreinigung überflüssig. Bei Fassaden und Dächern, würde man sich die regelmäßige Erneuerung und Renovierung sparen und somit Rohstoffe schonen.

Auch im Flugzeugbau werden mikrostrukturierte hydrophobe Oberflächen eingesetzt. Flugzeuge werden z.B. mit einer Riblet-Folie überzogen, die der Struktur der Haifischhaut nachgeahmt ist, denn die Haifischhaut zeichnet sich durch eine

extrem niedrige Reibung aus. Die Strukturen auf der Haihaut erzeugen Mikroturbulenzen, die das Entstehen von Turbulenzen auf größeren Längenskalen verhindern und dadurch Reibungseffekte stark reduzieren. Durch die Herstellung von Materialien mit ähnlichen Oberflächenstrukturen versucht man die Reibung dieser Materialien mit umgebenden Materien zu minimieren. Die Haut eines Hais ist von kleinen Schuppen (Dentikeln) aus hartem Material (Dentin) bedeckt. Dabei ist zu beobachten, dass die Haie, die besonders schnell schwimmen, besonders fein und tief geriefte Schuppen tragen. Diese Schuppen sind wegen der Elastizität der darunterliegenden Bindegewebsschicht gegeneinander beweglich.

Durch eine Rundumbeschichtung der Flugzeuge mit der Riblet-Folie wurden nachweislich durch den geringeren Strömungswiderstand etwa vier Prozent Treibstoff eingespart werden, einer enormen Kerosinmenge, bedenkt man die Anzahl der weltweit tagtäglich eingesetzten Flugzeuge. Leider ist bis heute ein Problem beim Einsatz der Riblet-Folie ungelöst, denn durch die geriefte Struktur der Folie bleibt während des Fluges deutlich mehr Schmutz am Flugzeug haften als ohne die Belegung mit dieser Folie. Dies wiederum führt nach gewisser Zeit zur Erhöhung der Reibung zwischen der umströmenden Luft und dem Flugzeugrumpf. Daher muss das Flugzeug regelmäßig und langwierig gewartet und gereinigt werden. Aus diesem Grund sind die Flugzeuge mit Folie natürlich weniger in der Luft als ihre Komponenten, was natürlich im Endeffekt keine Kostenersparnis für den Betreiber bringt. Es stehen also Ersparnis gegen Ertrag, dieses Ungleichgewicht gilt es zu beheben. Um diesem Dilemma entgegenzuwirken könnte man die Riblet-Folie mit einer mikrostrukturierten hydrophoben Oberfläche beschichten. Diese würde einerseits während des Flugs verhindern, dass sich Schmutz an der Flugzeugoberfläche anhaften kann, andererseits könnte man, falls doch Schmutzpartikel haften bleiben, diese während der Wartung einfach mit Wasser abspülen.

Die kupfergoldgrünen Flügeldecken der Rosenkäfer fallen neben der selbstreinigenden Struktur auch durch ihren Glanz auf. Die brillanten Farben werden aber nicht durch Lichtabsorption organischer Moleküle erzeugt, sondern durch Reflexion von sichtbarem Licht. Das Besondere am Rosenkäfer ist, dass seine Flügeldecken zirkular polarisiertes Licht reflektieren. Betrachtet man den Käfer, so erscheint er durch den Rechtszirkularpolarisator schwarz, während durch den Linkszirkular-

polarisator die Farben hervortreten. Die Flügel reflektieren linkszirkular polarisiertes Licht im schmalen gelben bis grünen Bereich des sichtbaren Spektrums. Zusätzlich ändert sich die Farbe je nach Betrachtungswinkel von gelb nach grün, was als Farbflop-Effekt bezeichnet wird. Die zirkular polarisierte Lichtreflexion kommt durch Interferenzeffekte zustande, die auf einer helixförmigen Struktur des farblosen Chitins in den Flügeldecken des Rosenkäfers beruht. Die organischen Effektpigmente auf cholesterischer Basis werden von der Firma Wacker-Chemie unter dem Handelsnamen Helicone vertrieben und auch in anderen Bereichen wie Sportartikeln, Spiel- und Lederwaren eingesetzt. Die Käferflügel reflektieren Licht unterschiedlicher Wellenlängen, je nachdem von welchem Standpunkt aus man sie betrachtet. Das Schichtsystem, an dem die Farben durch Interferenz entstehen, besteht hier aus Polysaccharidmolekülen, die schraubenförmig gedreht sind. An einer solchen Schraube oder Helix wird das Licht selektiv gebrochen. Einen ähnlichen schraubenförmigen oder helicalen Schichtaufbau findet man auch bei cholesterischen Flüssigkristallen, mit denen ebenfalls der Effekt des Farbflops erzeugt werden kann. Durch die kontinuierliche Änderung des Brechungsindex innerhalb der Helix entstehen Interferenzeffekte, und es kommt zu einer winkelabhängigen, selektiven Reflexion. Das reflektierte Licht ist im gleichen Drehsinn zirkular polarisiert wie die Helix. Zirkular polarisiertes Licht mit dem entgegengesetzten Drehsinn passiert die Probe ebenso wie alle nicht reflektierten Wellenlängen. Das heißt aber auch, dass man mit einer rechtsdrehenden oder einer linksdrehenden Schicht alleine 50 Prozent des eingestrahnten Lichts reflektieren kann. Mit einer Kombination aus beiden Schichten erhält man völlige Reflexion. Dieses System kann zum Beispiel zum Beschichten eines Trägermaterials oder zum direkten Bedrucken eines Untergrunds eingesetzt werden. Ist das Trägermaterial eine Folie, zum Beispiel aus Polyester, kann der Effektfilm einfach durch Laminieren auf andere Substrate übertragen werden. Sieb-, Flexo- und Offsetdruck sind die Verfahren für den Druck mit Flüssigkristallen. Man kann den Film auch ablösen und zu Pigmenten zerkleinern.

3.2.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Ein Ansatz für eine Selbstreinigende Struktur nach dem Vorbild der Flächendeckenden Strippenstruktur könnte nun sein, diese hexagonale Stippenverteilung auf

vertikale oder horizontale Flächen aufzutragen, um ein optimales Anschmutzverhalten Architektonisch relevanter Außenfassaden zu erzeugen. Dabei ist sicherlich zu ersteinmal in Kauf zu nehmen, daß diese Strukturen keine glatt glänzende Oberfläche erzeugen können, sondern eine nur schillernde. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß in naher Zukunft auch glänzende selbstreinigende Strukturen zur Verfügung stehen, sobald die Herstellungsmethoden den Anforderungen nachgefolgt sind.



Abb. 3.2.9: Skizzenhafte Visualisierung der Panzerstruktur des Rosenkäfers

In der Abb. 3.2.9 sind skizzenhaft ein hexagonales System mit unterschiedlich hohen Mittel- und Randstippen aufgezeigt. Diese Anordnung müsste nun in eine maschinell erzeugte Anordnung übergeführt werden, damit überprüft werden kann, in wieweit die leicht ungeordnete Struktur einen Einfluss auf ihre Wirksamkeit hat oder ob derselbe Effekt auch mit gänzlich geordneten Stippen zu erzielen ist. Entscheidend für die Wirksamkeit ist zumindest das Zusammenspiel aus hydrophierenden Eigenschaften und unterschiedlichen Stippengrößen. Die größeren Stippen minimieren die Kohäsionskräfte zwischen einem Wassertropfen und der Oberfläche, die kleineren Stippen sammeln dagegen feinste Schmutzpartikel auf ihren Spitzen und führen diese dem vorbeirrollenden Tropfen zu. Dadurch reinigt sich die Oberfläche quasi im Vorbeirollen.



Abb. 3.2.10: Skizzenhafte Visualisierung der Panzerstruktur des Rosenkäfers

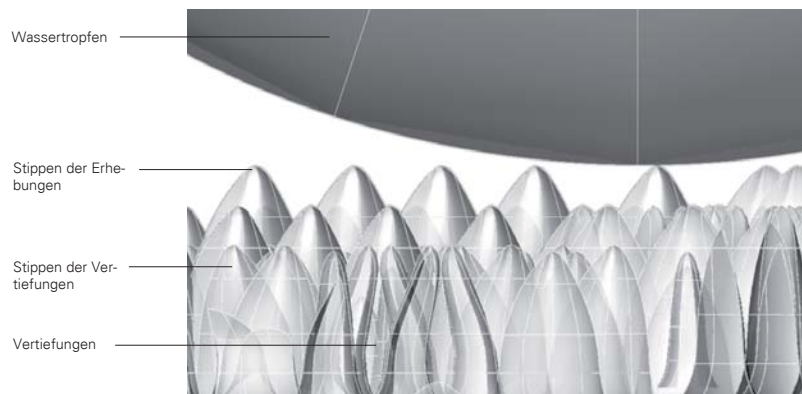


Abb. 3.2.11: Skizzenhafte Visualisierung der Wirkungsweise der Panzerstruktur des Rosenkäfers

3.2.7 Resümee

Abschliessend bleibt zu sagen, daß industriell hergestellte und maschinell erzeugte Selbstreinigende Strukturen analog der Panzeroberfläche eines Rosenkäfers z.B.

eine enorme Auswirkung auf die unterschiedlichen Wartungs- und Betriebskreisläufe weltweit haben würde. Die Menge an eingespartem wertvollen Trinkwasser, das zu Spül- und Reinigungszwecken verwendet wird ist kaum abzuschätzen, ebenso wie die Minimierung sämtlicher Reinigungstenside aus Industrie, Haushalt und Freizeit. Für diese Umsetzung müssten vorab Herstellungstechnologien entwickelt werden, die eine Strukturierung in feinsten Masstäben ermöglicht. Erschwerend kommt hinzu, daß diese Oberflächen auch mechanischen Beanspruchungen widerstehen können müssen, da sie sonst ihre Wirksamkeit stark einbüßen. Die Natur löst dieses Problem durch Regeneration ihrer Strukturen, also durch permanentes Erneuern und Reparieren. Dieses Health Monitoring und die Kombination mit selbstreparierenden Fähigkeiten ist ein weiteres Forschungsfeld, an dem weltweit gearbeitet wird.

Ziel müsste also eine sich ständig erneuernde Selbstreinigende Struktur sein, die mit unterschiedlich hohen hexagonal geordneten Stippenstrukturen sowohl ein optimales Anschmutzverhalten wie auch eine dauerhaft funktionsfähige Oberflächenwirkung gewährleistet.

3.3 Abrasionsfeste Strukturen

3.3.1 Inspiration

Der Sandfisch legt jeden Tag eine Strecke von ca. 500 bis 1000 m zurück. Bei dieser Fortbewegung schleift seine Hautpanzerung permanent im Wüstensand und zeigt trotz der ständigen Reibung keine Abriebstellen. Zudem ist sie dauerhaft glänzend und reflektiert damit die für das Tier schädlichen Sonnenstrahlen. Die Widerstandsfähigkeit der Haut basiert auf Keratinschuppen, in die winzige Minerale wie Silizium- oder Kalziumkristalle eingelagert sind. Sie bilden quer zur Bewegungsrichtung Schwellen auf dem Körper der Sandfische aus, die so klein sind, dass ein Sandkorn auf etwa 100 Schwellen zugleich gleiten und seine Kraft verteilen kann. Die Entwicklung eines Materials, das so abrasionsbeständig ist wie die Sandfischhaut würde für Gebäudehüllen einen enorme Steigerung der Dauerhaftigkeit bedeuten. In Gebieten, in denen hohe Korrosionsanfälligkeiten durch z.B. Wüstensand oder den Salzgehalt in der Luft bestehen, könnten diese Oberflächen zur Minimierung der Wartungs- und Betriebszyklen führen, da die abrasionsfesten Strukturen bei bleibend glänzender Oberfläche nicht an Qualität verlieren.



Abb. 3.3.1: Geschuppte Sandfischhaut

3.3.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Abteilung	Gewebetiere	<i>eumetazoa</i>
Klasse	Reptilien	<i>reptilia</i>
Ordnung	Schuppenkriechtiere	<i>squamata</i>
Familie	Skinke	<i>scincidae</i>
Gattung	Apothekerskink	<i>scincus scincus</i>

Abb. 3.3.2: Biologische Klassifizierung des Sandfisch

3.3.3 Allgemeine Beschreibung

Der Sandskink *scincus scincus* oder auch Apothekerskink ist ein Wüstenbewohner Nordafrikas und Saudi-Arabiens. Er gehört zur Unterordnung der Echsen und zur Familie der Skinke *scincidae*. Namensgebend war die Heilwirkung, die der Echse im Altertum gegen verschiedene Krankheiten und Gebrechen zugeschrieben wurde. Die Echse wurde pulverisiert oder zur Asche verbrannt und in Apotheken verkauft, daher der Name Apothekerskink. Aufgrund ihrer ungewöhnlichen Fortbewegungsart, die dem Schwimmen eines Fisches im Wasser ähnelt, erhielt der Apothekerskink zu Beginn des 19. Jh. den Beinamen „Sandfisch“. Er lebt auf dem Sand und im Sand und flüchtet sich bei zu starken Temperaturen um die 50 °C in kühlere tiefer Zonen im Sand. Auf der Flucht vor Feinden, wie z.B. dem Wüstenwaran oder der Diademnatter, wühlt er sich ebenso blitzschnell in den Sand. Der Apothekerskink ernährt sich von Insekten wie Spinnen, Käfer und Heuschrecken und erbeutet diese, indem er als Ansitzjäger knapp unter der Sandoberfläche auf seine Beute lauert. Weisen ihn durch Beutetiere verursachte Vibrationen auf etwas hin, so schnell er blitzschnell hervor und packt das Beutetier.

Zu Paarungszwecken setzt sich das Männchen auf den Rücken des Weibchens und beißt sich in seinem Nacken fest. Mit seinem Schwanz schiebt es den Schwanz des Weibchens nach oben und bringt seine Kloake an die des Weibchens. Die Paarung findet dabei in Bewegung statt und kann von nur wenigen Sekunden bis zu

zwei oder drei Minuten dauern. Es werden zwischen 2 und 10 Jungtiere zur Welt gebracht, die eine Geburtsgröße von ungefähr 3,5 cm haben. Die Skinke werden zwischen 5 und 6 Jahre alt. Die Echse erreicht eine Größe von ungefähr 20 Zentimetern und verfügt über sehr glatte Schuppen, in deren Zwischenräume keine Sandkörner eindringen können, und die die Reibung beim „Schwimmen“ im Sand reduzieren. Die Augen und Nasenöffnungen sind während des Tauch- und Gleitvorgangs gänzlich verschließbar. Darüber hinaus sind die Tiere durch ihre rötlich-gelbe bis braungelbe Färbung exzellent getarnt. Zudem ist ihre Schnauze keilförmig abgeflacht, damit es blitzartig im Sand abtauchen kann.



Abb. 3.3.3: Glänzende Haut des Sandfisches



Abb. 3.3.4: Eingetrübte Oberfläche einer Blechdose im Sand (nach 20 Minuten leichter Sandbrise)

3.3.4 Phänomenologische Betrachtung

Ein Sandfisch sieht immer glatt und glänzend aus, obgleich er täglich – auf der Suche nach Nahrung – eine Strecke von 500 bis 1000 m zurücklegt. Auch die Schwanzunterseite, die stets im Wüstensand schleift und so die typische Sandfischspur erzeugt, zeigt keinerlei Abriebspuren. Wie können die Schuppen des Sandfisches, die aus demselben Keratin wie unsere Fingernägel bestehen, derart widerstandsfähig

hig sein? Die Biologen und Materialwissenschaftler sind überzeugt, dass die Natur nach demselben Prinzip harte Oberflächen schafft wie man heute in der Materialwissenschaft versucht, die Werkstoffe mit einer ultradünnen Lage Kristalle zu beschichten. Wenn in das Keratin winzigste Minerale eingelagert sind, etwa Silizium- oder Kalziumkristalle, dann ergibt das eine enorm gesteigerte Abriebfestigkeit. Auf der Oberfläche der Sandfischhaut verlaufen winzige Schwellen quer zur Bewegungsrichtung, die so klein sind, dass ein Sandkorn von durchschnittlicher Größe auf etwa 100 Schwellen zugleich gleiten kann. Durch sie verteilt sich die Last eines Sandkorns auf viele Punkte und es ergibt sich optimale Krafteinleitung in den weichen Untergrund.

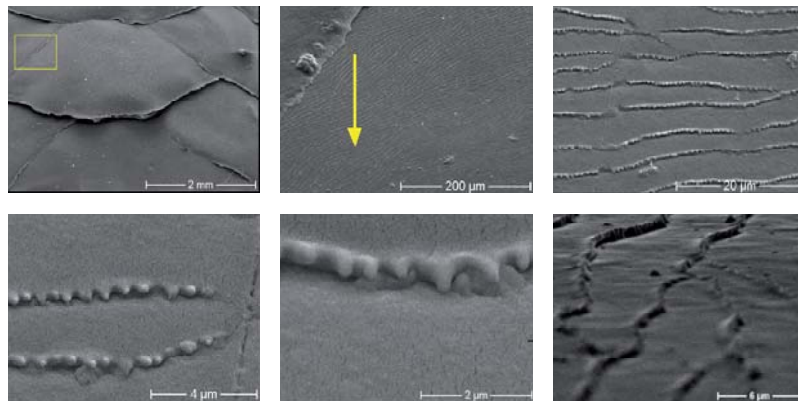


Abb. 3.3.5: REM-Aufnahme der Sandfischhaut am Bauch (oben) und Rücken (unten) in unterschiedlichen Maßstäben

Doch selbst wenn es den Pionieren der Nanotechnologie inzwischen mit großem technischen Aufwand gelingen mag, einzelne Atome zu schichten - so effizient und reibungsarm wie die Keratinhaut der Sandfisch sind technische Oberflächen leider immer noch nicht. Eine Bildabfolge (s. Abb. 3.3.5 in unterschiedlichen Maßstäben) kann dieses Phänomen näher erläutern. Bei einer Vergrößerung, die einen Ausschnitt von 200 Mikrometern zeigt, erscheint eine gleichmäßige Rippenstruktur auf dem Bildschirm, die an das Muster erinnert, das Wellen am Strand hinterlassen.

Bei 20 Mikrometern sind steile Grate zu erkennen, bei zwei Mikrometern türmen sie sich zu zackigen Bergkämmen auf. Diese könnten u.U. als eine Art Ladungsabstreifkämme dienen, deren kristallgehärteten Schuppen der Sandskink beim Durchschwimmen durch den Sand mittels Reibung auflädt und dann durch die mikrofeine Kammstruktur die bremsende Elektrizität gleich wieder abblitzen lässt.

In der Wüste Erg Chebbi (Marokko) am Rande der Sahara wurden im Sommer 2000 durch Prof. Ingo Rechenberg von der TU Berlin erste Reibungsmessungen an Sandfischen durchgeführt. Aus einer Kanüle mit dem Durchmesser 1 mm rieselt ein feiner Sandstrahl auf die geneigte Testoberfläche. Bei großen Winkeln rieselt der Sand die Testoberfläche hinab. Dann wird der Winkel langsam verkleinert bis der Sandfluss stoppt. Der Tangens des Stopp-Winkels ist der Gleitreibungskoeffizient μ . Um gleiche Bedingungen zu gewährleisten werden vor Ort nicht nur die Sandfischoberfläche, sondern auch die Vergleichsoberflächen Nylon, Teflon, Glas und Stahl vermessen. Die Pilotversuche bestätigen die Kernthese: Die Evolution hat an der Sandfischoberfläche Entwicklungsarbeit geleistet. Polierter Stahl besitzt 20% mehr Reibung als die Sandfischhaut. Aufgrund des BEILBY-Effekts [BEILBY 1921] ist es schwierig den Reibungskoeffizienten mit vernünftiger Genauigkeit zu tabellieren, da durch kurzzeitiges Polieren einer Reiboberfläche ein Zustand mit stark verminderter Reibung erzeugt werden kann. Diese BEILBY-Schicht verschwindet schnell im Betriebszustand, wenn z. B. der Sandstrom den polierten Stahl abwärts gleitet. Deswegen wurde den Sandfischmessungen im Jahre 2000 nicht vollständig vertraut. Hinzu kommt, dass die dynamischen Reibungswerte nur für einen Partikelstrahl gelten. Feines Messinggranulat (Messingsand) wird als Strahl auf einer Stahlplatte einen anderen Gleitwinkel aufweisen als ein kleiner Messingblock. Um die Messwerte wirklich überzeugend zu verifizieren wäre eine Mess Methode notwendig, bei der ein „Sandblock“ auf einer geneigten Testoberfläche abwärts gleitet. In einem weiteren Versuchsaufbau im Sommer 2003 wurde ein Aluminiumzylinder (5 mm Durchmesser, 5 mm hoch) gestrichen voll mit Sand gefüllt. Dieser wird durch den Anstoßen mit einer Nadel ins rutschen gebracht, wobei zeitgleich nach dem Neigungswinkel gesucht wird, bei dem dieser die Testfläche abwärts zu gleiten beginnt. Dabei ist die Reibkraft bei coulombscher Reibung proportional zur Normalkraft. Ist also das Sandgewicht deutlich größer als das Gewicht der zylindrischen Aluminiumhülle, lässt sich die Reibung der Umrandung vernachlässi-

gen (die Aluminiumhüllen hatten eine Wandstärke von 0,1 mm). Bei den einzelnen Säulen handelt es sich um je eine Rücken- und eine Bauchmessung an jeweils verschiedenen Versuchstieren. Der Vergleich mit einem Sandzylinder, der auf einer Stahlplatte gleitet, zeigt dann: Polierter Stahl besitzt einen um 58% höheren Sandgleitwinkel als die Sandfischoberfläche. Die Kernthese kann somit als endgültig bestätigt angesehen werden: Die Evolution hat den Reibungswiderstand an der Sandfischoberfläche minimiert.

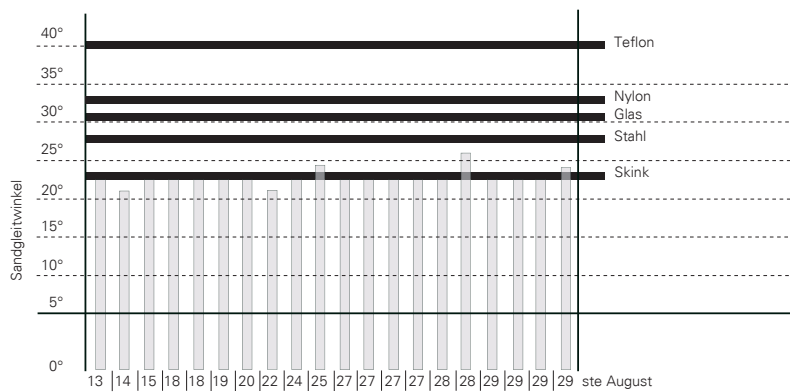


Abb. 3.3.6: Sandreibung am Sandfisch im Vergleich zu technischen Oberflächen

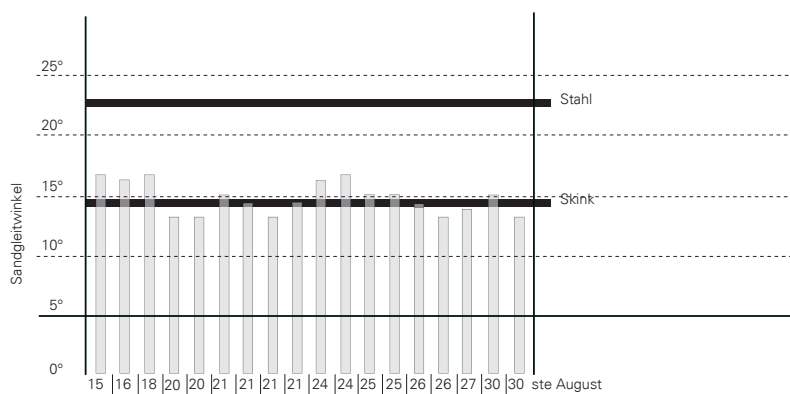


Abb.3.3.7: Alternative Reibungsmessung mit einem sandgefüllten Gleitzylinder

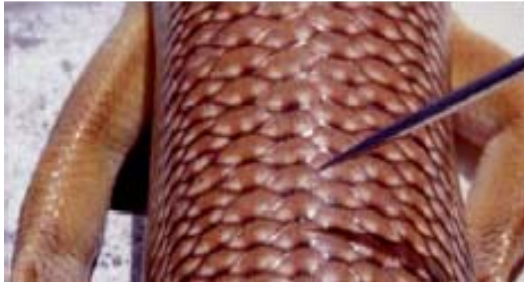


Abb.3.3.8: Abriebversuch am Sandfischrücken, die Nadelspitze weist auf den Aufprallpunkt

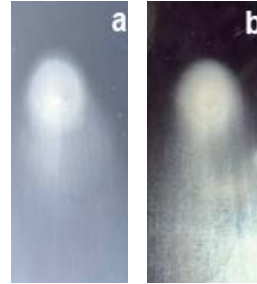


Abb.3.3.9: Abriebflecke auf technischer Oberfläche a) Stahlplatte b) Glasplatte

Reibung und Verschleiß sind Begriffe, die in der Reibungslehre gewöhnlich zusammen abgehandelt werden. Reibungsarme Oberflächen sind meistens auch verschleißfest. Das Phänomen, dass nach einem Sandsturm die Sandfischhaut glänzt wie zuvor, soll genauer untersucht werden. Deshalb wurde im Labor eine Sandfließapparatur konstruiert, die für 6 Stunden einen kontinuierlichen Sand-Fließstrahl aufrechterhält. Die Apparatur besteht aus einem großen Trichter, der mit Wüstensand gefüllt wird. Eine auswechselbare Sanddüse erzeugt einen Fließstrahl des gewünschten Durchmessers. Unter dem Trichter kann in einstellbarer Höhe die Materialprobe positioniert werden.

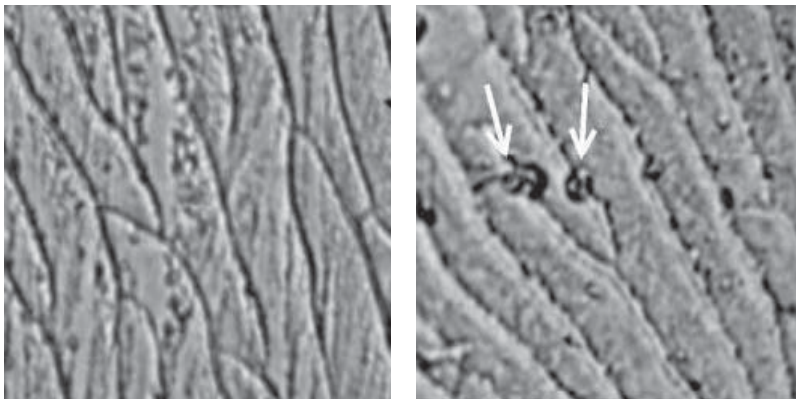


Abb. 3.3.10: Sandskinhaut vor/nach dem Test im Lichtmikroskop bei etwa 1000-facher Vergrößerung

Die simple Apparatur hat sich außerordentlich bewährt. Bei den vor Ort in der Wüste durchgeführten Abriebversuchen wurde mit einem 30 cm langen Sandstrahl gearbeitet, der 10 Stunden auf die Versuchsprobe aufprallte. Der Sandfischrücken zeigt nach dieser extremen Beanspruchung nicht die geringste Abriebspur. Ganz im Gegensatz dazu ist bei einer Stahloberfläche und einer Glasoberfläche unter gleichen Versuchsbedingungen (10 Stunden, 30 cm Sandstrahlänge) ein deutlicher Abriebfleck zu erkennen. Der Versuch erklärt auch, weshalb ein Sandfisch immer glatt und glänzend aussieht, obgleich er nach unseren Beobachtungen täglich eine Strecke von 500 bis 1000 Meter zurücklegt. So zeigt auch die Schwanzunterseite, die stets im Wüstensand schleift und so die typische Sandfischspur erzeugt, keinerlei Abriebspuren.

3.3.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Abriebfeste Strukturen und Oberflächen nach dem Vorbild der Sandfischhaut könnten in Gebäudehüllen immer dort eingesetzt werden, wo besondere Beanspruchungen die Lebensdauer außenliegender Bauteile stark einschränken. Das Phänomen der Kristallschwellen an den Schuppenkanten, die vorbeigleitende Sandkörner oder andere Feinstpartikel elektrisch ablösen, könnte zu nanoskaligen Beschichtungen außenliegender Gläser oder anderer Gebäudehüllenelemente führen. Dabei stehen die Dauerhaftigkeit der Oberfläche und der minimierte Wartungs- und Betriebsaufwand im Vordergrund, denn langlebige und widerstandsfähige Gebäudehüllen tragen so indirekt zur Senkung des CO²-Austosses bei, indem sie Produktions- und Montagezyklen wesentlich verlängern können.

3.3.6 Anwendung auf die Gebäudehülle

In den Abb. 3.3.11 bis 3.3.13 wurde mittels einer Computervisualisierung versucht, die komplexe abrasionsfeste Struktur im Rechner nach zu modellieren. Dabei wurden die Proportionen und Abmessungen der vorliegenden REM-Aufnahmen aus Abb. 3.3.5 als Grundlage verwendet. Besonders schwierig ist dabei die leichte Inhomogenität, die sich in den Aufnahmen immer wieder gezeigt hat. Es gilt also

erst einmal nachzuweisen, in wie weit eine maschinell erzeugte analoge Struktur, die sicherlich diese Inhomogenität nicht aufweist, dennoch zu ähnlichen Ergebnissen kommen kann. Ansatz wäre also eine nanoskalige Beschichtung mit einer ungefähren Oberfläche wie in Abb. 3.3.11 zu erkennen. Diese ist hier 200-fach vergrößert, man würde die Schuppenausformungen also mit dem bloßen Auge nicht erkennen können.



Abb. 3.3.11: Skizzenhafte Visualisierung der Sandfischhaut *scincus scincus*

Zoomt man weiter in die Anordnung der verschiedenen Schuppenkämme hinein, erkennt man in den Abb. 3.3.12 bis Abb. 3.3.13 unterschiedlich große und nebeneinander quer zur Abriebsrichtung liegende Kristallschwellen, die auf ihren Kämmen gerundete zahnartige Ausstülpungen (s. Abb. 3.3.13) aufweisen. Diese, so vermutet man, sind im Wesentlichen für die Ablösung der Sandkörner oder anderer Feinstpartikel zuständig, indem sie die ankommenden Partikel elektrisch ablösen, nachdem sie durch eine zuvor erfolgte Reibung aufgeladen wurden.

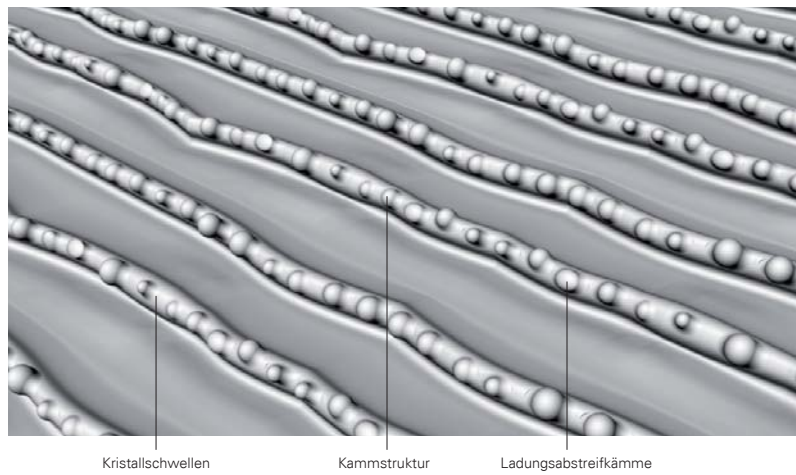


Abb. 3.3.12: Skizzenhafte Visualisierung der Sandfischhaut *scincus scincus*

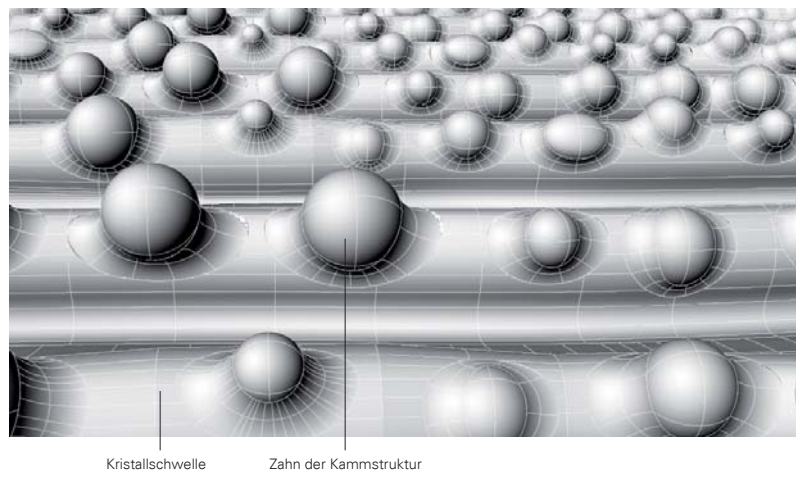


Abb. 3.3.13: Skizzenhafte Visualisierung der Sandfischhaut *scincus scincus*

3.3.7 Resümee

Könnte man die Schuppe des Wüstenfischs technisch reproduzieren, würde vor allem die wissenschaftliche Disziplin der Tribologie, die sich allein mit der Minimierung von Reibung befasst, einen neuen Werkstoff zur Verfügung bekommen, mit dem massiv Reibungsenergie und Reibungsverluste minimiert werden könnten. Denn wo auch immer Mechanik in Bewegung ist, nimmt Reibung den Schwung und sorgt für Verschleiß. Mittels der Evolution hat der Sandskink den Gleitwiderstand im Sand derart optimiert, daß technische Anwendung sowohl im Bereich des Motorenbaus oder der Fördertechnik in greifbare Nähe rücken könnten. Allein der Einsatz gleitfähiger Schmierstoffe wie Öle oder Fette würden massiv reduziert werden, wenn man perfekt gleitende reibungsminimierte Oberflächen gegenüberstellt. Die Kühlleistung moderner Kolbenmotoren würde sinken, da weniger Reibungsenergie erzeugt wird, der Verschleiß würde zurückgehen, die Wartungsintervalle könnten verlängert werden und last but not least würde der Verbrauch fossiler EnEnergieträger welcher Form auch immer deutlich sinken. Auch Gleitflächen für Sandboards, abriebfeste Touchscreens oder nanostrukturierte abriebresistente Lacke könnten nach diesem Vorbild der Natur hergestellt werden.

3.4 Autosensitive Verschattungsstruktur

3.4.1 Inspiration

Verschiedene Schlangensternearten sind in der Lage mit Hilfe ihrer Oberflächenstruktur Distanzen wahrzunehmen, obwohl sie weder Augen noch ein Gehirn besitzen. Allein durch die besondere Ausformung der Oberfläche können diese Tiere einfallendes Licht derart exakt brechen, daß sie den Abstand eines möglichen Feindes so genau einschätzen können wie es für ihre Sicherheit notwendig erscheint. Mittels einer sehr einfachen Sensorik können die Tiere Informationen direkt erfassen und weiterleiten. Diese durch Lichtimpulse gesteuerte Sensorik könnte zu einem Strukturellen Lichtsensor führen, der nur durch die Oberflächenbeschaffenheit in der Lage ist z.B. den UV-Gehalt des Lichtes zu messen oder die Intensität der Sonnenstrahlung zu ermitteln. Dies wiederum wären wichtige Informationen, mit denen weitere Subsysteme wie Verschattungsvorrichtungen oder Solarkollektoren orientiert werden können.

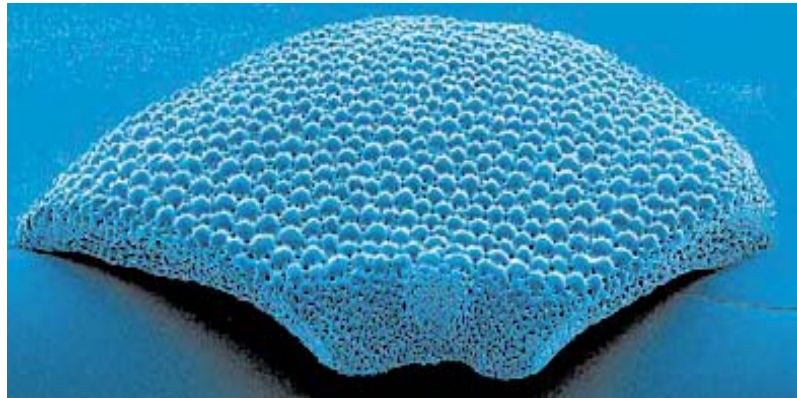


Abb.3.4.1: Oberflächenstruktur des Schlangensterns (Armplatte)

3.4.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Abteilung	Gewebetiere	<i>eumetazoa</i>
Klasse	Schlangensterne	<i>ophiuroida</i>

Abb. 3.4.2: Biologische Klassifizierung des Schlangensterns

3.4.3 Allgemeine Beschreibung

Schlangensterne gehören zum Stamm der Stachelhäuter (*Echinodermata*) und zur Klasse der Seeigel und den Haar- oder Federsternen. Kennzeichnend für den Unterstamm (*Eleutherozoa*) sind abgeflachte, meist eindeutig fünfstrahlige Tiere, wobei die Schlangensterne als einzige Tiere dieses Stammes keine Saugnäpfe an der Unterseite ihres Körpers haben. Die Schlangensterne kommen in allen Ozeanen und Meeren in Tiefen von bis zu 7000 Metern vor. Weltweit sind ca. 2000 verschiedene Arten bekannt, wobei paläontologische Ausgrabungen ergeben haben, dass es diese Tierart bereits seit über 500 Millionen Jahren gibt. Ihr Körper besteht aus einer scheibenförmigen Struktur, die je nach Art 1-80 mm groß ist und aus fünf dünnen Armen, die je nach Art 3 bis 420 mm lang werden können. Die kleinen Härchen auf den Armen der Tiere dienen der Nahrungszufuhr und transportieren diese zur Fraßöffnung auf der Unterseite der Körperscheibe, wobei sie Plankton als Speise bevorzugen. Die Schlangensterne besitzen weder ein Gehirn, noch ein Herz oder andere Organe wie Nieren oder eine Leber. Die einwirkenden Informationen werden lediglich über Nervenstränge durch den Körper geleitet. Das Tier besteht aus den drei Schichten der Haut, dem Skelett, das die Wirbel ersetzt und einem Bauch. Die äußere Schicht (Haut) und die innere Schicht (Bauch) bestehen jeweils nur aus einer Lage Zellen. Manche Schlangensterne besitzen sogar die Fähigkeit, die Farbe zu wechseln oder mittels Biolumineszenz zu leuchten. Bei Gefahr können die Tiere einzelne Arme gezielt abwerfen, wobei die fehlenden Gliedmaßen nach kurzer Zeit wieder nachwachsen. Schlangensterne sind im Vergleich zu Seesternen sehr beweglich und relativ schnell. Ihr Skelett besteht aus reinem Kalzit (CaCO_3), einem Mineral aus der Gruppe der Karbonate. Durch Beimischung anderer Elemente kann

das Skelett in unterschiedlichen Farben vorkommen. Das Grundmaterial Kalzit ist jedoch farblos, hat den Härtegrad 3 und bildet den Grundstoff von Zement. Unter optischen Gesichtspunkten betrachtet hat klares Kalzit eine optische Doppelbrechung des Lichtes zur Folge. Der *Ophiocoma Wendtii* hat eine zentrale Scheibe von 2 bis 3 cm und eine Armlänge von 6 bis 8 cm. Er kommt hauptsächlich in der Karibik und vor der Küste Südamerikas vor.

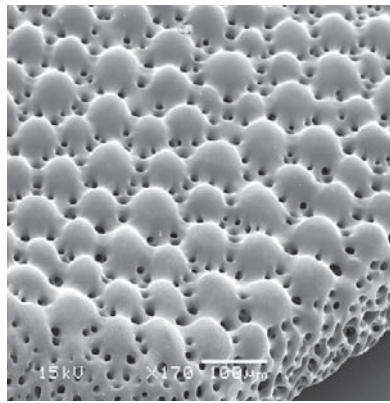


Abb. 3.4.3: Nahaufnahme der rückseitigen Armplatte des *ophiocoma wendtii*



Abb. 3.4.4: *Ophiocoma Wendtii*

3.4.4 Phänomenologische Betrachtung

Eine besondere Art der Schlangensterne stellt der *Ophiocoma Wendtii* dar. Taucher bemerkten, dass der *Ophiocoma Wendtii* herannahende Feinde erkennen kann und sofort ein Ausweichmanöver einleitete. Dieses Phänomen ist deshalb besonders erstaunlich, da der Schlangensstern bekanntermaßen weder ein Gehirn noch Augen besitzt. Das Tier muss also über eine alternative Sensorik verfügen, die Informationen direkt erfassen und verarbeiten kann. Ebenso ungewöhnlich ist der Farbwechsel des *Ophiocoma Wendtii*, wie man in der Abb.: 2.6.5 erkennen kann. Man sieht dort den farblichen Unterschied zwischen einem Tag- und einen Nachtzustand, wo-

bei das Tier tagsüber eine dunklere Färbung und nachts eine hellere aufweist. Verantwortlich ist aber nicht eine innere biologische Uhr, sondern die Intensität des umgebenden Lichtes. Der Farbwechsel vollzieht sich sehr langsam und zeigt eine Hautoberfläche, die gewissermaßen eine Abblendfähigkeiten besitzt und somit in der Lage ist darunter liegende lichtempfindliche Körperteile zu schützen. Aufgrund seiner relativ simplen Struktur sind Entwicklungen sind sehr kompakte, wartungsfreie und ergo kostengünstige Konstruktionen, zu erwarten, die auf Licht reagieren können. Sein Skelett dient nicht nur zur Panzerung, sondern auch zum „sehen“. Die Kalzitkristalle auf der Rückseite seiner Arme dienen als optische Rezeptoren, die dem Tier eine Hell-Dunkel-Unterscheidung ermöglichen. Die Kalzitkristalle sind nahezu perfekt ausgeformte und mikroskopisch kleine optische Linsen und exakter als alles zur Zeit künstlich herstellbare. Ihre Größe beträgt ungefähr 1/20 mm, wobei nur direkt von oben einfallendes Licht gebündelt werden mit einer Abweichung von bis zu 10° gebündelt werden kann. Der Brennpunkt jeder Linse fällt exakt auf das Ende eines Nervenstrangs und liegt ungefähr 5 Mikrometer unterhalb der Linse und ist genauso groß wie der jeweilige Nervenstrang. Tausende dieser Linsen wirken zusammen und bilden eine Art „Primitives Facettenauge“. Die Entstehung der Linsen wird nicht zentral gesteuert, sondern die Tiere produzieren unterschiedliche Proteintypen, die die Bildung der Kristalle steuern. Der in einem trigonalen Muster kristallisierende Stoff weist eine Doppelbrechung für das einfallende Lichtes auf und bildet sich nach dem chemischen Gleichgewicht: $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Das Gleichgewicht dieser Formel verlagert sich bei steigender Temperatur auf die rechte Seite, zudem ist ionisiertes Wasser für seine Bildung von Vorteil, was dazu führt, daß Tiere in warmen Salzwässern mit geringerem Energieaufwand Kalzitstrukturen ausbilden können. Zudem hat Kalzit als kristalliner Stoff eine extreme Härte und ist überall verfügbar. Auch die Verwendungsmöglichkeiten dieses Rohstoffes ist als exzellent zu bezeichnen und wird deshalb von vielen einfacheren Meeresbewohnern als Baumaterial für ihre Skelette verwendet. Entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Linsenstruktur ist jedoch der hexagonale fraktale Charakter auf Mikro- und Makroebene, da diese Anordnung des Kalziumatoms im Kalzitgitter die entscheidende Voraussetzung für Lichtbrechung ist. Das Wachstum von Kalzitkristallen besteht aus der Aufeinanderschichtung von rautenförmigen Segmenten, die sich pyramidal verzweigen und so z.B. eine Kristallspitze gestalten. Sein typisch kristallines Aussehen erhält Kalzit durch die Molekularstruktur des lo-

nengitters. Da jedes sich einreihende Molekül feste Anknüpfungspunkte hat, entsteht ein sehr regelmäßiges Gesamtbild. Weiß man jedoch um die Chiralität von Molekülen (gespiegelte Moleküle z.B.), so kann man mit Hilfe von Molekülbindungen gezielt Stoffe wie z.B. Asparaginsäure beeinflussen und die eckige Ordnung unterbrechen oder Kristalle mit atypisch gerundeter Form wachsen lassen. Um genaue Formvorgaben zu realisieren, müsste man sehr genaue Dosierungsvorrichtungen für winzige Mengen an Säurezugaben entwickeln, die augenblicklich noch nicht zur Verfügung stehen. Grobe Formen, die leichte Krümmungen erreichen und so lichtfokussierend wirken, können schon heute erzeugen werden.

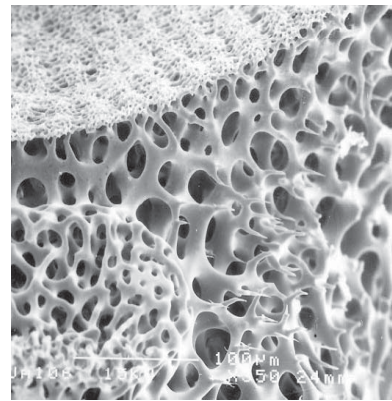
Abb. 3.4.5: Tag- und Nachtfärbung des *ophiocoma wendtii*

Abb. 3.4.6: Kalzitstruktur

Unter Berücksichtigung ihres vergleichsweise simplen Aufbaus, besitzen die *Ophiocoma Wendtii* erstaunliche Fähigkeiten. Vor allem Joanna Aizenberg [AIZENBERG, 2001) beschäftigt sich im Dienste der Bell Laboratories, die für ihre Lichtleiterforschung renommiert sind, mit dem Phänomen des „sehenden Skeletts“. Bei näherem Betrachten der Haut bemerkte man Lichtreflexionen, die möglicherweise mit dem angenäherten hexagonal angeordneten Linsenfeld, das die Oberflächenstruktur einer jeden Armplatte des *Ophiocoma Wendtii* bildet, zu erklären sind. Ein hexagonales Muster entspricht der optimalen Anordnung von gleichgroßen Kreisen und

ist vermutlich auf die Molekularstruktur des Baustoffes Kalzit der Linsen zurückzuführen. Unterhalb der schützenden Skelettschicht des *Ophiocoma Wendtii* befinden sich Nervenstränge, auf deren Linsen genau im Fokus platzierte Rezeptoren das einfallende Licht bündeln und dadurch Informationen über die Außenwelt erhalten. Diese werden direkt über Nervenbahnen in Bewegungsimpulse umgewandelt. Vergleicht man die Größe der lichtempfindlichen Sensorfläche des Schlangensterms (etwa $3 \mu\text{m}^2$) mit der von komplexerer Lebewesen wie z.B. den Säugetieren, die Linsen im cm^2 -Bereich haben, so erscheint es offensichtlich, dass die vorgeschaltete Linse die Schwäche des Sensors ausgleichen muss. Um punktgenau zu fokussieren ist sogar eine besondere Linsenkontur erforderlich: Die parabolische Form vermeidet die Projektionsfehler sphärischer Linsen. Der *Ophiocoma Wendtii* ist bis dato das einzige lebende Tier, bei dem dieses Linsensystem entdeckt wurde.

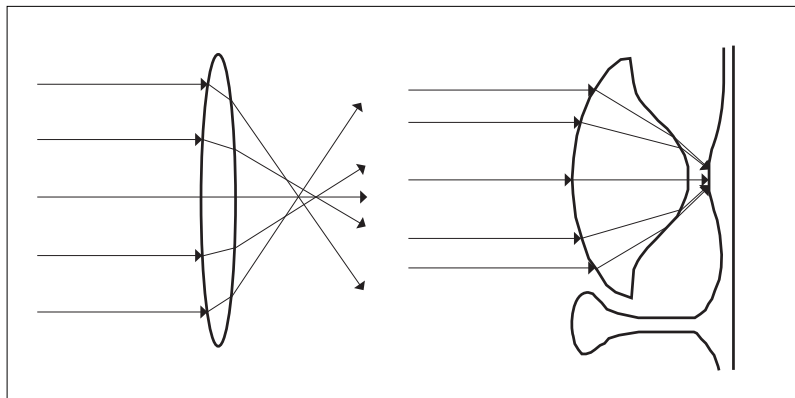


Abb. 3.4.7: Sphärische Aberration und perfekte Lichtlenkung durch Parabelform

Schneidet man eine Linse in der Mitte auseinander, so ist zu sehen, dass es eigentlich eine Doppellinse ist. Das eintreffende Licht fällt auf die erste Linse und wird gebrochen, fällt auf die zweite Linse und wird abermals gebrochen, bevor es auf den Nervenstrang fällt. Die Intensität des Lichtes, das auf den Nervenstrang fällt, wird durch schwarze Pigmentzellen geregelt. Sie dehnen sich bei starkem Licht aus und

absorbieren einen Teil des Lichtes. Dies erklärt auch die Farbveränderung von Tag zu Nacht und umgekehrt. Die Nervenstränge der einzelnen Linsen laufen schließlich in einem Nervenbündel zusammen, den den gesamten Körper durchzieht und einfallende Informationen verarbeitet. In einem Versuchsaufbau wurde das Skelett unterhalb der Linsen abgetrennt und zwei photosensitive Platten in Abständen von 40 und 68 Mikrometer darunter angebracht. Diese Platten wurden durch die Linsenstruktur hin belichtet, was zu einer unterschiedlichen Größe der auf den Platten eingebrannten Lichtpunkte führte. Dies läßt den Schluss zu, dass die Linsen aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe auch unterschiedliche Brennpunkte auf den Projektionsplatten haben. Dadurch, so wird vermutet, kann der *Ophiocoma Wendtii* Distanzen abschätzen.

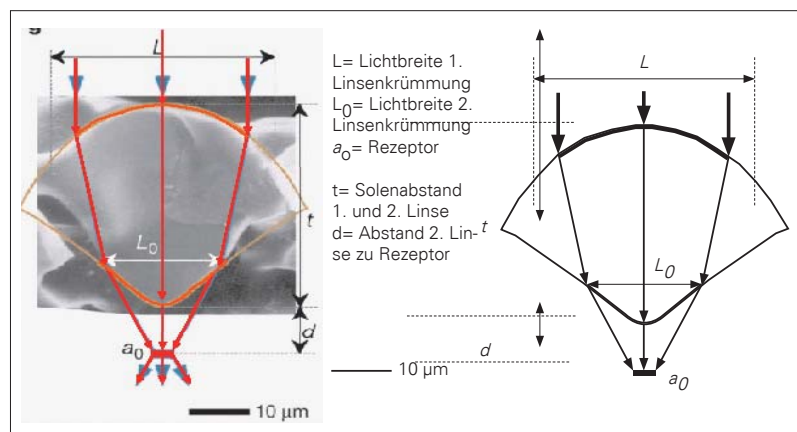


Abb. 3.4.8: Darstellung der Doppellinsen im Schnitt und als diagrammatische Zeichnung

3.4.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Parallelstrahlen, die in einer sphärisch gekrümmten Linse dem Brechungsgesetz folgend gebrochen werden, schneiden sich nicht in einem Brennpunkt, sondern erzeugen mehrere Schnittpunkte (Problem der sphärischen Aberration). Das be-

deutet u.a., dass ein Punkt als Ring abgebildet wird. Heute begegnet man diesem Problem mit dem Hintereinanderschalten mehrerer sphärischer Linsen, die sich gegenseitig korrigieren. Errechnet man umgekehrt aus einem perfekten Brennpunkt eine Linsenform, so kommt diese der Schlangensterlinse erstaunlich nahe. Das primitive Lebewesen verfügt also über einen hochentwickelten optischen Apparat, der von unschätzbarem Wert für die Lichtleiterforschung in der IT-Branche wäre. Bei der heutigen Transistorendichte eines Prozessorchips erreicht die elektrische Leitertechnik durch ständige Erhöhung der Dichte ihre Grenzen und soll durch effizientere optische Leiter ersetzt werden.

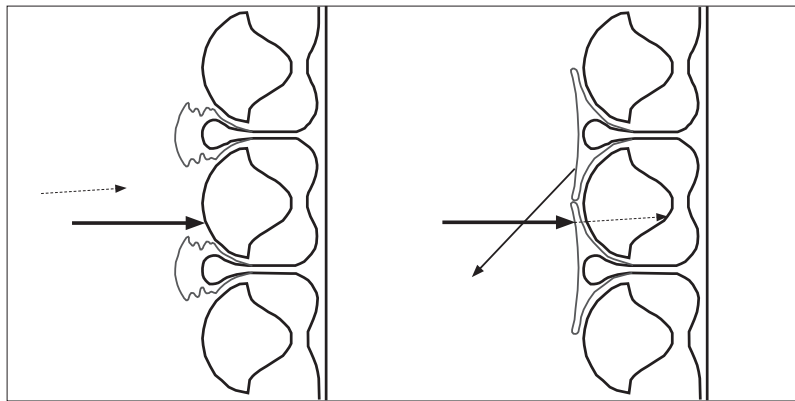


Abb. 3.4.9: Diagrammatische Zeichnung des deaktivierten und aktivierten Sonnenschutzes

Darüber hinaus besitzt der *Ophiocoma Wendtii* einen hauchdünnen Blendschutz, der seine Nerven vor zu intensiver Lichteinstrahlung und damit Schädigung bewahrt. Wird eine gewisse Grundintensität des Umgebungslichtes erreicht, sendet der getroffene Nerv ein dezentrales Signal an die über ihm gelegenen Hautzellen und diese beginnen mit Pigmenten die Linsen graduell zu verdunkeln. Dies wird vom Betrachter dann als Farbwechsel, als Verdunklung der Haut wahrgenommen. Vergleichbar wäre dieser Vorgang mit einem Sonnenschutz, der aufgeteilt in viele einzelne Segmente punktuell stets nur die maximal erträgliche Menge an

Licht durch ein Fassadenelement einstrahlen lässt. Beim Schlangensterne ist die Reaktion als relativ träge zu bezeichnen und es ist zu bedenken, dass unter Wasser die Lichtintensität bereits stark gemindert ist. Bei wenig Umgebungslicht, wie z.B. nachts, ist der Grundeintrag der Strahlungsenergie für die Nervenstränge des *Ophiocoma Wendtii* kaum relevant, so daß sich die Pigmente zurückziehen können und das Sichtfeld der Linsen sich weitet. Dadurch erscheint die Haut des Schlangensterne dann hell. Steigt die Grundintensität des Umgebungslichtes, z.B. bei Tag, wird die Strahlungsenergie für die Nervenstränge des *Ophiocoma Wendtii* unangenehm hoch, worauf sich die Pigmente ausdehnen und die Linsen bedecken. Dies reduziert den Lichteinfall auf den darunter befindlichen Nervenstrang. Von außen wird dieser Vorgang als Verdunkeln wahrgenommen. Diesen Vorgang könnte man auf ein transparentes Fassadenelement anwenden, das in der Lage ist, den UV-Gehalt oder die allgemeine Lichtintensität zu messen und mittels sensorischer Leistung einen Verschattungsmechanismus in Gang zu setzen, der wiederum zu einer Verdunkelung des Systems führt. Nimmt die Intensität des Lichtes wieder ab, zieht sich der Verschattungsmechanismus zurück und das Bauteil wird wieder transparenter. Gestalterische Einsatzmöglichkeiten wären auch Farbveränderungen durch unterschiedlichen Lichteinfall oder auf Bewegung oder Berührung reagierende Fassaden.

3.4.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Ein Ansatz könnte also sein, die Schlangensternehautverdunklung als Verfahrensanalogie für ein autosensitives Verschattungssystem zu nutzen. Dazu müsste man die strukturelle Sensor-Aktor-Kongruenz umsetzen. Idee wäre, daß sich in einem geschlossenen Verbundsystem eine Linse in einem transparenten Gel befindet, die sich durch die Strahlen erhitzt, ausdehnt und ein opakes „Pigment“ über die Linse drängt. Sobald sich die Linse leicht verschattet, kühlt sie wieder aus, schrumpft wieder etwas, um dann wieder anzuschwellen, bis sich das Optimum eingependelt hat. Das System evaluiert sich also dauernd selbst und stellt sich demnach auch selbst immer wieder korrekt ein, ein autojustabler Vorgang also.

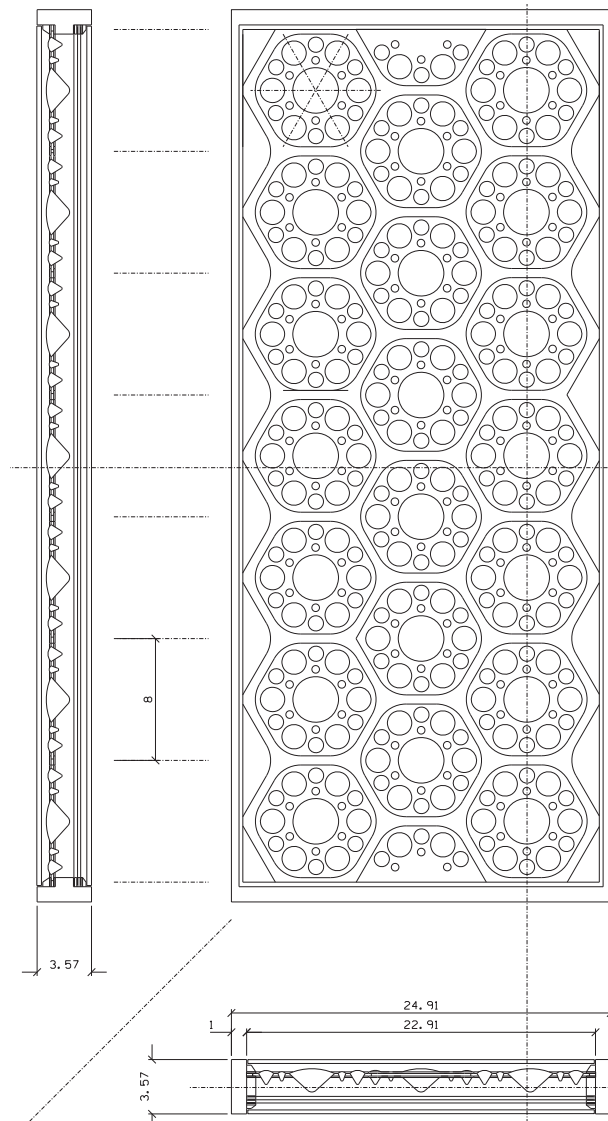


Abb. 3.4.10: Diagrammatische Zeichnung einer autosensitiven Verschattungsstruktur



Abb. 3.4.11: Modellausschnitt einer autosensitiven Verschattungsstruktur im Überblick



Abb. 3.4.12: Modellausschnitt einer autosensitiven Verschattungsstruktur im Detail

3.4.7 Resümee

Dieses neu entdeckte Linsensystem ist in seiner Größe bisher das qualitativ Beste. Auch die Industrie will sich die Genauigkeit dieser mikroskopisch kleinen Linsen zu Nutze machen. Man erhofft sich mit ihrer Hilfe eine verbesserte Konstruktion von optischen Bauteilen in Telekommunikationsnetzen, eine Weiterentwicklung der Optischen Lithographie und eine Verfeinerung direktonaler Bildschirme. „Biomimetische“ Linsen als nützliche Bestandteile in optischen Netzen und in der Chipentwicklung sind ebenso denkbar. Auch über die Möglichkeit der Herstellung von Signalprozessoren wird nachgedacht. Bis heute ist es allerdings noch niemandem gelungen, Linsen in dieser Größe und mit dieser Perfektion nachzubilden.

3.5 Reversible Haftstrukturen

3.5.1 Inspiration

Mittels Van-der-Waals-Kräfte schaffen es Geckos scheinbar mühelos entlang von Wänden und Decken zu kriechen. Das Wissen um die Fähigkeiten der molekularen Haftkraft der Geckozehen bietet Anlass über die Möglichkeit gänzlich neuer Reversibler Haftstrukturen im Bereich von Fassaden und deren Fügungstechniken nachzudenken. Die Umsetzung des extrem filigranen Aufbaus und der hierarchischen Anordnung der Härchenstruktur der Geckozehen könnte zu völlig neuartigen umweltschonenderen Herstellungsverfahren für Verbundsicherheitsgläser oder andere Füge-technologien führen. Das reversible Verhalten dieser Strukturen bietet auch im Renovations- oder Redundanzbereich neue Potentiale.



Abb. 3.5.1: Setae-Struktur an den Geckozehen

3.5.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Überabteilung	Wirbeltiere	<i>verteprata</i>
Abteilung	Landwirbeltiere	<i>tetrapoda</i>
Klasse	Reptilien	<i>reptilia</i>
Ordnung	Schuppenkriechtiere	<i>squamata</i>
Familie	Geckos	<i>gekkonidae</i>

Abb. 3.5.2: Biologische Klassifizierung des Geckos

3.5.3 Allgemeine Beschreibung

Geckos (*gekkonidae*) haben sich im Laufe der Evolution an die verschiedensten Lebensräume der Erde angepasst und bevölkern sowohl Wüsten, gemäßigte Zonen wie auch die Tropen. Seit ca. 50 Millionen Jahren bevölkern sie die Erde und haben es zu einer kaum zu überschaubaren Artenvielfalt gebracht. Derzeit gibt es 97 bekannte Gattungen mit 1081 Arten, die sich in fünf Unterfamilien teilen (je nach Abstammung und Gestalt). Geckos (zu deutsch: „Haftzeher“) erreichen eine Größe von 4 - 40 cm und sind in der Lage ein Vielfaches ihres Körpergewichts zu tragen. Die zumeist nachtaktiven Tiere (ca. 75%) werden aufgrund ihrer unterschiedlichen Zehen in Lamellengeckos und Krallengeckos unterteilt, wobei lediglich die Lamellengeckos in der Lage sind selbst kopfüber über Glasscheiben zu laufen.

3.5.4 Phänomenologische Betrachtung

Im Laufe der letzten 500 Mio. Jahre Evolutionszeit ist die Natur zu durchaus unterschiedlichen Lösungsansätzen für Haftungsstrategien im Tierreich gekommen. So halten sich z.B. Kraken und Seesterne mittels Saugnäpfen an einem Haftgrund fest. Fliegen und einige spezielle Käferarten halten sich dagegen mittels einer Art Klebstoff, den sie über ihre Fußsohlen produzieren, an einem Haftgrund fest und sind in de Lage selbst bei bis zu 30km/h an einer Windschutzscheibe zu haften. Di-

ese Art der Haftung ist natürlich relativ energieaufwendig. Die Springspinnen und die Geckos „kleben“ dagegen ohne Sekretabsonderung oder Saugnäpfen, sozusagen „trockenen Fußes“, an nahezu allen denkbaren Oberflächen. Die trockene Verbindungstechnik verzichtet konsequent auf alle additiven Zusätze wie Flüssigkeiten oder andere Hilfsmittel.

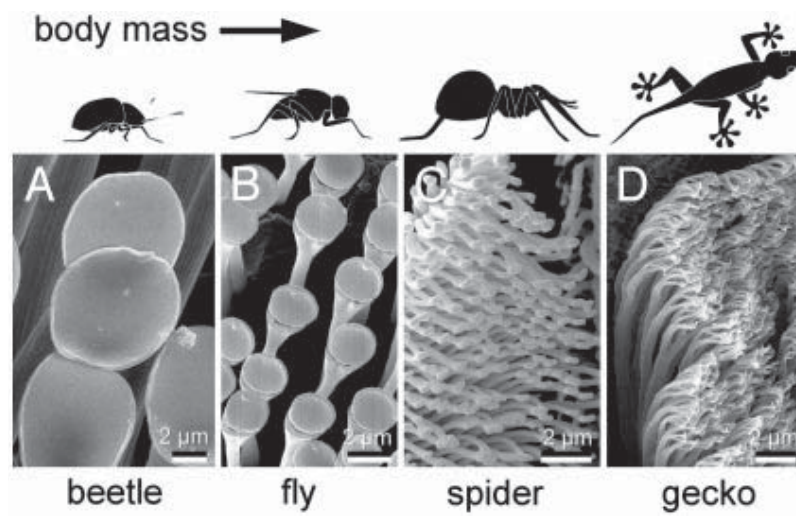


Abb. 3.5.3: Insekten- und Amphibienarten im Vergleich zu ihren Haftstrategien

Die Lösung steckt im Aufbau und in der hierarchischen Struktur der Geckozehen, sowie der molekularen Verbindungskraft der im Vorfeld angesprochenen Van-der-Waals-Kräfte. Die Entwicklung molekularer Haftleistung wurde von der Natur nicht nur einmal als optimierbares Phänomen evolutioniert, sondern unabhängig von einander gleich bei mehreren Spezies, denn nicht nur Geckos sondern auch Spinnen und Insekten nutzen diese adhäsive Anziehungskraft. Der Gecko hat sie allerdings zur Vollendung gebracht, denn er ist das größte bisher bekannte Tier, das in der Lage ist völlig glatte Wände hinauf zu laufen oder überkopf zu gehen. Das ganze

folgt dem Prinzip der Kontaktaufspaltung, bei dem fein verzweigte Kontaktpunkte erzeugt werden, die bei gleicher Gesamtkontaktfläche eine höhere Haftkraft besitzen als größere Kontaktpunkte. Vergleicht man diese Strukturen z.B. mit denen der Schmeißfliege, fällt auf, wie grob diese gegen über denen der Geckos sind.

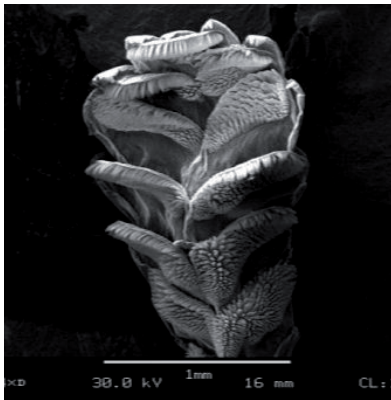


Abb. 3.5.4: Lamellenstruktur einer Geckozehe



Abb. 3.5.5: Gecko

Dabei besteht jede einzelne Zehe aus hunderttausenden von feinsten Härchen (*Setae*), die aus Keratin bestehenden und ungefähr 100 Mikrometer groß sind, wobei dies ungefähr ein Zehntel der Größe eines menschlichen Haares ist. Die Setae sind nebeneinander reihenförmig angeordnet und bilden für das menschliche Auge sichtbare 400 bis 600 Mikrometer lange Lamellen. Pro mm² sind dann ca. 5000 dicht gepackte Härchen angeordnet. Diese feinen Lamellen tragen an ihrem Ende noch eine weitere, noch wesentlich feinere Strukturen, die spatelförmige Oberflächen ausbilden (*Spatulae*). Die Dicke der Spatulae beträgt ca. 200 bis 500 nm, ziemlich exakt dem Bereich der ultraviolettem und blauem Lichtwellen. Genau diese Feinststrukturen sind für die außerordentliche Haftkraft verantwortlich und ermöglichen es dem Gecko auch überkopf unterhalb von Glas zu laufen. Interessant ist auch, dass ein 10-facher Sicherheitsfaktor vorliegt, der es dem Tier ermöglicht mit nur noch einem Zeh an einer Terrariumsscheibe haften zu bleiben. Laut Messungen müsste man eine Kräfteinwirkung von 10 N pro Fuß aufwenden, um ei-

nen Gecko von einer Scheibe abzulösen. Diese Wirkungsweise wurde erst in den letzten Jahren durch detaillierte Untersuchungen der Setae erforscht, wobei die Van-der-Waals-Kräfte für das Haftvermögen der Geckos die entscheidende Rolle spielen. Die Van-der-Waals-Kräfte sind unvorstellbar winzige im Molekularbereich wirkende, elektrostatische Anziehungskräfte: Elektronen in einem neutralen Molekül bleiben nicht ständig an Ort und Stelle, sondern bewegen sich stetig umher, wodurch kurzzeitige Schwankungen in ihrer Verteilung und ihrer temporäre Dipolmomente entstehen.

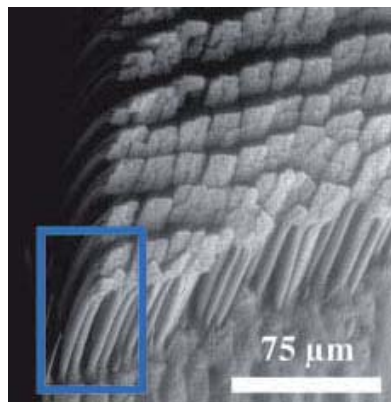


Abb. 3.5.6: Lamellenstruktur der Setae

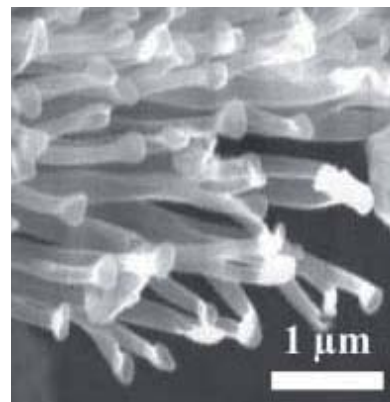


Abb. 3.5.7: Spatelförmige Spatulaaenden

Diese rufen in direkt benachbarten Molekülen entgegen gesetzte Dipolmomente hervor und erzeugen bei erneuter Elektronenverteilung eine Oszillationen der miteinander gekoppelt Moleküle, deren Ergebnis eine Anziehungskraft ist. Durch die Entwicklung des mikroelektro-mechanisches System (MEMS) wurde möglich die einzelnen Adhäsionskräfte der Härchen unter verschiedenen Bedingungen zu messen. Die Testoberfläche für diesen Versuch war ein Aluminiumdraht, der die Haftkraft wird über den elektrischen Widerstand eines piezoelektrischen Kristalls ermitteln kann. Erste Ergebnisse zeigten, dass bei einfachem Ansetzen der Setae auf dem Aluminiumdraht so gut wie keine messbare Haftung entstand. Mühelos und

ohne großen Kraftaufwand konnte man die Härchen nach der Kontaktierung wieder ablösen. Nach genauerer Betrachtung des motorischen Bewegungsablaufes des Tieres zeigte sich, dass sich die Geckosohle beim Aufsetzen der Füße und direkt nach der ersten Berührung mit der Oberfläche verbreiterte. Diese Bewegungsabfolge lässt den Schluss zu, dass die Setae auf die Unterlage gepresst und dabei ein wenig an der Unterlage entlang geschoben werden. Gestützt wird diese Theorie auch dadurch, dass bei toten Geckos keinerlei Haftkraft mehr messbar waren. In einem nächsten Schritt wurde dieser Bewegungsablauf beim Ansetzen der einzelnen Test-Setae auf den Draht angewendet. Tatsächlich waren die Setae deutlich schwieriger zu lösen wie zuvor.

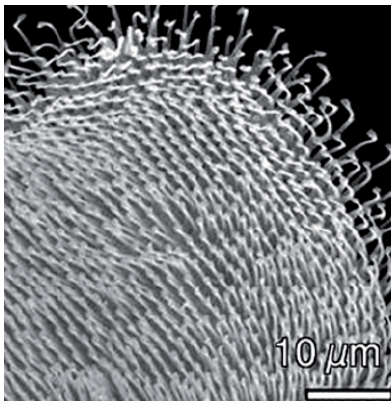


Abb. 3.5.8: Spatulae freistehend

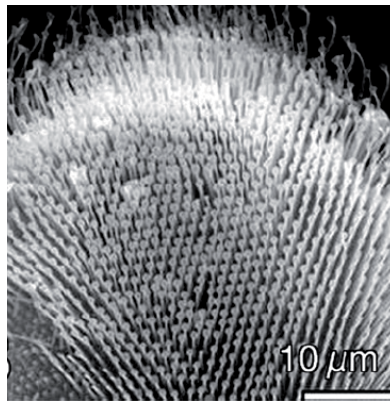


Abb. 3.5.9: Spatulae in Kontakt

In der Abb. 2.7.7 ist deutlich zu erkennen, welche Berührungsoberfläche kurz vor der Anpressung vorliegt und in Abb. 2.7.8 ist zu sehen, welche Oberfläche im Kontaktfall zwischen dem Tier und dem Haftgrund vorliegt. Der nächste Schritt war die Evaluierung der optimalsten Haftungsleistung, die immer dann auftrat, wenn man die einzelnen Setae nach dem leichten Andrücken ca. 5 Mikrometer an der Oberfläche entlang schob. Die gemessene Haftkraft eines einzelnen Härchens würde dabei schon ausreichen, um eine komplette Ameise zu halten. Dieses Ergebnis wür-

de, bei rechnerischer Hochrechnung an das Geckogewicht, bedeuten, dass man ca. 100 N benötigen würde um einen Gecko von der Wand ablösen zu können. Zur Verdeutlichung: 100 N entsprechen der Gewichtskraft eines 10l Wassereimers [Spektrum der Wissenschaft, Sept. 2000]. Weitere Versuche zeigten, dass die Haftungsleistung sowohl in Verbindung mit Wasser, wie auch im Vakuum vollständig funktionstüchtig blieb.

Eine weitere Frage war nun, wie es die Tiere schaffen sich bei dieser enormen Haftungsleistung so leichtfüßig und so schnell wieder zu lösen. Zumal dies so schnell geschieht, dass Geckos in einer Sekunde bis zu 15 Schritte machen können. Wieder ist die Bewegungsabfolge der Schlüssel zur Lösung, da die Tiere eine spezielle Abrolltechnik entwickelt haben, die es ihnen erlaubt die Haftkraft mittels eines geometrisch definierten Abrollens wieder zu lösen. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit dem Abziehen eines Klebestreifens vom Haftuntergrund. der Gecko „schält“ förmlich seine Zehen vom Untergrund, wobei immer nur ein kleiner Teil der Setae nach und nach abgelöst wird. Hinzu kommt die Tatsache, dass die Setae ab einem Winkel von ungefähr 30° ihre Haftkraft proportional verlieren, da die intermolekulare Verbindungskraft dann fast von selbst abbricht.

Die Geometrie und Form der Gecko-Härchen gilt als wesentlicher Faktor für die physikalischen Wechselwirkung und der damit verbundenen Klebekraft. Aufgrund von umfangreichen Tests konnten mögliche Alternativtheorien wie z.B. die Haftung durch Wassermoleküle oder Biomoleküle oder eine besonderer chemischer Aufbau ausgeschlossen werden. Auch die Haftungsleistung durch Kapillarkräfte konnte ausgeschlossen werden, da kaum messbare Unterschiede zwischen der adhäsiven Anziehung von hydrophoben und hydrophilen Oberflächen auftraten. Ein weiteres Phänomen ist der Selbstreinigungseffekt der Geckofüße, wobei hier besonders erstaunlich ist, daß auch an einer extrem haftstarken Struktur nicht unbedingt alles bleiben hängenbleiben muss. Nachdem mit bewusst anhaftenden Stoffen eine Reihe von Geckofüßen verdreckt wurden, zeigte sich, daß diese bereits nach wenigen Schritten wieder gänzlich sauber waren. Man vermutet, dass dieser Selbstreinigungsmechanismus das Ergebnis eines energetischen Ungleichgewicht zwischen den wirkenden Haftkräften ist, da die Anziehungskraft zwischen den Setae und der aufgetragenen Verunreinigung deutlich geringer ist als die Anziehungskraft der

Haftoberfläche zur Verunreinigung. Die anhaftenden Schmutzstoffe bleiben folglich an der Oberfläche des Untergrundes haften, was wiederum nur an den nanoskalierten Strukturen der Setae liegen kann.

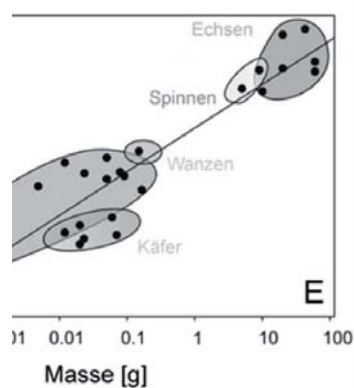


Abb. 3.5.10: Geckofüße mit Schmutzpartikeln

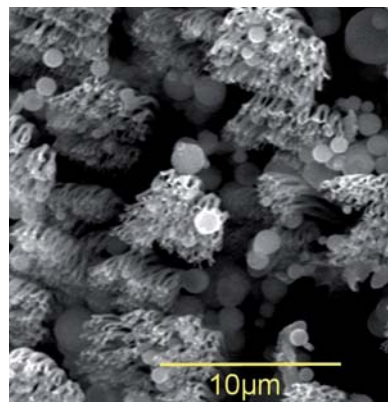


Abb. 3.5.11: Geckofüße ohne Schmutzpartikel

3.5.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Eine reversible Haftstruktur würde ein enormes Potential für die unterschiedlichen Bauweisen wie die Differential- oder Integrierende Bauweise darstellen, bei denen Bauteilkomponenten unterschiedlicher Werkstoffe gefügt werden. Die Vorteile dieser Bauweisen sind vor allem die hohe Rezyklierfähigkeit und die einfache Montage und Demontage der Komponenten. Der große Nachteil bei der Differentialbauweise ist die Krafteinleitung über die Verbindungselemente, bei der Integrierenden Bauweise die unzureichende Demontierbarkeit des Klebens oder Schweißens. Genau diese Nachteile könnten durch eine flächig wirkende reversible Verbindungstechnologie auf molekularer Ebene obsolet gemacht werden.

3.5.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Der Verbund moderner VSG-Glasverbundscheiben erfolgt entweder über Folien aus PVB (Polyvinylbutyl) oder entsprechend geeignetem Gießharz. Der Vorteil des VSG-Verbundes liegt darin, dass bei Glasbruch die einzelnen Bruchstücke auf der Folie bzw. an dem ausgehärteten Gießharz haften bleiben und somit nicht wahllos herunterfallen. Die Folie gewährleistet damit beim Versagen der Scheibe eine Resttragfähigkeit. Die ca. 0,4 mm dicke PVB-Folie ist ein weichmacherhaltige Polymer auf Basis von Polyvinylbutylharz und gilt als sehr gut haftend und reißfest bei gleichzeitig hoher Lichtbeständigkeit, Klarheit und bleibender Transparenz. Bei dem zweistufigen Herstellungsverfahren von VSG wird zuerst ein Vorverbund im Walz- oder Vakuumverfahren hergestellt. Der endgültige Verbund zwischen der Glasscheibe und der Folie erfolgt dann unter Druck und Hitze im Autoklaven, wobei die eingeschlossene Restluft hier evakuiert und der Haftungsaufbau vervollständigt wird.

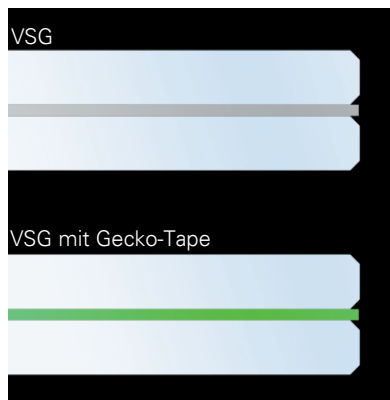


Abb. 3.5.12: VSG- und GeckoTape Scheibe

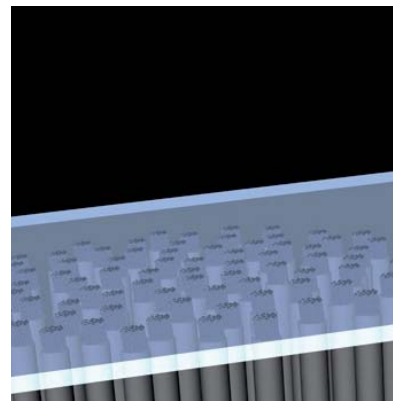


Abb. 3.5.13: Glasscheibe und GeckoTape Setae

Leider ist dieses Verfahren nicht frei von Problemen, so besteht bereits beim Vorverbund die Gefahr, dass der Folienverbund von Flüssigkeiten unterlaufen und da-

mit nachhaltig zerstört werden kann. Eine präzise Temperaturführung im Autoklaven beeinflusst ebenfalls die Qualität des VSG entscheidend, denn ist die Temperatur zu hoch entstehen oftmals ungewünschte Verfärbungen und ist die Temperatur zu niedrig gibt es keinen optimalen Haftverbund der beiden Scheiben. Zudem beschränkt die Größe des Autoklaven die maximal zu erzeugende Endglasscheibengröße. Da beim Eindringen von Feuchtigkeit an den Kanten des VSG die Möglichkeit der Verfärbung und des Ablösens vom Glas entsteht, müssen die Ränder ähnlich wie beim Isolierglas in einem Glasfalz liegen, der einen Dampfdruckausgleich ermöglicht. Weiter einschränkende Faktoren Temperatursteigerungen und das Kriechverhalten der Folie können die Verbundwirkung ebenfalls reduzieren. Für alle Sicherheitsgläser gilt, dass aufgrund der Erhitzung bzw. Verklebung bei der Herstellung eine nachträgliche Korrektur und Bearbeitung nicht mehr möglich ist. Würde man nun die unter Druck und Hitze erzeugte PVB-Verbindung durch ein transparentes Gecko-Tape ersetzen, wären mehrere der im Vorfeld angesprochenen Schwierigkeiten obsolet:

- problemlose Nachbearbeitung durch Ablösen des Verbundes
- keine Größenbeschränkung durch Autoklaven
- diffusionsoffene Verbindung in Längsrichtung
- resistent gegen Wasser
- keine Glasfalznotwendigkeit
- wesentlich kürzere Produktionszeiten

Der aufwendige und temperaturabhängige Verbund könnte durch einen einfacheren Klebeverbund ersetzt werden, welcher sogar noch vor Ort an der Baustelle denkbar wäre. Die Möglichkeit der Einbettung von Zwischenschichten wie zB. Photovoltaikmodule, thermotrope - oder thermochrome Schichten oder die Ausbildung als Wärme-, Sonnen- oder Brandschutzglas sind mit Gecko-Tape weiterhin möglich. Darüber hinaus könnte die Produktionszeit durch den Einsatz einer solchen Verbindungstechnologie deutlich verkürzt werden, wobei natürlich vorab geklärt werden müsste, wie man das künstliche Tape seriell herstellt und dabei Eigenschaften wie Transparenz, Farbechtheit, Lichtbeständigkeit oder minimales Kriechverhalten des Kunststoffes gewährleistet.

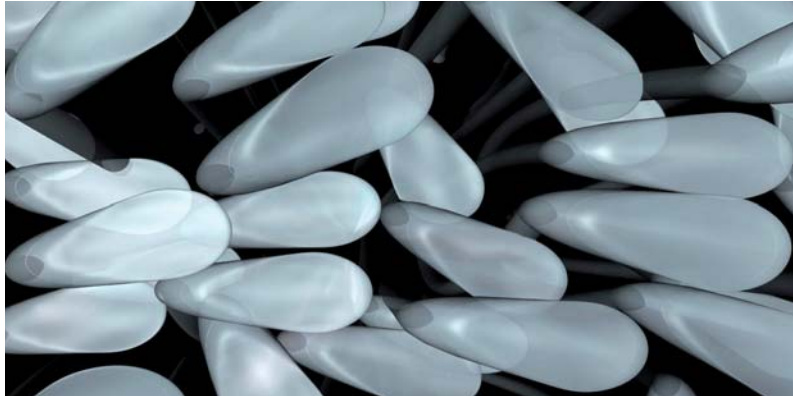


Abb. 3.5.14: 3D-Modell Visualisierung einer Setae Anhäufung von oben

3.5.7 Resümee

Zwar liegen die winzigen Setae von ihrer Dimension her noch außerhalb des technisch Machbaren, dennoch gibt es zahlreiche Ideen und Versuchsmodelle zur Umsetzung dieser molekularen Haftverbindung. Das Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart hat mit dem „Verfahren zur Herstellung mikrostrukturierter Oberflächen mit gesteigerter Adhäsion“ eine solche nanostrukturierte Oberfläche patentrechtlich gesichert. In der Praxis wird zur Zeit mit Hochdruck an einem sogenannten „Gecko-Tape“ gearbeitet, das folgende Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen hat:

- spurenlose rückstandsfreie Entfernung
- selbstreinigende Oberflächen
- kein Haftpartner notwendig
- verfilzungsfrei

Die künstliche Setae werden aus Polyamid hergestellt, wobei dazu winzige Aluminiumscheiben auf Polyamid-Unterlagen aufgebracht werden und mittels einem Ätzprozess ausgewaschen werden. Das Ergebnis dieses relativ einfachen Vorgangs

ist ein hauchdünner Polyamid-Film, der lediglich an den Stellen der schützenden Aluscheibchen bis zu 2 Mikrometer lange und einige zehntel Mikrometer feine, biegsame „Polyamid-Härchen“ enthält. Dieses Material kann pro cm² jedoch lediglich eine Masse von ca. 300 gr tragen, was einem in etwa einem Drittel der Haftkraft des natürlichen Vorbildes entspricht. Eine andere Forschergruppe hat mittels künstlichen Fasern aus Polyester und Silikon-Gummi (Polydimethylsiloxan) eine vergleichbares Material hergestellt. Erstaunlich ist jedoch, daß sich trotz der so unterschiedlichen Materialien so gut wie keine Unterschiede in der Adhäsion ergaben, ein eindeutiger Beweis dafür, daß nicht die chemische Zusammensetzung eine Rolle spielt, sondern allein die Geometrie der Härchenentscheidend ist.

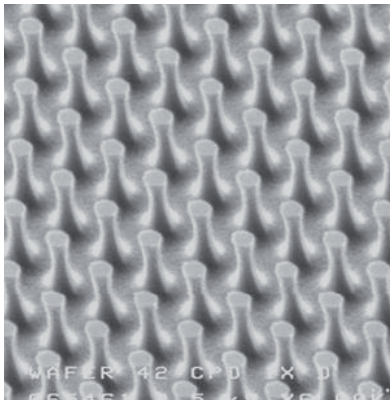


Abb. 3.5.15: Künstlich hergestellte Setae

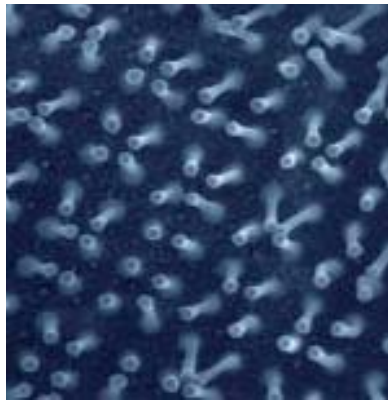


Abb. 3.5.16: Gecko-Tape

Das vor der Serienreife stehende Gecko-Tape könnte demnach sämtliche Saugverbindungen oder Magnet- und Klettverbindungen ersetzen und vor allem Einsatzbereiche wie z.B. das Weltall erobern, da es auch in der Schwerelosigkeit funktioniert. Die Pflaster-, Windel- und Klebstoffindustrie hat schon konkretes Interesse an diesem neuen Superklebstoff bekundet. Weltweit sind augenblicklich 4 Forschergruppen im Wettlauf um den neuen Klebstoff, ein erstes Nanoklebeband wird es allerdings erst in ein paar Jahre käuflich zu erwerben geben. Eine Umsetzung „Reversibler Haftstrukturen“ ist also nur ein Frage der Zeit. Dies liegt vor allem dar-

an, daß es bei den Versuchsreihen und Testmodellen immer wieder zu Problemen kam. Denn gestaltet man die Härchen für eine hohe Adhäsionsleistung zu fein, reißen sie beim Ablösen, da noch völlig unklar ist wie sich die Elastizität in einem einzelnen Härchen verhält. Die Originale haben nämlich eine graduelle Elastizität, denn die Setae sind von der Spitze bis zum Schaft hin unterschiedlich. Ein weiteres Problem bei der Herstellung mehrerer Setaereihen neben- und hintereinander ist das Verkleben der künstlich hergestellten Setae untereinander.

3.6 Permeable Struktur

3.6.1 Inspiration

Die Schale der Schmeissfliegen Eier sind zugleich permeabel für eindringenden Sauerstoff und ausströmendes Kohlendioxid und resistent gegen eindringende Feuchtigkeit. Diese gegensätzlichen Eigenschaften löst die Schmeissfliege durch eine besonders ausgeklügelte chitinöse Mehrschalenstruktur, die es dem heranwachsenden Fliegengewebe ermöglicht auf, im oder sogar unter dem Wasser zu atmen. Darüber hinaus ist sie in der Lage ihren Wärmehaushalt mittels der Hüllstruktur zu regulieren, eine Eigenschaften, die sie direkt interessant für neuartige Ansätze moderner Hüllstrukturen macht.



Abb. 3.6.1: Schmeissfliege (*calliphoridae*)

3.6.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Überabteilung	Gewebetiere	<i>eumetazoa</i>
Abteilung	Sechsfüßer	<i>hexapoda</i>
Klasse	Insekten	<i>insecta</i>
Ordnung	Zweiflügler	<i>diptera</i>
Familie	Fliegen	<i>brachycera</i>

Abb. 3.6.2: Biologische Klassifizierung der Schmeißfliege

3.6.3 Allgemeine Beschreibung

Die Schmeißfliegen (*calliphoridae*) gehören zur Familie der Fliegen (*brachycera*), von denen es weltweit ca. 1000 verschiedene Arten gibt, 45 davon sind in Deutschland vertreten. Die Größe der Tiere ist unterschiedlich und variiert sehr stark, wobei die Totenfliege (*cynomyia mortuorum*), als größte Vertreterin ihrer Art bis zu achtzehn Millimeter Körpergröße erreichen kann. Die Fliegen besitzen einen kompakten, metallisch blauen bis grün-gold glänzenden Körper und ihre Flügel und Augen sind sehr gut ausgebildet. Der Name der Schmeißfliege gründet sich auf der Vorliebe der Tiere für geruchsintensive, organische Stoffe. Das Wort „schmeißen“ ist hierbei ein veralteter Begriff für „Kot auswerfen“. Wie bei vielen Fliegen sind die Geschmacksorgane der Schmeißfliegen an den Fußgliedern zu finden. Zur Aufnahme der Blütensäfte fliegen sie vor allem nach Aas riechende Blüten und Pilze an.

3.6.4 Phänomenologische Betrachtung

Nach der Paarung legt das Schmeißfliegenweibchen ihre Eier an einem Eiweißreichen Platz ab, insgesamt etwa 200 bis 250 Eier in Paketen von 20 bis 25 Stück. Sobald die Made genug Wärme gespeichert hat, schlüpft sie aus ihrem Konkon aus. Zwischen dem Ablegen und dem Ausschlüpfen muss das Ei frei atmen können, vor Wasser geschützt werden und in der Lage sein auch Wärme aufnehmen zu können.

Die Eier der Schmeißfliegen sind daher gaspermeabel um die Atmung des Gewebes der Fliegenlarve im Innern des Eies schon zu Beginn der Entwicklung zu gewährleisten. Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff können mittels passivem Transport durch die Eihaut diffundieren, während die Hülle des Eies wasserabweisend ist, um die Larven vor Tropfwasser zu schützen. Die Strukturen spezieller Insekteneischalen sind sogar auf der Wasseroberfläche überlebens- und atmungsfähig, wobei kein Wassertropfen in ihr Inneres gelangt.



Abb. 3.6.3: Ansammlung mehrerer Schmeißfliegenier

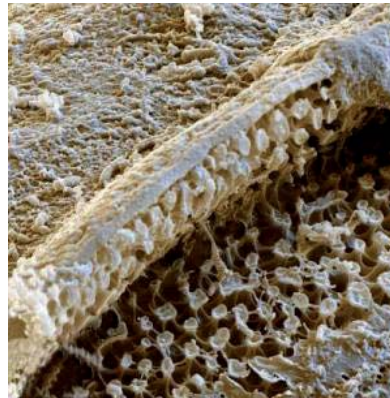


Abb. 3.6.4: Oberflächenstruktur einer aufgebrochenen Eischale

Diese gegensätzlichen Anforderungen an die Fliegeneischale werden durch einen speziellen Aufbau mit verschiedenen Schichten geleistet. Die Struktur besteht aus einer breiten mittleren Schicht von chitinösen pfeilerartigen Gebilden, die sich nach außen und innen hin stark verzügen und nach innen hin auch mehrwegig verzweigen. An den Oberflächen der Innen- und Außenschicht entsteht so eine chitinoöse Haut, die von eckigen trapezförmigen Löchern perforiert ist. Zwischen den beiden Oberflächen und den basalen breiten Pfeilern entstehen zusammenhängende Hohlräume. So gehört die Konstruktion der Fliegeneischale zu einer speziellen Art chitinöser Leichtbauweise, die im Gegensatz zu anderen Insektenkonstruktionen wie z.B. den Panzerstrukturen, die besonders durch ihre Härte auffallen, gänzlich ande-

re Funktionen übernehmen kann. Die Eier der kleinen Stubenfliege (*fannia canicularis*) z.B. besitzen lappenförmige Anhänge, die nicht nur das Schwimmen der Eier auf flüssigen Medien ermöglichen, sondern die Eier auch bei Trockenheit umhüllen und sie so vor Austrocknung schützen.



Abb. 3.6.5: Aufgebrochene Schmeissfliegenegenschale



Abb. 3.6.6: Schmeissfliegenegenschale im Detail

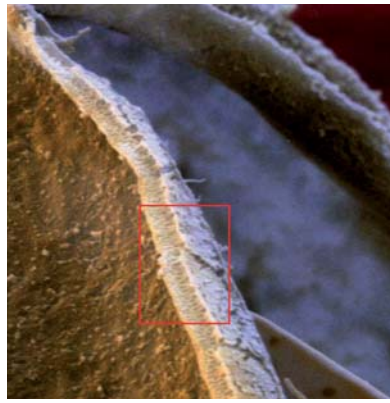


Abb. 3.6.7: Schmeissfliegenegenschale

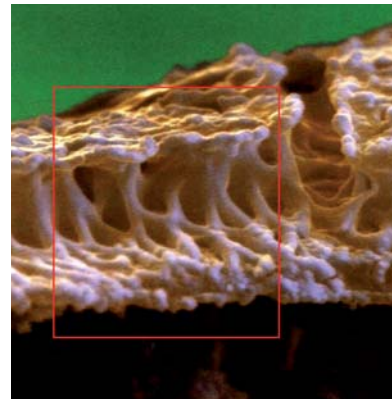


Abb. 3.6.8: Schmeissfliegenegenschale als Nahaufnahme

3.6.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Die Struktur der Fliegeneischale stellt eine besondere Lösungsvariante für permeable atmungsaktive und dennoch wärmespeichernde Hüllsystem dar. Wasserabweisende aber dennoch atmungsaktive und diffusionsoffene Materialien, wie z.B. Membrane oder Textilien, sind schon seit mehreren Jahren im Zentrum unterschiedlicher Forschungsansätze, führen sie doch zu neuartigen Wegen über moderne Gebäudehüllen nachzudenken. Entscheidend sind hierbei meist zwei Fragen auf die die Fliegeneischale u.U. eine über Jahrmlionen evolutionierte Antwort liefern könnte. Zum einen gilt es zu lösen, wie die Schale Wärmeenergie aus dem vorbeiströmenden Gas extrahiert und zum anderen wie groß die Poren für einen ausreichenden Gastaustausch eigentlich sein müssen. Hintergrund dieser Überlegungen für neuartige Gebäudehüllen ist in jedem Fall die Konditionierung der Außen- und Innenklimata an Ort und Stelle, also in der Hüllstruktur, zu leisten, damit möglichst wenige zusätzliche technische Komponenten in zentraler oder semizentraler Aufstellung benötigt werden. Ergo eine atmende, wärmetauschende Hüllkonstruktion, die nur ein Minimum an Nachfolgetechnik notwendig macht.



Abb. 3.6.9: Modellstudie

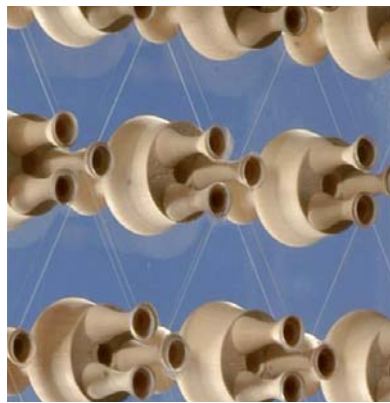


Abb. 3.6.10: Modellstudie als Nahaufnahme

3.6.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Die Grundidee ist die Entwicklung eines porigen Fassadelements mit atmungsaktiven und wasserabweisenden Eigenschaften analog der Wirkungsweise der Fliegeneischale. Die Fassade soll dazu, in Anlehnung an den Aufbau und die Struktur der Fliegeneischale, besonders leicht, kompostierbar und selbsttragend sein.

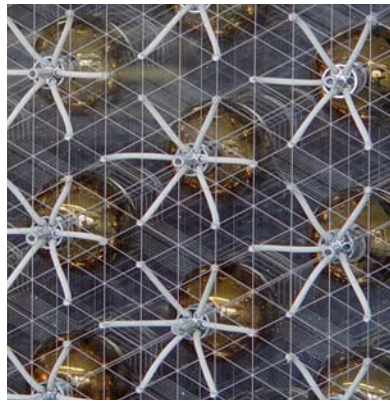


Abb. 3.6.11: Versuchsmodellstudie als Nahaufnahme



Abb. 3.6.12: Versuchsmodellstudie in der Übersicht



Abb. 3.6.13: Systematischer Aufbau des Versuchsmodells

In der Abb. 3.6.14 ist ein schematischer Aufbau eines Porenschnittes dargestellt, der die Wirkungsweise der Permeabilität und der wärmetauschenden Fähigkeit der Fleigeneischale visualisiert.

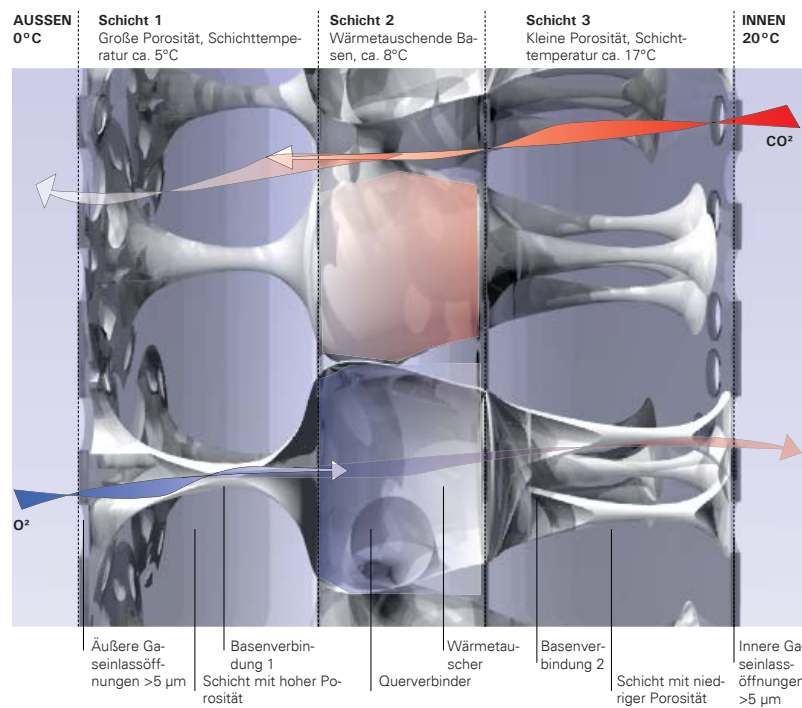


Abb. 3.6.14: Darstellung der Funktionsweisen einer exemplarischen Dezentralen Flächenlüftung

Beim Fliegen wirkt das Chitin ähnlich wie z.B. moderne PCM-Materialien mit einer verzögerten Wärmeleitung und -abgabe. Das bedeutet, daß, z.B. im Winter, aus dem Innenbereich herausströmendes Kohlendioxid seine Wärmeenergie an die breitbasigen Pfeiler abgibt und durch die ca. 5 µm großen Öffnungen in der Ober- und Unterschicht entweichen kann. Die Porengröße vom 5 µm entspricht der größt-

möglichen Öffnung für ein- und auströmende Gase ohne den Eintritt von Wassertropfen zu riskieren. Dafür ist auch die ovale rautenförmige Lochausbildung sinnvoll eingesetzt, da diese ebenso effektiv den Wassereintritt verhindert. Diese Energie kann an neu einströmenden Sauerstoff im gleichen Verfahren wieder abgegeben werden, so daß die innen ankommende Frischluft nicht die gleiche Temperatur hat, wie die Außenluft. Mittels gezielter spezifischer Lichtlenkung und Lichtführung auf die basenartigen PCM-Behälter im Mittelbereich der Schichten könnte eine direkte solare Nacherwärmung erfolgen. Ideal wäre dann ein Element, das noch ca. 4-5 Stunden nach den Sonnenuntergang frische und angewärmte Luft einfließen lassen würde. Im Sommer wird dieser Vorgang umgedreht, wobei ein Großteil der Sonneneinstrahlung durch die Geometrie der basenartigen Pfeiler mit der 1. Reflexion zurückgeworfen wird und so der direkte Wärmeeintrag per se minimiert wird.

3.6.7 Resümee

Um die genaue Wirkungsweise der Permeabilität der Fliegeneinschale einschätzen zu können, müssten vorrangig Versuche zur Bestimmung der Energieaufnahme der chitinösen Struktur durch die vorbeiströmenden Gase unternommen werden, da-

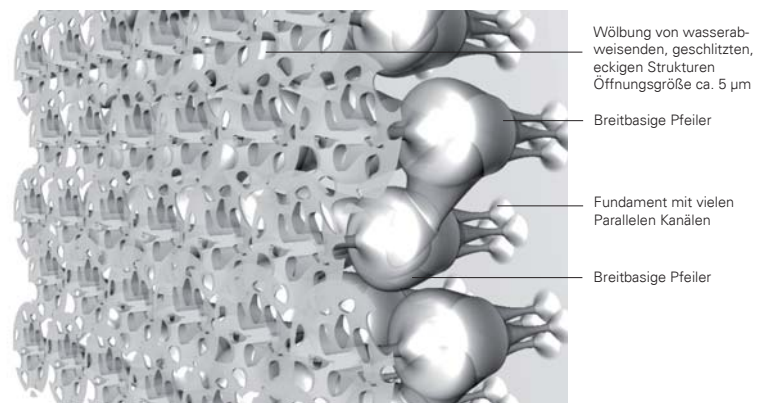


Abb. 3.6.15: Schematische Übersicht

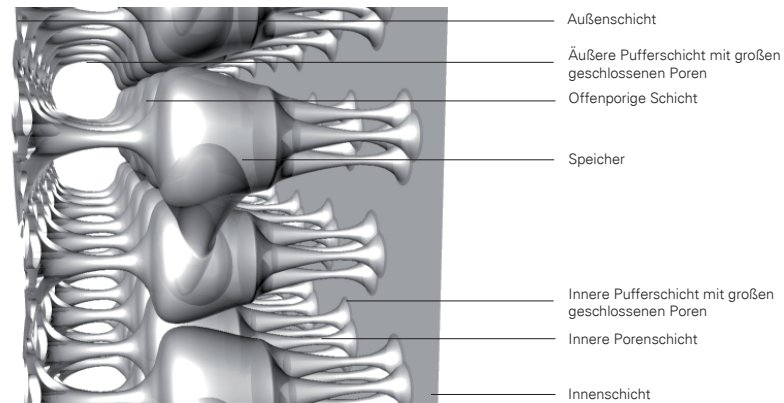


Abb. 3.6.16: Innenansicht des struktureller Aufbau der Fliegeneischale

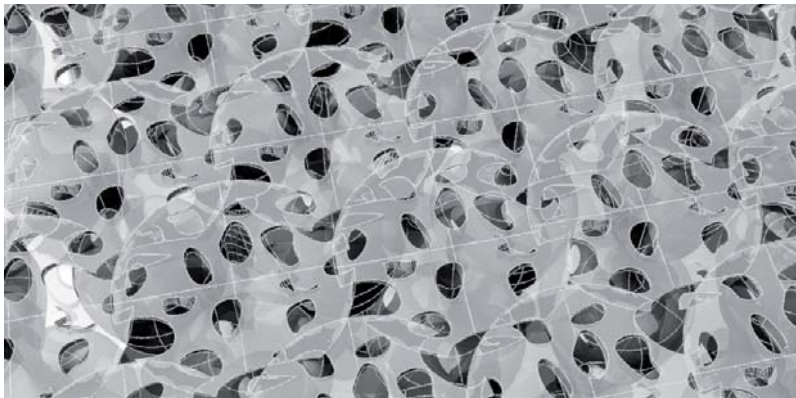


Abb. 3.6.17: Wasserabweisende, geschlitzte, eckige Struktur der Oberfläche, Öffnungsgröße ca. 5 µm

mit eine Aussage über den Temperaturverlauf gemacht werden kann. Dazu müsste ebenso ermittelt werden, welches Maß an Gasvolumen das Gewebe und später die Puppe benötigen, um innerhalb dieser Hülle lebensfähig zu bleiben. Festzuhalten gilt jedoch, daß die vorliegende Struktur mit permeablen und zugleich wasserabweisenden Eigenschaften einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung neuartiger Hüllstrukturen liefern könnte.

4.0 Funktionen

Der Abgleich der vorliegenden Rechercheergebnisse mit den Anforderungen aus Teil 2 ergab, daß die 8 weiter unten aufgeführten Funktionen selektiert werden sollten und als mögliche Ansätze neuartiger Gebäudehüllfunktionen untersucht werden. Das Selektionsdiagramm zeigt in der Übersicht die drei Kategorien Material, Struktur und Funktion und die jeweiligen Exponate im grauen Kreis.

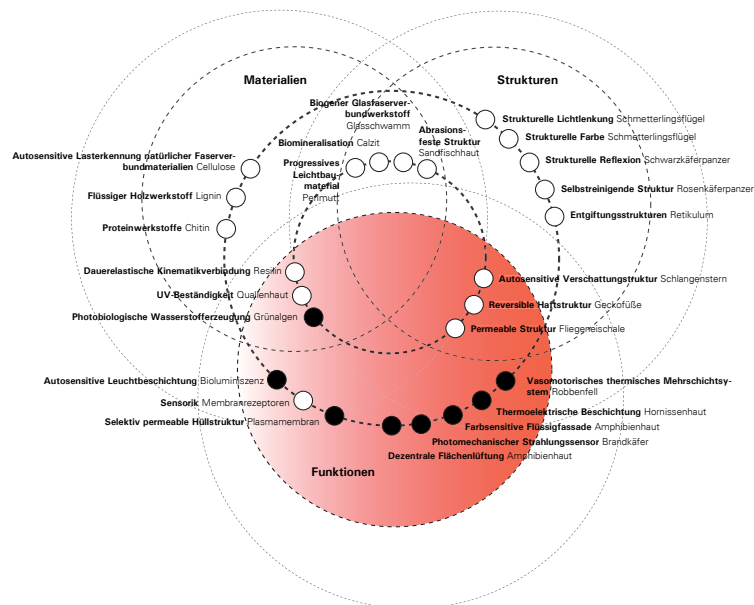


Abb. 4.0.1: Selektionsdiagramm in drei Kategorien Material, Struktur und Funktion

Zum besseren Verständnis und als zusammenfassende Übersicht werden hier die Inspirationsgrundlagen der einzelnen natürlichen Phänomene mit ihren projizierten Anwendungen aufgelistet.

4.1 Thermoelektrische Beschichtung

Die Hornissenhaut besitzt besondere Photorezeptoren. Sie sind mit einer dünnen Hautschicht überzogen, die den elektrischen Widerstand je nach Lichtverhältnissen und Umgebungstemperatur regulieren kann. Diese Funktion macht die Haut zu einer Art organischem Halbleiter ähnlich einer Thermoelektrischen Beschichtung. Die Energie kann in Form einer „photovoltaischen Zelle“ gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder in Form von Wärme abgegeben werden. Forscher sind davon überzeugt, daß in einigen Jahrzehnten biologische Solarzellen nach dem Prinzip der Hornissenhaut die photovoltaischen Solarzellen revolutionieren könnten.

4.2 Photobiologische Wasserstofffassade

Die enormen Entwicklungsschritte im Bereich der Photobiologischen Wasserstoff-ferzeugung mittels spezieller Grünalgen könnte zur Entwicklung einer Photobiologischen Wasserstofffassade führen, die als integrierte oder vorgehängte Struktur in der Lage ist durch Sonneneinstrahlung Energie in Form von Wasserstoff zu erzeugen, der mittels einer integrierten Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt wird. Dies könnte zu einer hochinteressanten energetischen Alternative zu bekannten Systemen wie Photovoltaik- oder Vakuumröhrenkollektoren führen, da die Energieausbeute des produzierten Wasserstoffes in Kombination mit modernen Brennstoffzellen wesentlich höher ist. Die Applikation auf moderne Gebäudehüllen bedeutet auch in gestalterischer Hinsicht neue Möglichkeiten, da bei gleicher Energieausbeute wesentlich weniger Fläche benötigt wird.

4.3 Farbsensitive Flüssigfassade

Amphibien wie z.B. die Kopffüßer oder Fische wie z.B. bestimmte Schollenarten können ihre Außenfarbe durch Zu- und Abnahme pigmenthaltiger Zellen oder durch schnelle Pigmentbewegungen innerhalb der Zelle verändern. Die Pigmente (*Chromatophoren*) werden dabei über die Nervensignale der Augen, der Haut oder durch hormonelle Signale gesteuert, wobei sie grundsätzlich alle auf Licht- und Tempe-

raturänderungen reagieren. Dieses Phänomen könnte zur Entwicklung einer Farbsensitiven Flüssigfassade führen, die, analog der Amphibienhaut, je nach Lichtintensität, Außen- und Oberflächentemperatur die farbige Oberfläche und die damit verbundenen Eigenschaften ermitteln, steuern und anpassen kann.

4.4 Dezentrale Flächenlüftung

Bei Amphibien wie z.B. Fröschen und Lurchen oder bei Fischen wie z.B. Schollen oder Katzenhaien, kommen, je nach Alter, Umgebungsbedingungen oder Jahreszeit unterschiedliche Atmungssysteme zum Einsatz. Z.B. atmen junge Frösche vorerst mit der Kiemenatmung und wechseln dann zur zentral gesteuerte Lungenatmung je älter sie werden. Befinden die Frösche sich dann im Sommer an Land, atmen sie primär mit der zentralen Lunge, wobei sie im Winter oder unter Wasser ihre dezentral gesteuerte Hautatmung benutzen. Diese Funktionsweise könnte zu einer Dezentralen Flächenlüftung in Gebäudefassaden führen, die als integriertes Belüftungssystem mittels sensorischer Leistung den Frischluftbedarf ermittelt und über ein Trägermedium Sauerstoff und Kohlendioxid in die Fläche transportiert.

4.5 Selektiv permeable Hüllstruktur

Biomembranen dienen der Transportvermittlung, regulieren das Fließgleichgewicht zwischen Zellkompartimenten und sind damit essentiell für den Stoffwechsel verantwortlich. Biomembranen sind semipermeabel (selektiv permeabel) und nur für kleine Moleküle frei durchlässig. Diese Moleküle können auf Grund von Unregelmäßigkeiten in der Lipid-Doppelschicht durch die Membran diffundieren. Da größere Moleküle wie Glucose oder Aminosäuren aber nur schwer die Membran passieren können, sind Transportmechanismen für eine erleichterte Aufnahme oder zum Aufbau eines Konzentrationsgradienten als Kurzzeit-Energiespeicher notwendig. Dieser Vorgang erfolgt dabei als passiver oder aktiver Transport und könnte zur Entwicklung einer Selektiv permeablen Hüllstruktur führen, die für unterschiedliche Moleküle mittels aktivem oder passivem Transport verschiedene Transportkonzepte zwischen dem Innen- und dem Außenraumes eines Gebäudes ausbildet.

Dabei erfolgt der Austausch meist ohne den Einsatz zusätzlicher Energie ergo ohne Einsatz von Haustechnischen Geräten. Diese filternden und atmenden Hüllstrukturen könnten die Leistungsfähigkeit moderner Gebäudehüllen u.U. mit völlig neuen Ansätzen erweitern.

4.6 Autosensitive Leuchtbeschichtung

Die Fähigkeit verschiedener Lebewesen eigenständig oder mit Hilfe von Symbionten kaltes Licht zu emittieren, wird Biolumineszenz genannt. Erzeugt wird das kalte Licht durch die chemische Reaktion der Luziferase, die bei einem speziellen Stoffwechsel ausgelöst wird. Weltweit wird intensiv an der Übertragung des Lumineszenzvorganges für unterschiedliche Anwendungen wie z.B. als genetischer Reporter, als Toxizitätsnachweis von Gewässern und zur Überprüfung von Stoffwechselprozessen in der Medizin geforscht. Als völlig risikoarme Markierungsmethode innerhalb der Molekulartechnologie, wird sie als heißer Favorit zur Ablösung der radioaktiven Markierung gehandelt. Diese Wirkungsweise könnte in der Architektur zu einer Art Autosensitiver Leuchtbeschichtung führen, die als kaltlichtemittierende Bauteilkomponente durch sensorische Fähigkeiten z.B. vorhandene Temperaturschwankungen, den Ozongehalt der Luft oder den UV-Gehalt des einfallenden Lichtes messen kann. Dies würde neben dem technischen Vorteil u.U. auch zu völlig neuen Fassadenerscheinungen führen, Fassaden, die ihre Farbe am Tag und in den Abendzeiten je nach Kondition der Umgebung einstellen könnten.

4.7 Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem

In der Natur finden wir immer wieder erstaunliche Lösungsansätze für Problembereiche, denen wir uns bei der Beschäftigung mit Gebäudehüllen ebenso stellen müssen. Ein besonders effizientes Hüllensystem stellt dabei die Haut, oder besser die Zusammensetzung aus mehreren Schichten zu einem Fell, verschiedener Robbenarten dar, die unter extremsten Bedingungen nicht nur unterschiedliche Körpervolumen ausbilden können, sondern durch einen intelligenten Einsatz von Energie wandlung einen nahezu unwirklichen Lebensraum bewohnen können. Sie verfügen

über eine Art Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem. Dieses *Rete Mirabile*, oder auch Wundernetz genannte, Wärmeaustauschsystem ist in Kombination mit einer variierenden Wärmedämmschicht und der fellartigen Struktur der Haut eine ausgezeichnetes thermoregulierendes Mehrschichtsystem, das die wesentlichen Faktoren wie Wärmestrahlung, Wärmeleitung (Konduktion) und Verdunstung (Transpiration) bestimmt.

4.8 Photomechanischer Strahlungssensor

Die Kiefernprachtkäfer *melanophila acuminata* verfügen über spektakuläre photomechanische Infrarotsensoren. Die Käfer paaren sich in der Nähe von Waldbränden und legen ihre Larven in der Rinde von frisch verbrannten Baumstämmen ab, um ihnen das Aufwachsen an einem von potentiellen Feinden vermiedenen Ort zu ermöglichen. Daher sind Waldbrände für ihre Fortpflanzung unabdinglich und sie sind ständig auf der Suche nach neuen Brandstellen. Ihr in den Körper integrierter Mechanorezeptor wird von einer Chitinklammer umfasst, die sich bei Brandbedingeter Infrarotstrahlung ausdehnt und den Rezeptor erregt. Dieser sendet Signale an den Käfer, der dadurch Brände in mind. 20 km Entfernung lokalisieren kann. Um Waldbrände frühzeitig erkennen zu können, haben Bonner Forscher bereits einen Infrarotsensiblen Prototyp im Testbetrieb. In Fassaden integriert könnte ein photomechanischer Strahlungssensor auf Wärme oder Strahlung reagieren, um Mechanismen zum Strahlungs- und Wärmeschutz auszulösen.

4.1 Thermoelektrische Beschichtung

4.1.1 Inspiration

Die Hornissenhaut besitzt besondere Photorezeptoren. Sie sind mit einer dünnen Hautschicht überzogen, die den elektrischen Widerstand je nach Lichtverhältnissen und Umgebungstemperatur regulieren kann. Diese Funktion macht die Haut zu einer Art organischem Halbleiter ähnlich einer Thermoelektrischen Beschichtung. Die Energie kann in Form einer „photovoltaischen Zelle“ gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder in Form von Wärme abgegeben werden. Forscher sind davon überzeugt, daß in einigen Jahrzehnten biologische Solarzellen nach dem Prinzip der Hornissenhaut die photovoltaischen Solarzellen revolutionieren könnten.



Abb. 4.1.1: Orientalische Hornisse (*Vespa orientalis*)

Für die Architektur könnte diese Entwicklung bedeuten, die gestalterischen Nachteile und den hohen energetischen Aufwand bei der Herstellung herkömmlicher PV-Systeme, durch Einsatz einer photovoltaischen Kutikula in Form transparenter, hauchdünnen Folien zu ersetzen, die als Beschichtung nahezu unsichtbar Strom oder Wärme erzeugen könnten und biologisch abbaubar wären.

4.1.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Überabteilung	Gewebetiere	<i>eumetazoa</i>
Abteilung	Bilateria	<i>bilateria</i>
Klasse	Insekten	<i>insecta</i>
Ordnung	Hautflügler	<i>hymenoptera</i>
Familie	Faltenwespen	<i>vespidae</i>
Gattung	Hornissen	<i>vespa</i>

Abb. 4.1.2: Biologische Klassifizierung der Hornisse

4.1.3 Allgemeine Beschreibung

Die Orientalische Hornisse kann als einzige Hornissenart trockenes Wüstenklima vertragen. Das Vorkommen der Orientalischen Hornisse beschränkt sich dabei auf den mittleren Osten und das südliche Europa. Sie nistet sehr häufig im Boden oder in Mauerwerkshohlräumen. Während die Königin bis zu 35 mm groß werden kann, erreichen die Arbeiterinnen eine durchschnittliche Größe von 18 bis 25 mm. Drohnen erreichen eine Größe von 21 bis 28 mm. Weltweit sind bis heute in unterschiedlichen geografischen Zonen zehn Farbvariationen dieser Hornissenart beschrieben worden.

Der Lebenszyklus einer Hornisse beträgt einen Sommer. Nur die befruchteten Jungköniginnen überwintern. Bei Larven ist die Unterteilung des Körpers oft noch unvollständig, bei erwachsenen Tieren gliedert sich der Insektenkörper deutlich in drei große Teile: Kopf (*caput*), Brust (*thorax*) und Hinterleib (*abdomen*). Insekten atmen mit Hilfe eines verzweigten sogenannten „trachealen Röhrensystems“, das den ganzen Körper durchzieht. Die Atemöffnungen dieses extrem komplexen Luftsystems befinden sich seitlich am Hinterleib und werden Stigmen genannt.

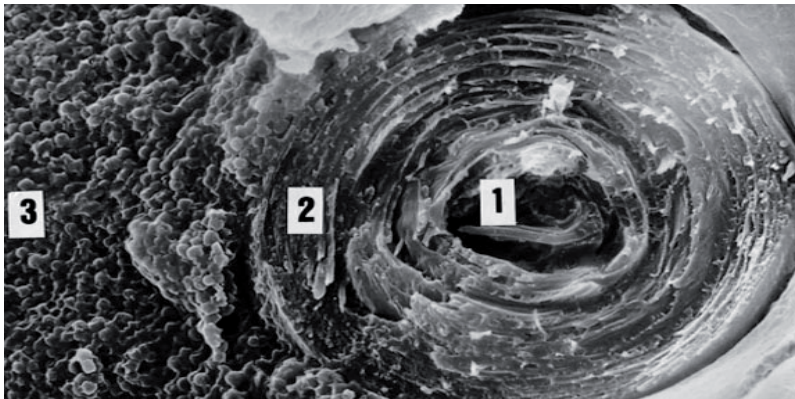


Abb. 4.1.3: Horizontalschnitt durch einen Porenkanal

4.1.4 Phänomenologische Betrachtung

Die orientalische Hornisse verfügt aufgrund ihres Hautaufbaus über eine besondere Fähigkeit. Ihre Haut besitzt Photorezeptoren, die die umgebenden Lichtverhältnisse wahrnehmen können. Diese Rezeptoren sind mit einer sehr dünnen Hautschicht überzogen, die bei verschiedenen Lichtverhältnissen und in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur den elektrischen Widerstand regulieren kann. Dieses Phänomen macht die Haut zu einer Art organischem Halbleiter.

[Exkurs: Ein Halbleiter ist ein Stoff, der bei Erwärmung eine mit der Temperatur anwachsende elektrische Leitfähigkeit zeigt.]

Versuche haben gezeigt, daß der Widerstand der Hornissenhaut mit abnehmenden Licht- und Temperaturverhältnissen zugenommen hat [CROITORU et al., 1978]. Die entstehende Energie kann dabei in Form einer sogenannten „photovoltaischen Zelle“ gespeichert werden [ISHAY & CROITORU, 1978]. Diese ist in der Lage die elektrischen Ströme in Wärme umzuwandeln. Die Hornisse verwendet die Wärme, um den Bewegungsapparat auf Betriebstemperatur zu bringen und die Brut oder sogar

das gesamte Nest zu erwärmen. Bei Sonnenschein und optimalen Temperaturen zwischen 28 °C und 30 °C können die Hornissen Spannungen bis zu mehreren hundert Millivolt erzeugen. Diese grundlegende Eigenschaft der Hornissenhaut ist unabhängig vom Alter und der Pigmentierung der Hornissen.

Der Physiologe Jacob S. Ishay von der Sackler School of Medicine in Tel-Aviv, Israel, konnte nachweisen, daß man mit sechs „hintereinandergeschalteten“ toten Hornissen eine Digitaluhr betreiben kann [SHIMONY & ISHAY, 1984]. Daher ist der Forscher auch davon überzeugt, daß in einigen Jahrzehnten biologische Solarzellen nach dem Prinzip der Hornissenhaut die photovoltaischen Solarzellen revolutionieren könnten. Die Funktionsweise dieses sehr komplexen Systems beruht auf zwei Kreisläufen. Zum einem dem Luftkreislauf im trachealen Röhrensystem und zum anderen dem Stromkreislauf, der durch die Eigenschaften der Haut als Halbleiter wirkt und mittels der photovoltaischen Zelle die elektrische Energie speichert.

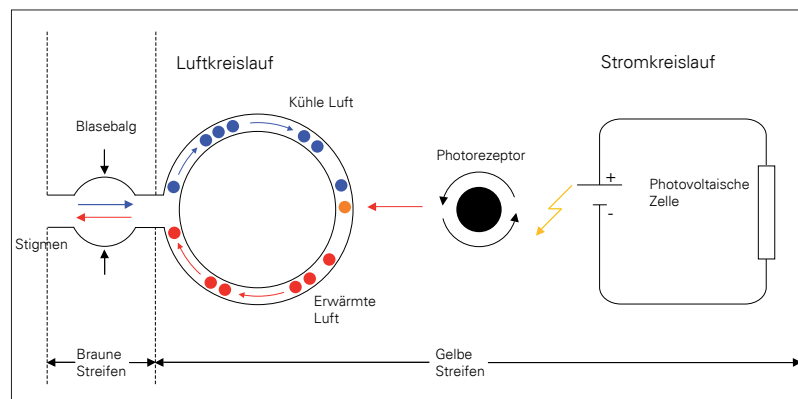


Abb. 4.1.4: Diagrammatische Darstellung des Luft- und Stromkreislaufes der Hornissenhaut

An dieser Grenze findet zwischen den Schichten (n-Elemente) des Stromkreislaufes und den Pigmentkörpern (p-Elemente) ein Ladungsaustausch statt, bei dem ein Teil der freien Elektronen in das Gebiet der p-Schicht diffundiert und dort mit freien Lö-

chern (p-Elemente) rekombiniert. Durch den Diffusionsprozeß baut sich am Übergang eine erhöhte Spannung auf. Im abgedunkelten Bereich des Photorezeptors wird die Spannung dann in Strom umgewandelt, welcher dort gespeichert oder in Wärmeenergie umgewandelt wird. Mit Hilfe einer Art von Blasebalg wird Luft in den Luftkreislauf hineingeblasen. Die Luft wird durch die über den Stromkreislauf entstandene Wärmeenergie erwärmt oder alternativ gekühlt und über den Luftkreislauf wieder nach außen geführt. Die orientalische Hornisse besitzt die Funktion der Stromgewinnung nach bisherigen Erkenntnissen ausschließlich, um die entstandene elektrische Energie in Wärmeenergie umzuwandeln. Bei näherer Betrachtung der beiden verschalteten Kreisläufe ergeben sich folgende Funktionsabläufe:

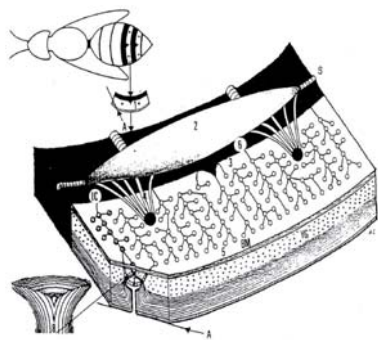


Abb. 4.1.5: Funktionsbelegung der braunen und gelben Streifen

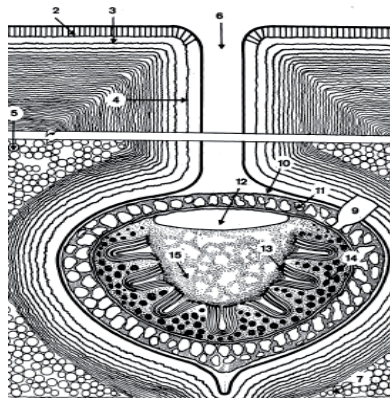


Abb. 4.1.6: Schnitt durch einen Porenkanal, Epikutikula [1], Exokutikula [2], Endokutikula [3,4], Gelbe Pigmente [5]m Porenkanal [6], Photorezeptor [12]

- Der Luftkreislauf:** Die Luftsäcke im Bereich der braunen Streifen des Hornisennitterleibes fungieren als ein Blasebalg, der die Luft über die Stigmen ansaugt und in die Trachealröhrchen hineindrückt. Das System ist dabei so ausgelegt, daß die Luft bis zum Fuß des Photorezeptors transportiert wird. Die sich verzweigenden Luftröhrchen des Trachealsystems wickeln sich dabei um die Basis der Photorezeptoren. Die Luft kühlt dabei den Photorezeptor und lei-

tet die dort entstandene Wärmeenergie ab. Die erwärmte oder auch gekühlte Luft bringt dann den Bewegungsapparat des Tieres auf die richtige Betriebstemperatur. Zusätzlich ist das Tier in der Lage diese konditionierte Luft an die Brut weiterzugeben oder in Gemeinschaft mit den anderen Arbeiterinnen zur Klimatisierung des gesamten Nestes einzusetzen [ISHAY & BARENHOIZ-PANIRY, 1995].

- **Der Stromkreislauf:** Der Stromkreislauf erfolgt über die Endokutikula. Diese innere Hautebene hat mehr als 30 transparenten Hautschichten, die zwischen $5\ \mu\text{m}$ und $0,2\ \mu\text{m}$ dick sind, und ist ringsum um den Hinterleib der Hornisse angeordnet. Die Gesamtdicke dieser Schicht liegt im Bereich zwischen $35\ \mu\text{m}$ und $40\ \mu\text{m}$. Der Hinterleib ist zudem konvex geformt und gewährleistet so jederzeit eine optimale Ausrichtung zur Sonne.

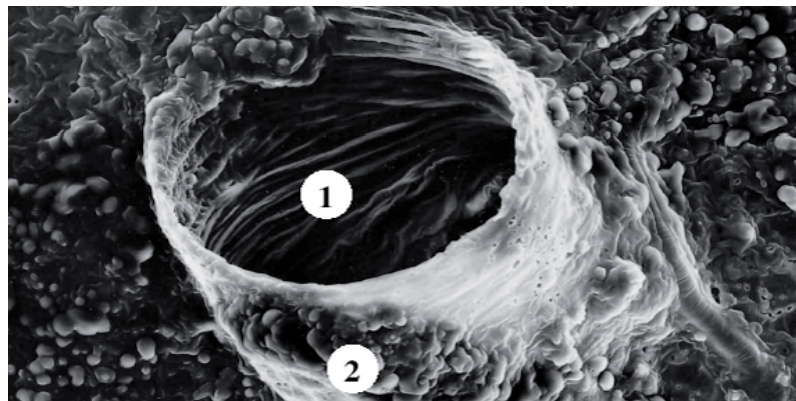


Abb. 4.1.7: Vergrößerung einer Trachealöffnung, Porenkanal [1], Umhüllung des Photorezeptors [2]

Jede einzelne dieser 30 Schichten wirkt dabei wie eine Solarzelle, wobei die große Anzahl der Schichten zu einer Leistungssteigerung des Gesamtsystems führt. Die gelben Pigmentkörner absorbieren mit Ausnahme der Wellenlänge des gelben Lichts, das reflektiert wird, das gesamte Lichtspektrum [ZIEGLER & HARMSEN,

1969). Die größte Effizienz des Systems liegt dabei zwischen 360 und 380 nm, also dem oberen Bereich der UV A-Strahlung des Lichtes. Diese Absorptionsfähigkeit schützt sowohl den Photorezeptor wie auch den gesamten Körper vor der Überhitzung durch kurzwellige Strahlung. Die hautartige Umhüllung der Photorezeptoren wirkt dabei kathodisch negativ-leitend, während die gelben Pigmentkörner anodisch positiv-leitend wirken. Die am sogenannten p/n-Übergang entstehende photovoltaische Spannung wird zu den Wänden des Porenkanals geleitet und dort in der photovoltaischen Zelle gespeichert. Von dort kann dann die Energie nach Bedarf in Form von Wärme abgegeben und dem Kreislaufsystem wieder zugeführt werden.

Farbton	Wellenlänge	Wellenfrequenz	Energie pro Photon
Violett	380 - 420 nm	789 - 714 THz	3,26 - 2,95 eV
Blau	420 - 490 nm	714 - 612 THz	2,95 - 2,53 eV
Grün	490 - 575 nm	612 - 522 THz	2,53 - 2,16 eV
Gelb	575 - 585 nm	522 - 513 THz	2,16 - 2,12 eV
Orange	585 - 650 nm	513 - 462 THz	2,12 - 1,91 eV
Rot	650 - 750 nm	462 - 400 THz	1,91 - 1,65 eV



Abb. 4.1.8: Spektralfarben mit Angabe des Energiegehaltes

4.1.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

In der Architektur werden Photovoltaikzellen in erster Linie als additive Aufdach- und Fassadenkonstruktionen umgesetzt. Die relativ hohen Kosten für ein Photovoltaiksystem amortisieren sich, begünstigt durch staatliche Förderprogramme und hohe Einspeisevergütungen, je nach Größe zwischen 12-15 Jahren. Von gestalterischer Brisanz ist bei diesen Systemen die starke optische Präsenz der Systeme, die den Entwurfsspielraum bezogen auf Formate und Farben stark einschränken. Auch in anderen Technologiebereichen wie der Luft- und Raumfahrt oder der Automobilindustrie werden Solarzellenkonzepte zur Energieversorgung benötigt. Dabei

geht es jedoch meistens um das Verhältnis des Gewichtes zur verwendeten Masse. Je weniger Gewicht beim Start anfällt, desto weniger Energie wird ergo benötigt, um den Transport in die Erdumlaufbahn zu befördern. Im Bereich der Verkehrs- und Transportindustrie wird ebenso mit Hochdruck an Solarautos und -flugzeugen geforscht., die bei minimalem Gewicht ein Maximum an Reichweite generieren sollen.

Führt man sich nun die gestalterischen Nachteile der zur Verfügung stehenden PV-Systeme unter architektonischen Aspekten vor Augen, könnte man mit Hilfe der phänomenologischen Betrachtung der photovoltaischen Kutikula der orientalischen Hornisse an eine Umsetzung in eine transparente, hauchdünne Folie denken, die als Beschichtung quasi unsichtbar Strom oder Wärme erzeugen können. Dabei wird diese Schicht durch ein ausgeklügeltes Luftsystem durchzogen, das die Anlage kühlen oder erwärmen kann. Diese Reproduktion des Prinzips der Hornissenhaut wäre im Vergleich zu herkömmlichen Systemen optisch unauffällig, aufgrund ihrer organischen Zusammensetzung möglicherweise biologisch abbaubar und in der Lage nicht nur Strom-, sondern auch Wärmeenergie zu gewinnen. Auch eine dezentrale Speicherung ist Teil dieses Prinzips.

4.1.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Ein Ansatz könnte also sein, eine hauchdünne transparente energieliefernde Schicht zu entwickeln, die ähnlich wie eine Beschichtung auf unterschiedliche Materialien auftragbar wäre. Eine Art „Thermoelektrische Beschichtung“ also, die in Verbindung mit textilen oder membranartigen Untertragstrukturen als eine Art „Energieschicht“ wirkt und die Strom- und Wärmeenergie liefert. Denkbar wäre eine Gesamtsystemschiicht mit ca. 40 µm Dicke, die analog zum Aufbau der Hornissenhaut, aus mehreren Einzelschichten besteht. Diese Schicht bildet Kavernen, in denen Photorezeptoren angebracht sind, die die Ladungsimpulse in Stromenergie umwandeln und dabei durch ein feinmaschiges luftdurchströmtes Röhrensystem gekühlt oder erwärmt werden. Der Schichtenaufbau von oben nach unten wäre, analog zum Aufbau der Hornissenhaut:

- Schicht 1 [S1]: Exokutikula, mit einer Dicke von ca. 5 μm
- Schicht 2 [S2]: Endokutikula, mehrere Schichten von ca. 1,5 μm - 0,2 μm
- Schicht 3 [S3]: Kavernen
- Schicht 4 [S4]: Hypokutikula, mit einer Dicke von ca. 10 μm
- Schicht 5 [S5]: Basismembran als Tragstruktur, Dicke ca. 10 μm
- Achsabstand der Porenkanäle, ca. 50 μm
- Oberer Durchmesser des Porenkanals, ca. 13 μm
- Kavernendurchmesser, ca. 25 μm

Die Abbildungen 4.1.9 bis 4.1.11 zeigen skizzenhaft eine mehrlagige Anordnung von unterschiedlichen Schichten.

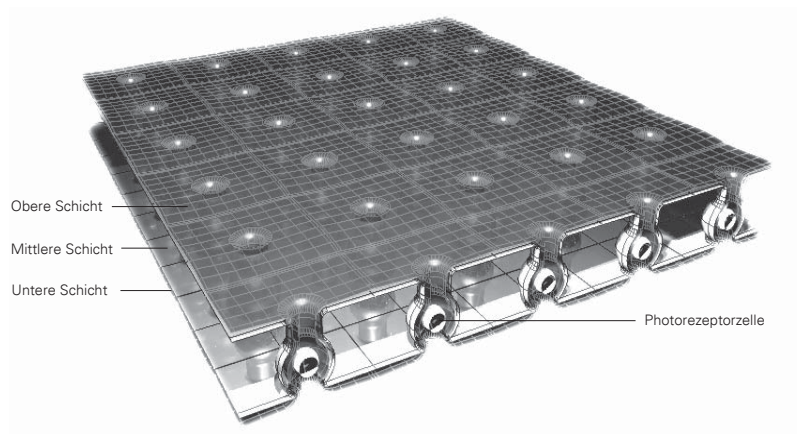


Abb. 4.1.9: Skizzenhafte Visualisierung einer Thermoelektrischen Beschichtung nach dem Vorbild der Hornissenhaut

Diese begrenzen einen oberen (1) und einen unteren Bereich (2). In der Mitte sind kanalartige Poren angeordnet, die eine Verdickung, eine Art Kaverne, bilden. Dort sitzt mittig eine Photorezeptorzelle, die Ladungsimpulse aus der Schichtenanordnung (1) in Energieformen wie Wärme oder Strom wandelt. Sowohl durch die Poren,

wie auch durch den Bereich (2) strömt Luft, die durch Konvektion Wärmeenergie abführt oder zugeht. Dies vor allem zur Leistungssteigerung der Photorezeptorfläche.

4.1.7 Resümee

Die Umsetzung einer solchen Thermoelektrischen Beschichtung erscheint in den nächsten Jahren noch nicht möglich, auch wenn der Israeli Ishay nachgewiesen hat, daß sich eindeutig Energie über dieses Hautsystem generieren läßt. Auch aktuelle Meldungen aus der Universität Ulm stimmen zuversichtlich, da dort flexible biologische Solarzellen entwickelt wurden, die allerdings noch ohne integrierte Be- und Entlüftung arbeiten. Weitere Probleme stellt die Skaligkeit dieses Ansatzes, da die anodisch und kathodisch Schichten extrem dünn sind und zudem in bis zu 50 Schichten übereinander liegen müssen, die nicht stärker als 40 µm sein sollten, damit der Ladungsaustausch stattfinden kann. Dennoch werden sich solche Systeme früher oder später durchsetzen, da sie auf biologischer Basis eine wesentliche bessere Primärenergiebilanz aufweisen wie Siliziumbasierte Vergleichsprodukte. Zudem ist eine integrierte Wärmeregulierung in das System integriert, die die Leistungsfähigkeit zusätzlich beeinflusst.

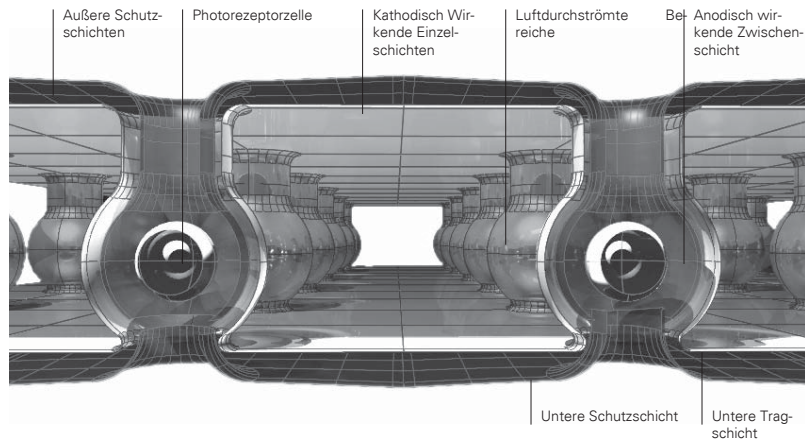


Abb. 4.1.11: Skizzenhafte Visualisierung einer Thermoelektrischen Beschichtung nach dem Vorbild der Hornissenhaut

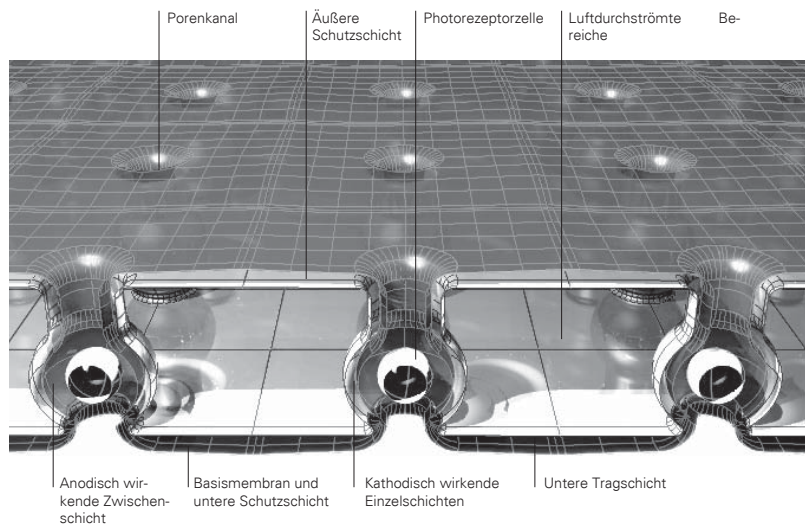


Abb. 4.1.10: Skizzenhafte Visualisierung einer Thermoelektrischen Beschichtung nach dem Vorbild der Hornissenhaut

4.2 Photobiologische Wasserstofffassade

4.2.1 Inspiration

Die enormen Entwicklungsschritte im Bereich der Photobiologischen Wasserstoffferzeugung mittels spezieller Grünalgen könnte zur Entwicklung einer Photobiologische Wasserstofffassade führen, die als integrierte oder vorgehängte Struktur in der Lage ist durch Sonneneinstrahlung Energie in Form von Wasserstoff zu erzeugen, der mittels einer integrierten Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt wird. Dies könnte zu einer hochinteressanten energetischen Alternative zu bekannten Systemen wie Photovoltaik- oder Vakuumröhrenkollektoren führen, da die Energieausbeute des produzierten Wasserstoffes in Kombination mit modernen Brennstoffzellen wesentlich höher ist. Die Applikation auf moderne Gebäudehüllen bedeutet auch in gestalterischer Hinsicht neue Möglichkeiten, da bei gleicher Energieausbeute wesentlich weniger Fläche benötigt wird.

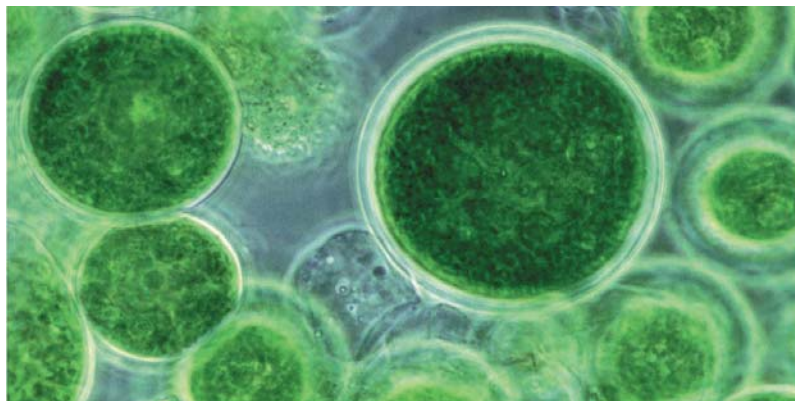


Abb. 4.2.1: Grünalgen

4.2.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Pflanzen	<i>plantae</i>
Unterreich	Grüne Pflanzen	<i>viridiplantae</i>
Abteilung	Eukaryoten	<i>eucaryota</i>
Klasse	Grünalgen	<i>chlorophyta</i>

Abb. 4.2.2: Biologische Klassifizierung der Grünalge

4.2.3 Allgemeine Beschreibung

Algen leben meist in Gewässern wie Seen, Tümpeln, Flüssen, Meeren oder Mooren bei idealen Temperaturen von ca. 30-45°C. Die Algen gehören generell zum Plankton (*Phytoplankton*). Die Grünalgen (*Chlorophyta*) tragen ihren Namen wegen der grasgrünen Chloroplasten und gehören, gemessen an den bisher bekannten Lebensformen, zur einer der vielfältigsten Algenklasse. Die einfachsten Chlorophyten sind zweigeißlige Einzeller wie z.B. die *Chlamydomonas*. Werden diese Pflanzen dem Licht ausgesetzt, betreiben sie Photosynthese, d.h. sie gewinnen aus Licht Zuckerenergie zum Wachsen. Im allgemeinen haben grüne Pflanzen die Fähigkeit, aus Kohlenstoffdioxid und Wasser Kohlenhydrate zu extrahieren und dabei parallel Sauerstoff auszuschleiden. Prinzipiell sind alle höheren grünen Pflanzen, Algen, aerobe und anaerobe phototrophe Bakterien zum photosynthetischen Prozess fähig. Das einfallende Sonnenlicht wird dabei primär von Chlorophyll absorbiert, das als Blattpigment der höheren Pflanzen und Grünalgen diesen die grüne Farbe verleiht. Die Aufgabe des Chlorophylls in den Chloroplasten ist es das Licht in chemische Energie zu wandeln, wobei im Spektrum des sichtbaren Lichts nur die Wellenlängen im blauen und roten Bereich für die Photosynthese wirksam sind.

4.2.4 Phänomenologische Betrachtung

Im Gegensatz zum Photosynthetischen Vorgang produzieren die Cyanobakterien bei der Photosynthese den für ihren Stoffwechsel wichtigen Wasserstoff, eine photobiologische Prozess also. Cyanobakterien bestehen aus zwei unterschiedlichen

Zelltypen, den vegetativen Zellen und den Heterocysten. Die Wechselwirkung dieser beiden Zelltypen erzeugt dabei den photobiologischen Vorgang. Dieser Vorgang wurde zur Entwicklung eines Verbundprozesses zur photobiologischen Wasserstoffproduktion genutzt, wobei Verbund hier die Zucht von Purpurbakterien im Verbund mit Grünalgen beschreibt. Der Arbeitstitel dieses Grünalgenreaktors ist ArBAS, eine Abkürzung für die Wasserstoffproduktion durch artifizielle Bakterien-Algen-Symbiose.

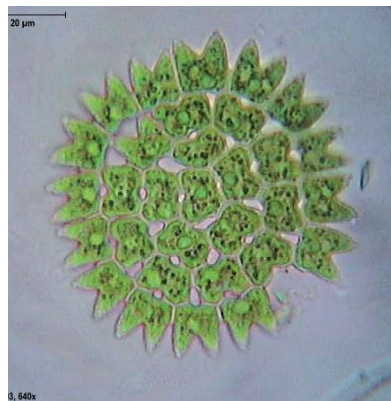


Abb. 4.2.3: Chlorophyll



Abb. 4.2.4: Grünalge

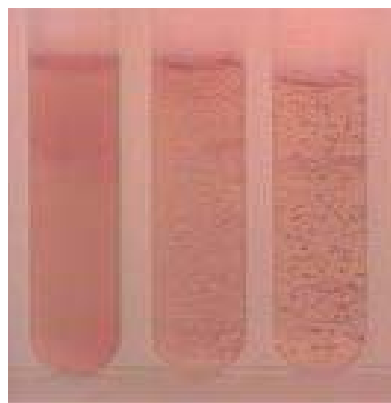


Abb. 4.2.5: Purpurbakterien



Abb. 4.2.6: Grünalge

Theoretisch sind Bakterien unbegrenzt lebensfähig, einschränkend wirken hier die Voraussetzungen für ein kontinuierliches Fließgleichgewicht und eine permanente Zufuhr durch neue Nährstoffe. Dies wird in der praktischen Umsetzung durch eine kontinuierliche Kultur (Chemostat) sichergestellt. Die mittlere Lebensdauer von Purpurbakterien z.B. beträgt ca. 6 Wochen, wobei die Zellen dafür besondere „Lebensumstände“ wie z.B. das Licht, zum Funktionieren des Photosyntheseapparats benötigen. Für die Lebensfähigkeit sollten zudem eine aquatische Viskosität, Temperaturen von 35°C bis 40°C und ein pH-Wert von 7-8,5 vorliegen. Ein Wachstum wäre auch in geeigneten Gelartigen Medien möglich. Die Farbe beträgt je nach Bakterienstamm ocker-gelblich, orange-rot oder purpur.

4.2.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Das Schema des Verbundprozesses wurde an der TU-Berlin in Form eines 3-Stufenreaktors umgesetzt. Das vorgeschlagene Reaktorprinzip beruht dabei auf der Symbiose von sauerstoff- und kohlehydrateproduzierende Grünalgen und zur Wasserstoffproduktion fähigen Purpurbakterien. Die von den Grünalgen in der 1. Prozessstufe bereitgestellten Kohlehydrate werden in einer 2. Prozessstufe in ein Lactat gewandelt. Dieses wird zur photobiologischen Wasserstoffproduktion in einer 3. Prozessstufe mit schwefelfreien Purpurbakterien versetzt, da das Lactat für die Wasserstoffproduzierenden Purpurbakterien wesentlich besser verwertbar ist. Die Umwandlung der Grünalgenpolysaccharide erfolgt dann durch Milchsäurebakterien, wobei das bei der Fermentation freiwerdende CO² im Idealprozess mittels Rückführung recycled wird. Daher muss im Idealfall von außen nur Wasser zugeführt werden. Nachteil dieses Systems ist der große Anteil an Komponenten, die eine Umsetzung in ein Fassadensystem schwierig erscheinen lassen. Eine andere Entwicklungen an der Universität Bonn beschäftigt sich einer speziellen Grünalgenart, einer sogenannten „Turbogrünalge“, denn bei vielen Algen ist die Fähigkeit, Wasserstoff zu produzieren, von Natur aus vorhanden, schwierig ist nur diese Fähigkeit zu wecken. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten, zum einen eine Begasung mit einem inerten Gas oder zum anderen die sogenannte „Schwefeldiät“. Die Umsetzung der Begasung mit einem inerten Gas geschieht wie folgt: Der Sauerstoff hemmt die Wasserstoffbildung, deshalb wird ein „inertes Gas“, wie z.B. Edelgas

oder Stickstoff hinzugefügt, das eine Oxidationsreaktionen verhindert. Diese Art die Grünalgen zur Wasserstoffproduktion zu zwingen ist jedoch technisch und finanziell sehr aufwendig. Ein anderer Ansatz ist die sogenannte „Schwefeldiät“, bei der man den Grünalgen den wichtigen Nährstoff Schwefel entzieht, wodurch das Wachstum der Alge trotz Photosynthese gestoppt wird. Durch den photosynthetischen Prozess entsteht ein Energieüberschuß in Form von Wasserstoff, den die Alge normalerweise als Energiespeicher benutzt. Aufgrund des Schwefelentzuges wird der überflüssige Wasserstoff jedoch freigesetzt. Praktisch erreicht wird der Schwefelentzug durch Ersetzen der Nährlösung mit destilliertem Wasser, wobei für die Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff das Enzym Hydrogenase verantwortlich ist. An diesem Enzym docken Botenstoffe an, die aufgrund des photosynthetischen Vorgangs zu viel negative Ladung besitzen und diese freisetzen müssen. Dadurch wird der Katalysator (Hydrogenase) negativ geladen und entzieht dem Wasser die positiven Wasserstoffionen. Diese übernehmen die Elektronen und es entsteht gasförmiger Wasserstoff.

Wissenschaftlern des Botanischen Institutes der Universität Bonn ist es nun gelungen, das Gen mit dem Bauplan der Hydrogenase aus den Grünalgen zu isolieren und die Grünalgen gentechnisch so zu verändern, dass sie im Vergleich zu ihren ursprünglichen Verwandten zwei- bis dreimal soviel Wasserstoff produzieren können. Im Rahmen eines international geförderten Projektes versuchen die Forscher jetzt, die Hydrogenase an künstlichen Membranen zu befestigen und damit eine „biochemische Batterie“ zu erzeugen. Die Membran ist eine Art Folie, die in drei Phasen den Mechanismus der Algen nachahmt.

Art der Alge	Normale Grünalgen	Gentechnisch manipulierte Grünalge
Liter H ² in einem 200l Aquarium/Tag	50	150
Wh/Tag	145	435
Wirkungsgrad %	25	75

Abb. 4.2.7: Leistungsvergleich der Wasserstoffproduktion einer normalen und einer manipulierten Grünalge

Zur weiteren Verarbeitung des Wasserstoffes werden Brennstoffzellen als Energiewandler eingesetzt. Da Brennstoffzellen keine Primärenergiequellen sind, be-

nötigen sie einen Brennstoff meist in Form von Wasserstoff, der normalerweise aus Erdgas, Kohle, Öl, Kernenergie, Wind, Wasser, Solarenergie oder Biomasse gewonnen wird. Die Brennstoffzelle ist ergo ein „elektrochemischer Reaktor“, der die chemischen Edukte Wasserstoff und Luft durch „indirekte Verbrennung“ in das chemische Produkt Wasser umsetzt. Die dabei entstehende Energie wird in Form von elektrischem Strom und Wärme freigesetzt.

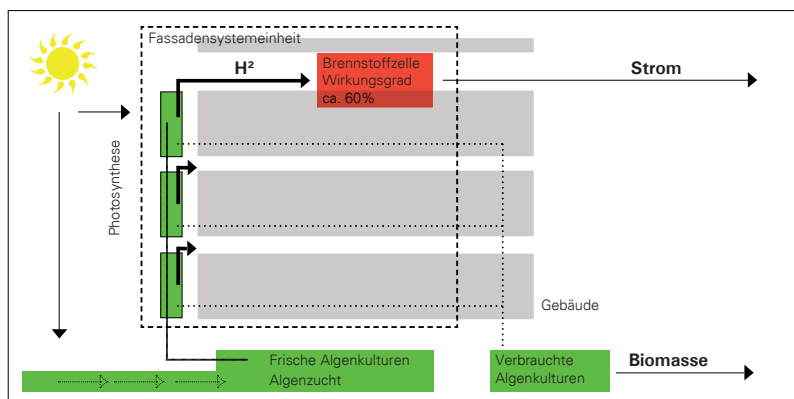


Abb. 4.2.8: Funktionsablauf einer Fassadeintegrierten Wasserstoffproduktion

Der Englische Physiker Grove (1811-1896) experimentierte bereits 1839 mit einem heißen Platindraht als Katalysator für die Aufspaltung (Elektrolyse) von Wasserstoff und Sauerstoff. Diese Reaktion ist als „kalte Verbrennung“ jederzeit reversibel. Moderne Brennstoffzellen bestehen heute aus zwei Elektroden, an denen der Brennstoff mit der Luft umgesetzt wird. Dazu aus einer Elektrolytschicht, die den internen Ladungstransport übernimmt und die Elektroden dabei voneinander trennt. Einzelne Zellen werden zu Stapeln hintereinandergeschaltet, um eine höhere Spannung zu erzielen. Diese Stapel nennt man neudeutsch „Stacks“. Die Wirkungsweise einer Brennstoffzelle ist in Abb.: 3.2.11 dargestellt, mehrer aufgestapelte Brennstoffzellen sind in unterschiedlicher Größe in der Abb.: 3.2.12 zu sehen. Interessant ist hier vor allem auch die Miniaturisierung der neuesten Brennstoffzellen, die so

klein gebaut werden können, daß sie, ähnlich einer Batterie, in z.B. eine Taschenlampe integriert werden können.

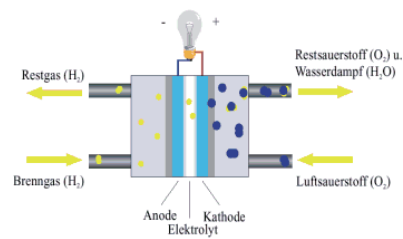


Abb. 4.2.9: Funktionsschema einer Brennstoffzelle



Abb. 4.2.10: Brennstoffzellenstapel (Stacks)

4.2.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Dies führt zum Konzept einer photobiologischen Wasserstofffassade mit integrierter mobiler Brennstoffzelle, die nach folgendem Prinzip funktionieren könnte: Kippbare permeable Lamellen aus Glas oder Kunststoff sind gefüllt mit Grünalgen, die sich wiederum in einem Schichtenzwischenraum befinden. Durch das einstrahlende Sonnenlicht betreiben die Grünalgen Photosynthese und erzeugen Wasserstoff, der aus den permeablen Lamellen nach oben steigt. Nach dem Wasserstoffaustritt in den Schichtenzwischenraum wird der energiereiche Wasserstoff von der Brennstoffzelle in Strom umgewandelt. Über eine integrierte vertikale aquatische Leitung werden die Grünalgen in den Lamellen mit einer angereicherten Nährlösung versorgt. Würde dieser Ansatz im Aussenbereich angewandt werden, müsste darauf geachtet werden, daß die Algen vor extremen klimatischen Bedingungen geschützt sind. Entwickelt wurde unter Berücksichtigung der aktuellsten Informa-

tionen ein Prototyp mit den Abmessungen von 3,00/1,50/0,10 m, einem standardisierten Elementmaß für unterschiedliche Fassaden. Die Grünalgenkulturen befinden sich dabei in elliptischen Glasröhren, die im oberen Bereich perforiert sind, damit der entstandene Wasserstoff problemlos nach oben austreten kann. Diese Glasröhren sind multifunktional ausgerichtet und dienen als Versorgungsleitungen, als Drehachse und als Befestigung. Die Röhren wiederum befinden sich in einem sauerstofflosen Schichtenzwischenraum, damit der Wasserstoff direkt zur Brennstoffzelle auströmen kann. Die Brennstoffzelle befindet sich in unmittelbarer Nähe im oberen Fassadenelementbereich. In den Abb.. XXX ist dieser Aufbau zeichnerisch dargestellt.



Abb. 4.2.11: Algenreaktor im Testlabor



Abb. 4.2.12: Nahaufnahme des Testmodells

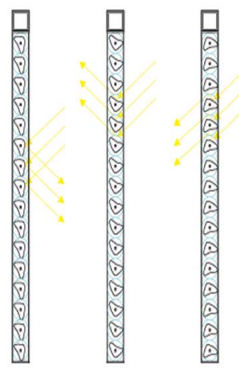


Abb. 4.2.13: Neigungswinkel der Lamellen

4.2.7 Resümee

Wasserstoff ist eine der wichtigsten Energiequellen der Zukunft. Moderne Umsetzungen dieser Hochtechnologie sind heute der Antrieb von Verkehrsmitteln oder das Erzeugen von Wärme und Strom. Durch einen Einsatz der Grünalgen entfällt der Zwischenschritt des heute immer noch notwendigen „Reformers“ zur Herstellung von Wasserstoff, d.h. als Abfallprodukt entstehen nur Wasser und Sauerstoff.

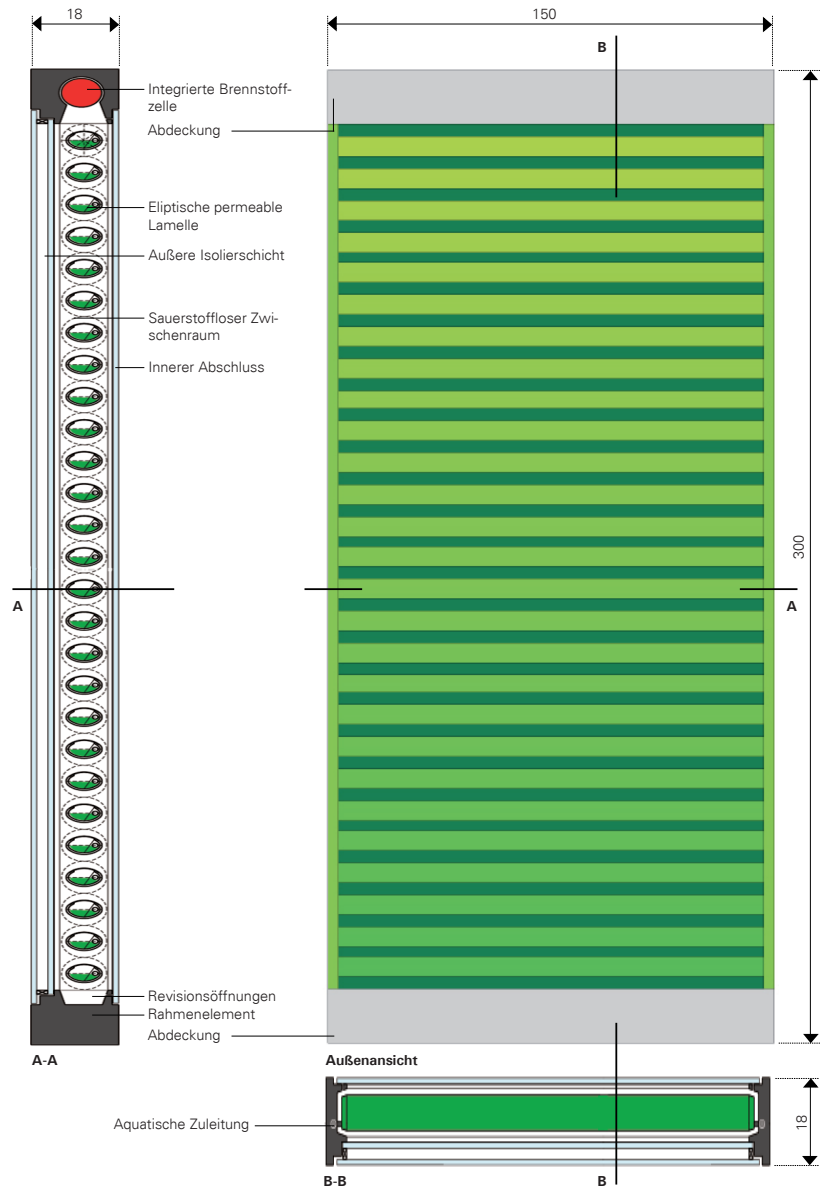


Abb. 4.2.14: Zeichnerische Darstellung eines Fassadenelementes zur photobiologischen Produktion von Wasserstoff

Das Fassadenmodul wäre also auch aus ökologischer Sicht vertretbar und durch die grünlich bis ockergelbe Farbe der Algen auch ein neues Gestaltungselement für die Architektur. Aufgrund neuer Forschungsergebnisse ist es sehr wahrscheinlich, dass in den nächsten Jahren die Reaktoreinheiten in Kombination mit Brennstoffzellen filigraner und flexibler werden können.

4.3 Farbsensitive Flüssigfassade

4.3.1 Inspiration

Amphibien wie z.B. die Kopffüßer oder Fische wie z.B. bestimmte Schollenarten können ihre Außenfarbe durch Zu- und Abnahme pigmenthaltiger Zellen oder durch schnelle Pigmentbewegungen innerhalb der Zelle verändern. Die Pigmente (*Chromatophoren*) werden dabei über die Nervensignale der Augen, der Haut oder durch hormonelle Signale gesteuert, wobei sie grundsätzlich alle auf Licht- und Temperaturänderungen reagieren. Dieses Phänomen könnte zur Entwicklung einer Farbsensitiven Flüssigfassade führen, die, analog der Amphibienhaut, je nach Lichtintensität, Außen- und Oberflächentemperatur die farbige Oberfläche und die damit verbundenen Eigenschaften ermitteln, steuern und anpassen kann.

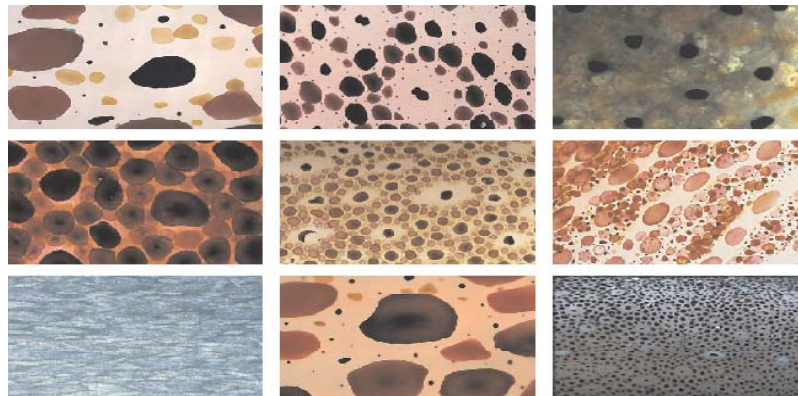


Abb. 4.3.1: Verschiedene Froschhäute in unterschiedlichen Tages- und Jahreszeitsituationen

Abseits der gestalterischen Komponente, die unifarbige oder graduellfarbige Ausformulierungen denkbar machen würde, ist vor allem auch die energetische Komponente von großer Bedeutung, denkt man an Gebäudeoberflächen die, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Himmelsrichtungen, morgens z.B. eine hellere

reflektive Oberfläche haben und abends z.B. eine dunklere absorbierende Oberfläche ausbilden, die den Einsatz von Wärmeerzeugern nach hinten in die Nacht verschiebt, da die Fläche wie ein von der Sonne „geladener“ Absorber nachheizt. Denkbar wäre z.B. eine von Chromatophoren durchwebte Glasscheibe, die ihre Transparenz steuern kann.

4.3.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Überabteilung	Gewebetiere	<i>eumetazoa</i>
Abteilung	Bilateria	
Klasse	Kopffüßer	

Abb. 4.3.2: Biologische Klassifizierung Kopffüßer

4.3.3 Allgemeine Beschreibung

Die Kopffüßer sind eine hoch organisierte Gruppe von Weichtieren, die nur im Meer vorkommen, wobei es freischwimmende (pelagische) und bodenlebende (benthische) Arten gibt. Insgesamt sind etwa 800 heute lebende (rezente) und ca. 10.000 fossile Arten bekannt. Die Leguane bilden eine Familie der Reptilien, deren Mehrzahl (über 700 Arten) in Nord- und Südamerika lebt. Wenige Arten leben auch auf Madagaskar und den ozeanischen Inseln, wobei die meisten Arten 10-30 cm lang ist. Einige besonders große Leguane erreichen jedoch sogar Längen von bis zu 2m.

4.3.4 Phänomenologische Betrachtung

Die Farbveränderung bei Tieren geschieht meist aufgrund der Zu- und Abnahme pigmenthaltiger Zellen (extrazellulär) oder durch schnelle Pigmentbewegungen inner-

halb der Zelle (intrazellulär). Diese Pigmente werden Chromatophoren genannt, die entweder durch Nervensignale wie den Sehnerv, über die Haut oder mittels hormoneller Signale gesteuert. Chromatophoren (*gr.:chroma=Farbe und phoros=tragend*) bestehen aus einer protoplasmatischen Substanz, die als Träger der Assimilationsfarbstoffe in Tierzellen dient.

Der Farbwechsel und die Farbintensität bei Tieren hat verschiedene Ursachen und Intentionen. Die häufigsten sind:

- Temperaturregulierung
- Licht- und Beleuchtungsintensität
- Tageszeit
- Tarnung
- Jagd und Balz
- Kommunikation unter Artgenossen
- Gesundheitszustand
- Ernährungszustand
- Gravidität/Schwangerschaft

Man unterscheidet generell zwei Arten von Farbwechsel, den morphologischen Farbwechsel, der durch die Verminderung oder Vermehrung des Pigments in den Chromatophoren hervorgerufen wird und der physiologische Farbwechsel, der durch die Verschiebung der Pigmente entsteht.

Bei direkter Einwirkung des Lichts auf die Chromatophoren spricht man von einem „primären Farbwechsel“, wie z.B. auch bei der menschlichen Haut, die durch Sonneneinstrahlung Melanin ausschüttet, das uns nach einer gewissen Zeit eine eingbräunte Haut verleiht. Die Farbe eines Leguans dagegen ändert sich radikal vom Schlupf bis zum Erwachsenenalter, wobei Schlüpflinge und Jungtiere meist hellgrün sind und eine fast phosphorisierende Unterseite haben. Der ausgewachsene Leguan passt sich durch seine Braunfärbung der Rinde der Äste an, wobei der Schwanz eines Leguans deutlich gebändert ist und sich hellere grüne Streifen mit bräunlichen oder dunkelgrünen Streifen abwechseln.



Abb. 4.3.3: Iguana



Abb. 4.3.4: Kopffüßer

Der Einfluss und die Veränderung von Licht und Temperatur beeinflussen den Farbwechsel auf unterschiedliche Weise. So lassen die Tiere bei niedriger Temperatur einen dunklen Farbton erkennen um mehr Sonnenenergie zu absorbieren und hellen mit steigender Wärme auf um genau diesen Effekt wieder zu minimieren. Bei Dunkelheit erscheinen die Echsen fast farblos und bleich.

Kopffüßer (*cephalopoda*) kommen in allen Weltmeeren vor und gelten als die größte im Meer lebende wirbellose Tierart. Sie besitzen ein so hoch entwickeltes Nervensystem, daß sie zu ähnlich komplexen Verhaltensmustern in der Lage sind wie manche Wirbeltieren. Die Größe beträgt zwischen 10cm und bis zu 7 m Körpergröße, abhängig von Art und Lebensraum. Die Weichtiere besitzen weder ein inneres noch ein äußeres Skelett und bestehen aus Kopf, Eingeweidesack und Füßen, daher der Name Kopffüßer. Die größten und am weitesten entwickelten Kopffüßer sind die achtarmigen Kraken der Gattung *Octopus*. Der Farbwechsel bei diesem Tieren hängt von den Veränderungen der Beleuchtung, der Farbe und der Textur ab, wobei Lichtreize über das Auge und Wärmereize über die Haut aufgenommen werden. Die Farbzellen in der Haut sind dabei für die Reaktion auf die Umgebung verantwortlich. Chromatophoren werden durch Nervensignale oder hormo-

nell über Rezeptoren in der Haut gesteuert. Dabei umgeben 4 - 24 Muskelfibrillen die Chromatophoren. In der Abb. 4.3.7 ist eine ektodermale, formveränderliche, fortsatzreiche Zelle mit schwarzen, gelben und roten Körnern abgebildet. Dabei werden folgende Typen von Chromatophoren unterschieden: die Melanophoren (1), die Guanophoren (2) und die Lipophoren (3). In der Abb.: 3.3.8 ist ein Farbzellenaufbau abgebildet, der Pigmentgranulen (1), den Nucleus (2), den Cytoelastischer Sack (3), die radiale n Muskelfibrillen (4), die Mytochondrien (5), die Muskelzelle (6), den Nervenstrang (7), die Glialzelle (8) und die primäre Farbtaschen (9) zeigt.



Abb. 4.3.5: Scholle (Chromatophoren über Nervensignale gesteuert)



Abb. 4.3.6: Soldatenfisch (Farbwechsel je nach Licht/Stimmung)

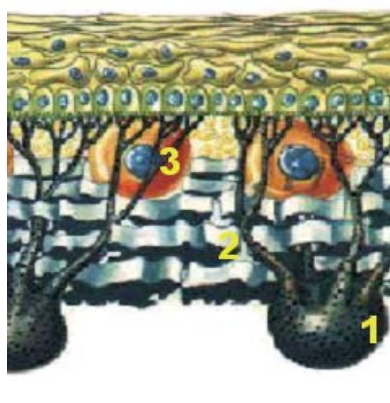


Abb. 4.3.7: Farbzellenaufbau bei einem Leguan

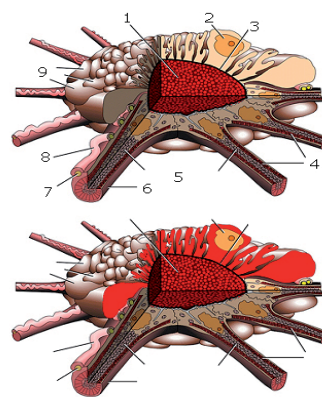


Abb. 4.3.8: Farbzellenaufbau

4.3.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Ähnlich einer Tierhaut müssen sich auch moderne Gebäudehüllen den Anforderungen wie z.B. der Lichtintensität, der Temperatur oder auch der Behaglichkeit stellen. Beim vorab beschriebenen Phänomen spielt die Farbe und ihre Farbwechselfähigkeit eine entscheidende Rolle.



Abb. 4.3.9: Fassadenelemente trüben graduell vom Rahmenbereich in die Mitte des Elementes ein

Daher wäre denkbar, daß, analog zum Farbwechsel eines Leguans (*Iguana iguana*), auch eine Gebäudefassade über den Tag, den Monat oder das Jahr hinweg die Außenfarbe verändern könnte, um damit auf wechselnde Umgebungseinflüsse aus Sonnenlicht, Temperatur und Luftfeuchtigkeit reagieren zu können. Das heißt z.B. im Sommer eine reflektierende Oberfläche, die mittels einer hohen 1. Reflektion das von außen einfallende Licht zurückwirft und damit die Absorption der Oberfläche minimiert und im Winter eine genau umgedrehte Wirkungsweise, indem die Oberfläche die einstrahlende Wärmeenergie absorbiert und nach innen weiterabgibt.

4.3.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Ein Ansatz könnte sein, eine justable Flüssigkeit zwischen zwei Schichten einzubringen, die den gewünschten Farbwechsel durch Einrüben eines kapillaren Systems erreicht. Da die Farbanpassung beim Iguana aus morphologischen Gründen

nur über einen längeren Zeitraum erfolgen kann, wird die Wirkungsweise der Farbpassung des Kopffüssers in das Zentrum der Überlegungen gerückt. Dieser kann sich mittels physiologischer Mechanismen binnen Millisekunden farblich einstellen. Da seine Kontraktionstechnik auf mechanischen und kapillaren Vorgängen basiert, ist auch eine Umsetzung mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten wesentlich näher wie beim Iguana, der mittels Chromatophoren seine Farbe ändert.



Abb. 4.3.10: Versuchsmodell eines farbgefüllten Tanks mit angeschlossenen Kapillarröhrchen

Ein erster Ansatz wäre also ein muskelartiges System mit einer Flüssigkeit als Farbträger oder Eintrübmittel. Die Flüssigkeit wird dabei, analog zur Muskelphibrille eines Kopffüssers, durch einen mechanischen Vorgang in ein kapillares System gedrückt. Damit könnte z.B. im Sommer verhindert werden, daß die Wärme ins Gebäude eindringen kann, Fassadenelemente also, die minimal absorbieren und maximal reflektieren. Im Winterfall wird diese Wirkungsweise reziproc und sorgt für maximale Absorbtion und minimale Reflektion. Eine Idee zur „low-tech-Umsetzung“, eines solchen Systems wäre z.B. die Dilatationsmomente im Fassadenrahmen zu nutzen, um damit einen enormen mechanischem Druck aufzubauen, der pigmentierte Flüssigkeit in ein winziges kapillares System hineindrückt, um die Erscheinung und Farbe des Elementes zu verändern. Ein graduelles und langsames Eintrüben des Elementes wäre die Folge, wobei sich bei fallender Temperatur die

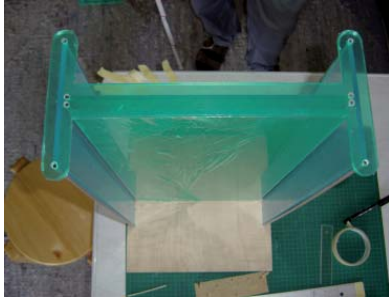


Abb. 4.3.11: Typ 2 Modell im Montagezustand



Abb. 4.3.12: Typ 2 Modell kurz vor der Befüllung



Abb. 4.3.13: Eckmetallrohre Typ 2 Modell



Abb. 4.3.14: Typ 2 Modell 6 Stunden nach der Befüllung

Flüssigkeit selbstständig, energielos und ohne aufwendige Sensorik wieder in den Rahmen zurückzieht, ein analoges Vorgehen zur Funktionsweise bei den Kopffüßern mit dem Unterschied, daß bei diesem Konzept der Rahmen des Elementes die Funktion der Muskelphibrille übernimmt. In den Abb.: 3.3.15 und 3.3.16 ist ein solcher Ansatz in Form eines Funktionsmodelles umgesetzt. Verwendet wurden dabei zwei sich abstossende Flüssigkeiten Benzin und pigmentiertes destilliertes Wasser, die hintereinander in einen speziellen Schlauch angeordnet wurden. Die beiden Flüssigkeiten verfügen über ein sehr gutes Fließverhalten und vermischen sich aufgrund unterschiedlicher Dichten nicht miteinander. Der Versuchsaufbau sieht dabei folgendermaßen aus: Zuerst wurde ein Schlauch aus medizinischen Anwend-

nungsbereichen (Dialyse etc.) schleifenförmig zwischen zwei Plexiglasscheiben in einem gleichförmigen Raster verlegt, wobei die Schlaufen rechts und links genau der Nettolänge der mittleren Scheibenelemente entsprechen.

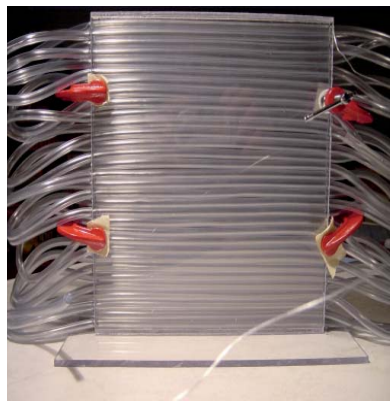


Abb. 4.3.15: Schlauchmodell Typ 1



Abb. 4.3.16: Schlauchmodell Typ 2 direkt nach der Befüllung mit Benzin und destilliertem Wasser

Die beiden Flüssigkeiten werden in das geschlossene Schlauchsystem nacheinander in Reihe und abwechselnd aufgezogen, wobei die Befülldauer und Befülllänge immer einer Schlaufelänge des Scheibenelementes entspricht. Dadurch wird erreicht, daß sich die pigmentierten Bereiche immer gleichmäßig zwischen dem Rand- und dem Feldbereich bewegen und horizontal auf einer Linie bleiben. In Abb. 4.3.16 ist zu sehen, daß dieser Vorgang nicht ohne weiteres ausgeführt werden kann, da die Toleranzen der Befüllung trotz exakter Ausführung zu hoch sind. Angedacht ist jedoch den Zwischenraum entweder komplett einzufärben oder zu entfärben. Bei der Weiterentwicklung des Typ 1 Modells in ein Typ 2 Modell wurde dann ein extrem dünner PE-Schlauch mit einem Durchmesser von innen 1mm und außen 1,5mm verwendet, der wiederum um eine Plexiglasscheibenkonstruktion mit einem Verhältnis von 1/3, 1/3, 1/3 (Seitenlänge/Mittelstück/Seitenlänge) gewickelt wird. Damit eine möglichst homogene Aufwicklung erreicht wird, wurden an den Ecken zusätzliche Metallrohre eingebaut. Das Modell war direkt nach dem Befüllen

einwandfrei funktionsfähig, wie man in der Abb. 4.3.17 sehen kann. Probleme traten dann schon nach kurzer Zeit auf, da das Benzin nach mehreren Stunden im befüllten Zustand den PE Schlauch leicht anlöst und dieser dann aus der exakten Form ausbricht und weich wird. Der Abstand der ursprünglich klar getrennten Flüssigkeiten verändert sich dadurch, er wird unregelmässiger und kleiner.



Abb. 4.3.17: Modellausschnitt mit Teilbefüllung



Abb. 4.3.18: Schlauchanordnung in der Nahaufnahme

Eine weitere Ansatz könnten neuartige Sonnenschutzlamellen sein, die erst mit zunehmender Einstrahlung ihre Wirkungsweise entfalten und nach und nach eintrüben. Dies könnte, analog zum morphologischen Vorgang beim Iguana, durch eine mit Pigmenten eingefärbte Flüssigkeit in den Lamellen ausgelöst werden. Die Lamellen verfärben sich mit zunehmender Einstrahlung und erzeugen einen Schlag Schatten auf die bestrahlte vertikale Fläche. In der Abb.: 3.3.X ist ein solcher Vorgang exemplarisch dargestellt.



Abb. 4.3.19: Lamellen verfärben sich und spenden Schatten

4.3.7 Resümee

Der Ansatz einer Farbsensitiven Flüssigfassade nach dem Vorbild der Farbveränderung mittels morphologischer oder physiologischer Vorgänge nach dem Vorbild der Leguane oder der Kopffüßer könnte zu neuartigen „low-tech“ Lösungen im Bereich selbstverschattender Schichtsysteme führen. Auch der Einsatz als gestalterisches Element mit sich verändernder gradueller Farbigkeit ist ein interessanter Ansatz, wobei jedoch der Einsatz aus energetischen Überlegungen im Vordergrund stehen sollte. Die in den Versuchsaufbauten ermittelten Schwierigkeiten müssten allerdings zuerst einmal genauer untersucht werden, denkbar ist jedoch die Optimierung mittels geeigneter Materialien z.B. durch industrielle Fertigung mit extrudiertem Glas und optimierten Querschnitten. Auch die Integration in Verbundglasscheiben mit integriertem Verschattungselement sind denkbar. Als Schaltungsimpuls könnte die Einstrahlung von Licht, ein mechanischer Impulsgeber oder ein Impuls über elektrische Spannung dienen. Ebenso ist eine Aktivierung über Photodioden, optische Farbfilter, mittels Erwärmung oder chemischer Reaktion oder durch optische Erkennung denkbar. Als Mögliche Trägermedien kommen Gas, Licht, pigmentiertes Wasser oder Folien und Lacke mit Farbwechselvermögen in Frage. Mechanische Lösungen können mittels Pneumatik, Hydraulik, Nanodüsen, Nanoprojektion mittels Interferenzen sowohl einschichtig als auch mehrschichtig entwickelt werden.

Exkurs zur Pixelierung einer Oberfläche: Beispielhaft sind in den Abb. 4.3.20 bis 4.3.21 einige Wahrnehmungsstudien durchgeführt worden, die zur Optimierung der Verteilung und der Größe eines Pixels dienen. Hintergrund ist für eine Anwendung flüssigkeitsbasierender Eintrübungen mittels kapillarer Anordnung herauszufinden wieviele Informationen das menschliche Auge benötigt um das zu erzeugende Bild oder einen sichtbaren Effekt zu erkennen. Darüber hinaus gilt es festzustellen wie dicht die Pixel aneinanderliegen dürfen, ohne dass bei einem transparenten Träger medium die Durchsicht eingeschränkt wird. In der Abb.: 3.3.9 ist deutlich zu erkennen, daß eine Auflösung von 72 Pixel pro cm² ausreichend sind. Ein weitere Versuchsreihe zeigt immer wieder das gleiche Bild und eine gleichförmige Verteilung von 50% Prozent Verdeckung auf jedem Bild. Zu Beginn ist es ein großer Pixel und am Ende 1024 Pixel, die als schwarze Fläche das Seerosenbild verdecken.

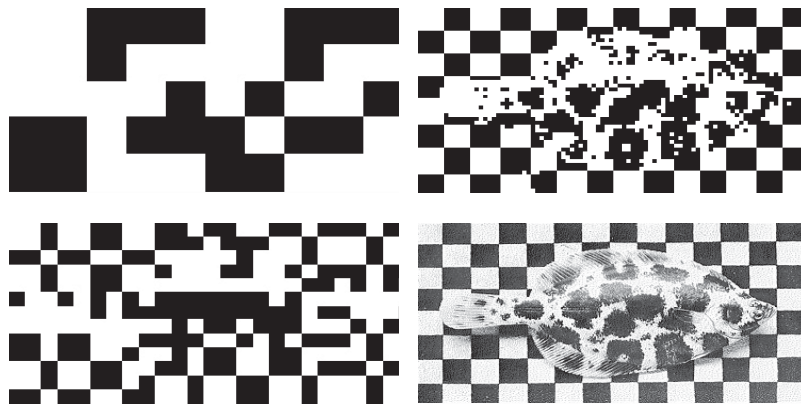


Abb. 4.3.20: Pixelstudie mit 2, 5, 18, 72 Pixel pro cm²

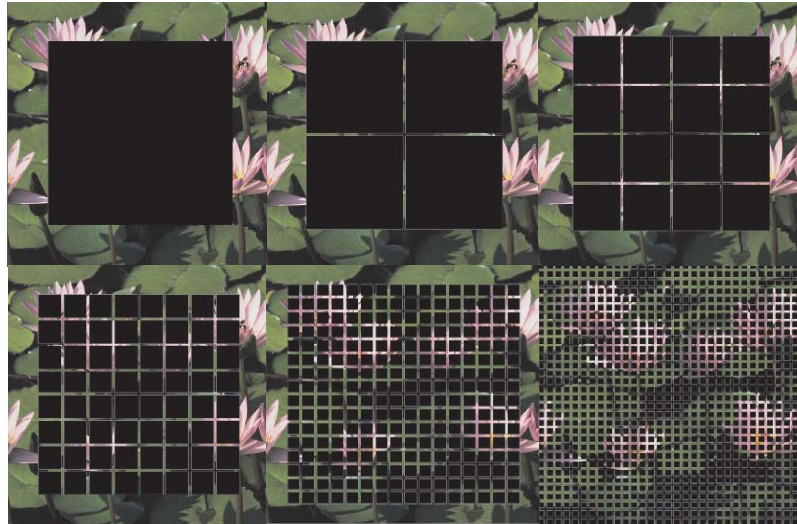


Abb. 4.3.21: 50% Flächendeckung (50% Schwarz, 50% Durchsicht) unterschiedliche Pixelierungen

4.4 Dezentrale Flächenlüftung

4.4.1 Inspiration

Bei Amphibien wie z.B. Fröschen und Lurchen oder bei Fischen wie z.B. Schollen oder Katzenhaien, kommen, je nach Alter, Umgebungsbedingungen oder Jahreszeit unterschiedliche Atmungssysteme zum Einsatz. Z.B. atmen junge Frösche vorerst mit der Kiemenatmung und wechseln dann zur zentral gesteuerte Lungenatmung je älter sie werden. Befinden die Frösche sich dann im Sommer an Land, atmen sie primär mit der zentralen Lunge, wobei sie im Winter oder unter Wasser ihre dezentral gesteuerte Hautatmung benutzen. Diese Funktionsweise könnte zu einer dezentralen Flächenlüftung in Gebäudefassaden führen, die als integriertes Belüftungssystem mittels sensorischer Leistung den Frischluftbedarf ermittelt und über ein Trägermedium Sauerstoff und Kohlendioxid in die Fläche transportiert.

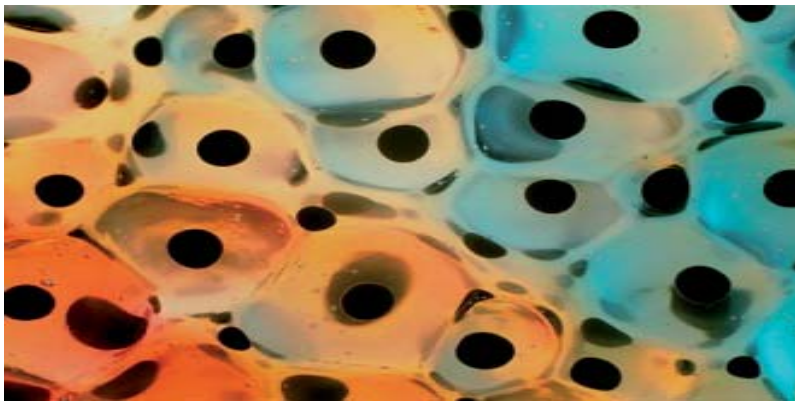


Abb. 4.4.1: Nahaufnahme einer Froschhautoberfläche

4.4.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Überabteilung	Wirbeltiere	<i>vertebrata</i>
Abteilung	Landwirbeltiere	<i>tetrapoda</i>
Klasse	Amphibien/Lurche	<i>amphibia</i>
Ordnung	Froschlurche	<i>anura</i>

Abb. 4.4.2: Biologische Klassifizierung der Froschlurche

4.4.3 Allgemeine Beschreibung

Frösche, Kröten und Unken gehören zur Ordnung der Froschlurche. Die Amphibien bilden eine stammesgeschichtlich sehr alte Klasse der süßwasser- und landbewohnenden, vierfüßigen Landwirbeltiere (*tetrapoda*). Sie sind auf allen Kontinenten verbreitet, außer in den Polarregionen und in sehr trockenen Wüsten. Die meisten Lurche durchlaufen ein Larvenstadium im Wasser und sind in der Lage nach einer mehrwöchigen Metamorphose auch an Land zu leben. Auch die ausgewachsenen Amphibien bewohnen sowohl aquatische als auch terrestrische Umgebungen, allerdings sind die meisten auf die unmittelbare Nähe von Feuchtgebieten angewiesen. Dies vor allem aufgrund ihrer Schleimhaut, die austrocknen würde, wenn sich die Tiere zu lange von Gewässern entfernen. Die meisten Arten sind vor allem nachtaktiv, die sie vor Fressfeinden schützt und die Wasserverluste durch die Haut minimieren. Bei Trockenheit bevorzugen die Tiere feuchte Erdhöhlen, die sie dann nur bei Regen oder Nachts wieder verlassen. Da die Froschhaut nicht gegen Wärmeverlust isolierend wirkt, nehmen sie die Temperatur der Umgebung an und gehören daher zu den wechselwarmen Tieren.

Die Haut setzt sich aus einer Oberhaut, einer tiefer liegenden Lederhaut und einem respiratorischen Bereich zusammen. Die Lederhaut besteht aus Bindegewebe, Schleimdrüsen, Giftdrüsen und Chromatophoren. Der respiratorische Bereich der Haut besteht aus einem Kapillarsystem, die Oberhaut aus Hornschicht, Epithelzellen und Kapillaren. Die Dermis beinhaltet dehnbare und elastische Gewebe-

Schleimdrüsen, wobei sie flächenausbildend ist und eine größere Dichte aufweist. Die Haut ist für den Froschlurch zugleich Schutz und Abgrenzung, dient dem Transport zwischen den Zellen, hat Regulationsfunktionen und wirkt als Leiter verschiedener elektrischer Membranströme.

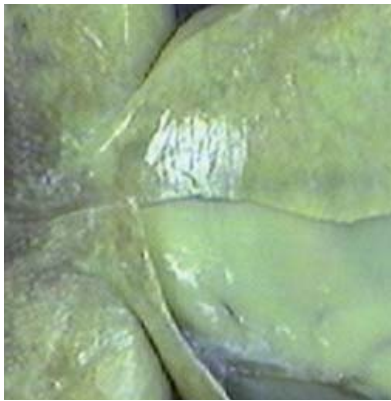


Abb. 4.4.3: Froschhaut



Abb. 4.4.4: Frosch (*agalychnis callidryas*)

Amphibien atmen in Abhängigkeit ihres Alters, ihrer Umgebung und der Jahreszeit auf unterschiedliche Arten. Sie sind in der Lage mit der Lunge zu atmen, sie besitzen dazu eine Mundhöhlenatmung, eine Hautatmung und eine Kiemenatmung. Die Vielfältigkeit der Atmung ist ein evolutionäres Adaptionsergebnis der unterschiedlichen Lebensräumen an Land und unter Wasser. Lurche z.B., die über Jahrtausende im Wasser gelebt haben, benutzen meist Kiemen zur Atmung. Kaulquappen werden noch heute mit Kiemen geboren und bilden erst bei ihrer mehrwöchigen Metamorphose zum Frosch nach und nach andere Atemorgane aus. Diese Kiemen sind dünnhäutige Ausstülpungen der Haut und ragen direkt ins umgebende Wasser. Beim ausgewachsenen Frosch bilden sich diese Kiemen wieder zurück und er benutzt die Lunge, die Mundhöhlen und die Haut zum atmen. Die Lurche waren die erste Wirbeltiergruppe, die an Land zu leben begannen, wobei sie weder ein

Zwerchfell noch Rippen besaßen. Daher bildeten sie eine urtümliche Atemtechnik aus, die sie von weiterentwickelten Tierordnungen unterscheidet.

Atemorgan	Haut	Mundhöhle	Lungen
Erdkröte	27,6 %	0,9 %	71,5 %
Laubfrosch	24,2 %	1,1 %	74,7 %
Feuersalamander	41,4 %	1,3 %	57,3
Kammolch	73,7 %	3,0 %	23,3

Abb. 4.4.5: Anteile der Atmungssysteme

Der bewegliche Mundboden der Lurche wird dabei als Pumpe eingesetzt. Durch das Absenken der Kehlhaut wird Luft durch die Nasenlöcher eingesogen und durch das Anheben bei verschlossenen Nasenlöcher von der Mundhöhle durch Druckausgleich in die Lungen gepresst. Da Amphibien nur eine Herzkammer haben, gelangt das mit Sauerstoff angereicherte Blut über den linken Vorhof in die Lunge gelangt und das sauerstoffarme Blut über den rechten Vorhof wieder aus dem Körper. Bei diesem Vorgang wird das Blut in die Lunge gepumpt und kann sich dort vermischen. Das führt dazu, dass in den Körper jeweils nur das halbe mit Sauerstoff angereicherte Blut gelangt. Die Lunge besteht auch nur aus einfachen Blasen, deren Oberfläche durch Einfaltungen nur leicht vergrößert wird und kann daher eine vergleichsweise geringe Sauerstoff- und Kohlestoffdioxidmenge aufnehmen und abgeben. Die Leistungsfähigkeit dieser amphibischen Lungenatmung ist daher gegenüber der Leistungsfähigkeit einer Säugetierlunge deutlich geringer. Dies hat dazu geführt, daß zusätzliche Atemsysteme entwickelt werden mussten. Eine quantitativ untergeordnete Atmungsmethode ist die Mundhöhlenatmung, bei der durch die Nase eingesogene Luft nicht in die Lunge geleitet wird, sondern über die stark durchbluteten Schleimhäute des Mundhöhlenbodens direkt in den Blutkreislauf gelangen kann.

Eine weitere besondere Art der Atmung ist die Hautatmung. Dabei wird durch die dünne, feuchte Haut direkt Sauerstoff mittels Diffusion aufgenommen und in den Blutkreislauf gemischt. Z.B. atmen Amphibien, die auf dem Boden von Gewässern

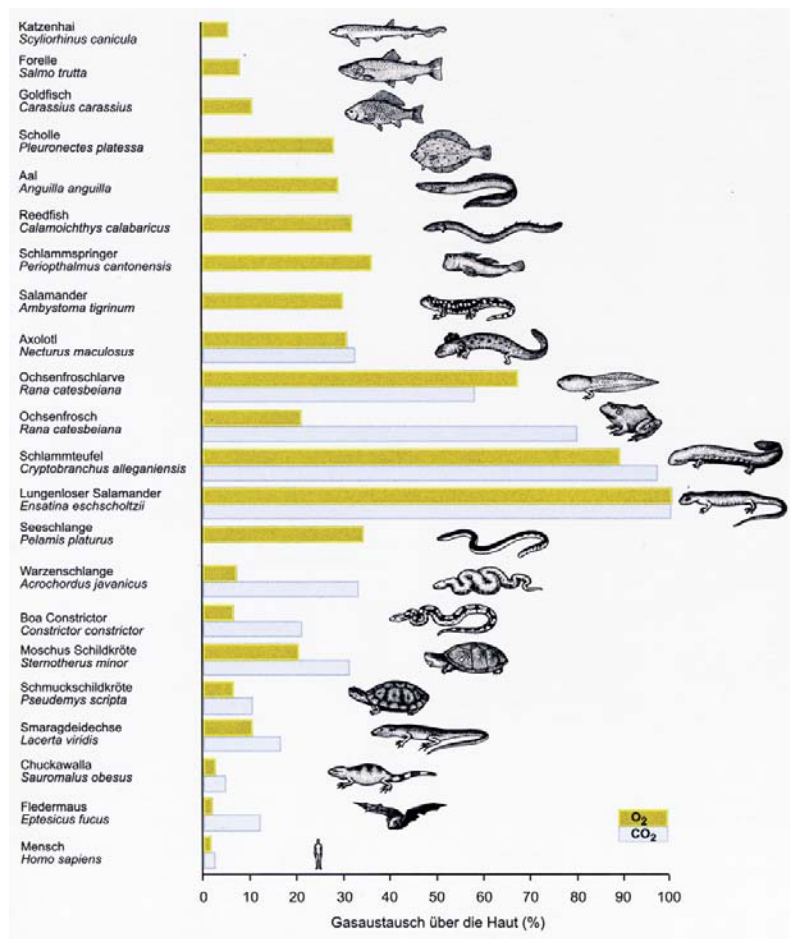


Abb. 4.4.6: Zeichnerische Darstellung verschiedener Atmungsarten bei Amphibien im Vergleich zum Mensch

überwintern und daher nicht über Kiemen verfügen, ausschließlich über die Haut. Bei Säugetieren dagegen findet der Austausch der Atemgase zwischen den Alveolen und den Lungenkapillaren statt. Es kommt hier zur Aufnahme von Sauerstoff (O_2) aus den Alveolen auf die Erythrozyten (rote Blutkörperchen) und zur Abgabe von Kohlendioxid (CO_2) von den Erythrozyten wiederum in die Alveolen. Die treibende Kraft des Gasaustausches, der durch Diffusion stattfindet, sind die Konzentrationsunterschiede in den Alveolen und dem Kapillarblut. Die Konzentration von O_2 beträgt in der Alveole ca. 100mm Hg, im Kapillarblut der Lungenarterie ca. 40mm Hg. Beim CO_2 ist dies umgekehrt. Hier beträgt der Druck in der Alveole ca. 40mm Hg, im Kapillarblut dagegen 46mm Hg. Auch dieser geringere Konzentrationsunterschied reicht aus, die Diffusion anzutreiben.

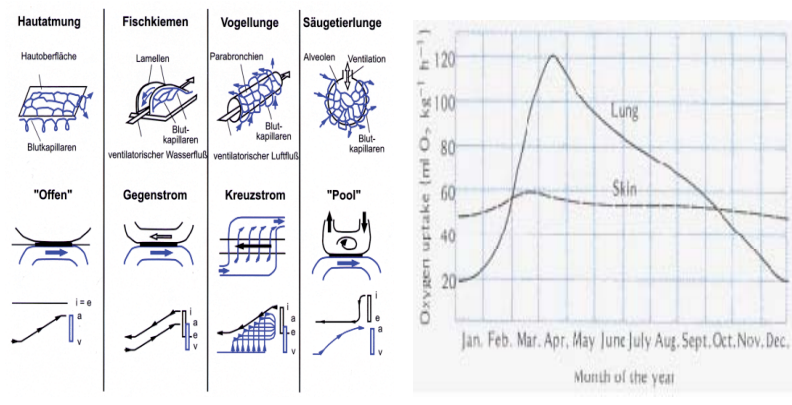


Abb. 4.4.7: Systeme des Gasaustausches

Abb. 4.4.8: Jahreszeitliche Froschatmung

4.4.4 Phänomenologische Betrachtung

Die Froschhaut verfügt über eine wasserdurchlässige Schleimhaut, die permeabel für Sauerstoff und Kohlendioxid ist. Diese Schleimhaut muss jederzeit durch die Schleimdrüsen in der Haut feucht gehalten werden, damit sie ihre Funktionalität

aufrecht halten kann. Dazu müssen weitere Eigenschaften wie eine geringe Verhornung oder minimale Diffusionsbarrieren vorliegen, um einwandfrei durch die Haut atmen zu können. Die Haut verfügt über eine extrem dünne Epidermis mit lediglich 10-15µm Dicke und ca. 30-200 Kapillaren/mm³. Der Gasaustausch, der Wasseraustausch, der Ionenaustausch und die Sekretion erfolgen durch die Epithelzellen der Haut und der Schleimhaut des Tieres, wobei die Zellmembran als Biomembran eine Doppellamelle aus amphipolarer Lipiden ausbildet. Sie weist eine selektive Permeabilität auf bei der O² und CO² frei durch die Doppelschicht diffundieren, da die Molekülgröße kleiner als die Porengröße ist. Größere Moleküle werden selektiv durch Ionenkanäle und sogenannte „Pumpen“ geführt. Die Zellmembran wird dabei durch lipophile Komponenten kompartimentiert. Der Stoffaustausch geschieht dann durch die hydrophilen Komponenten. Die Transportaufgaben sind mechanischer Natur: Ausgleich gegen ein bestehendes Konzentrationsgefälle (aktiver Transport), Transport von hydrophilen oder großen Teilchen entlang eines Konzentrationsgefälles (passiver Transport) und Zellkommunikation durch in die Lipidschicht integrierte Kohlenhydrate.

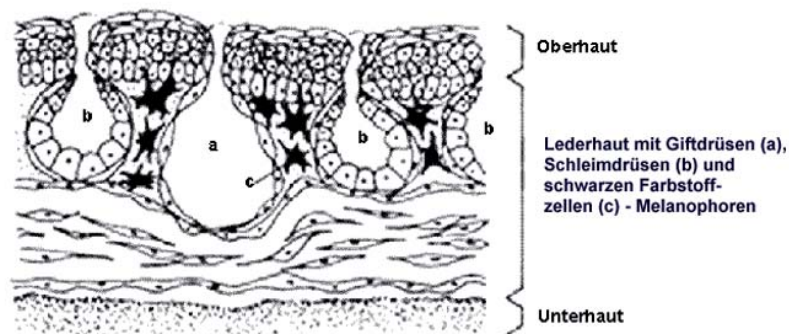


Abb. 4.4.9: Zeichnerische Darstellung durch eine Froschhaut im Schnitt

Die Haut der Amphibien ist stark vaskularisiert, d.h. sie ist vollständig von Kapillaren durchzogen. Der durch die Zellen diffundierende Sauerstoff wird von den Kapillaren aufgenommen und in die Körpervenen transportiert. Die Körpervene *Arteria cuta-*

nebulosa leitet das mit Sauerstoff angereicherte Blut von der Haut bis zur rechten Herzkammer und mischt es dort mit dem Blutkreislauf, der auch die Lungenatmung versorgt. Die Sauerstoffversorgung der Amphibien kann man bei Vernachlässigung der Kiemen- und Mundhöhlenatmung als bifunktional beschreiben. Dabei zeichnen sich die unterschiedlichen Atmungssysteme durch eine hohe Flexibilität aus, denn das Tier kann im Sommer oder im Winter mit diesem adaptiven System sowohl an Land wie auch unter Wasser überleben. Die Abb. 4.4.8 zeigt, daß die Hautatmung fast konstant über das Jahr verteilt eingesetzt wird, während die Lungenatmung über die Wintermonate fast ganz aussetzt. Das Tier hält sich im Winter auf dem Boden von Gewässern auf, da sich seine Kiemenatmung während der Metamorphose zurückgebildet hat und es seine Lungenatmung dort nicht benutzen kann. Dort setzt nun das System der Hautatmung ein.

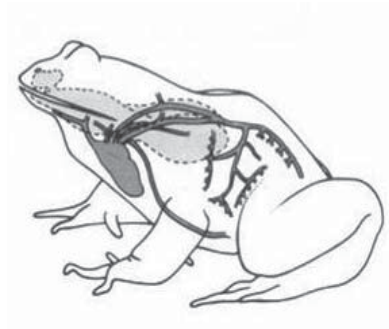


Abb. 4.4.10: Atmungssystem Ansicht



Abb. 4.4.11: Atmungssystem Aufsicht

4.4.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Die „Atmung“ eines Gebäudes wird generell über die Luftwechselzahl (LW=1/h) beschrieben. Sie gibt an, wie oft innerhalb einer Stunde die gesamte Raumluft erneuert wird, die von Außen in einen Raum einströmt. Je höher der Wert, desto höher

her die Raumluftqualität, wobei darauf geachtet werden muß, dass es durch zu hohen Luftwechsel nicht zu Zugerscheinungen kommt. Der nötige Außenluftstrom (ALS) wird je nach Raumart, nach der Anzahl der gleichzeitig anwesenden Personen oder nach der Fläche bemessen ($V_h = n \times ALS$ in m^3/h). Der Anteil an Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid, der direkt durch die Gebäudehaut diffundiert, ist jedoch sehr gering, da man heutzutage versucht extrem diffusions- und luftdicht zu bauen.

Auf die Gebäudehülle übertragen wäre eine Weiterentwicklung eines „adaptiven sensorischen Atmungssystemen“ von Interesse, das z.B. bei normaler Raumnutzung die Fassadenfläche zur Be- und Entlüftung nutzt und bei zusätzlichen Anforderungen z.B. durch besonders viele Nutzer und einen entsprechend hohen Sauerstoffverbrauch über eine zusätzliche technische Raumluftanlage verfügt, die mittels Sensorik dezentral zu- und abgeschaltet werden kann. Entscheidend für einen optimalen Energiehaushalt eines solchen Systems müsste jedoch die Grundeigenschaft sein, beim permeablen Diffusionsvorgang keine Wärmeenergie zu verlieren.

4.4.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Daher wäre von besonderem Interesse eine Fassade zu entwickeln, die sowohl den Wärmeschutz als auch die Permeabilität gewährleisten kann. Für die Raumluftqualität würde das einen kontinuierlichen Gasaustausch über die Oberfläche bedeuten anstelle einer zentralen Ansaugung der Luft und einer späteren Verteilung. Beim konventionellen Luftaustausch über die Fassade wird normalerweise auch Kälte in den Raum gelassen. Deswegen werden z.B. bei Passivhäusern zusätzliche Raumluftanlagen angewendet, die die Frischluft aus der Außenluft ansaugen, an einem Wärmetauscher vorbeiführen und so die vorgewärmte Frischluft in die Räume transportiert, wodurch die Heizwärmeverluste enorm reduziert werden. Der Nachteil dieser Systeme ist jedoch, daß durch die zentrale Ansaugung der Luft und der dann folgenden Verteilung ein sehr komplexes System an großformatigen Leitungen entsteht. Dies steht leider im Widerspruch zur Flexibilität moderner Gebäude. Ein logischer nächster Schritt wäre nun die gesamte Hüllstruktur eines Gebäudes flächig zum Atmen zu bringen und dabei gleichzeitig eine hohe Wärme-

schutzleistung zu erzeugen. Dies könnte erreicht werden, in dem man eine Sauerstoff- und Kohlendioxidaustauschfunktion in die Hülle integriert und während diesem Vorgang kontinuierlich die Wärmeenergie aus den Gasen „heraustauscht“. In der Abb. 4.4.11 bis Abb. 4.4.13 ist ein solcher Aufbau exemplarisch skizziert.

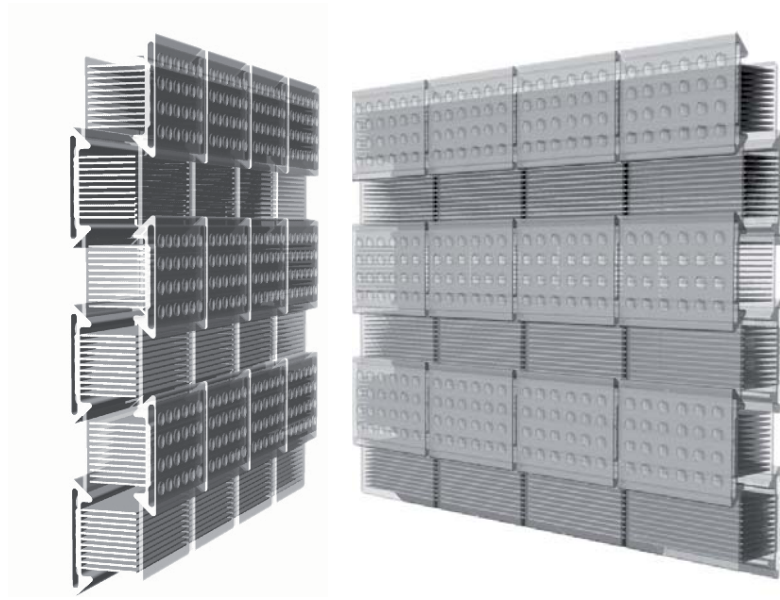


Abb. 4.4.12: Exemplarische Visualisierung einer Dezentralen Flächenlüftung mit Wärmetauscher, links Innenansicht, rechts Außenansicht

Ein Ansatz ist hier eine mehrschalige Anordnung verschiedener Komponenten, wie gaspermeable Membrane, dampfdiffusionsdichte Isolierschichten innen und außen, eine modulare Wärmehaushaltseinheit und selektiv geführter Gasaustausch von innen nach außen und vice versa. Auch Filterwirkungen wie Schadstoffreinigung oder Geruchsbelästigungen könnten angedacht werden.

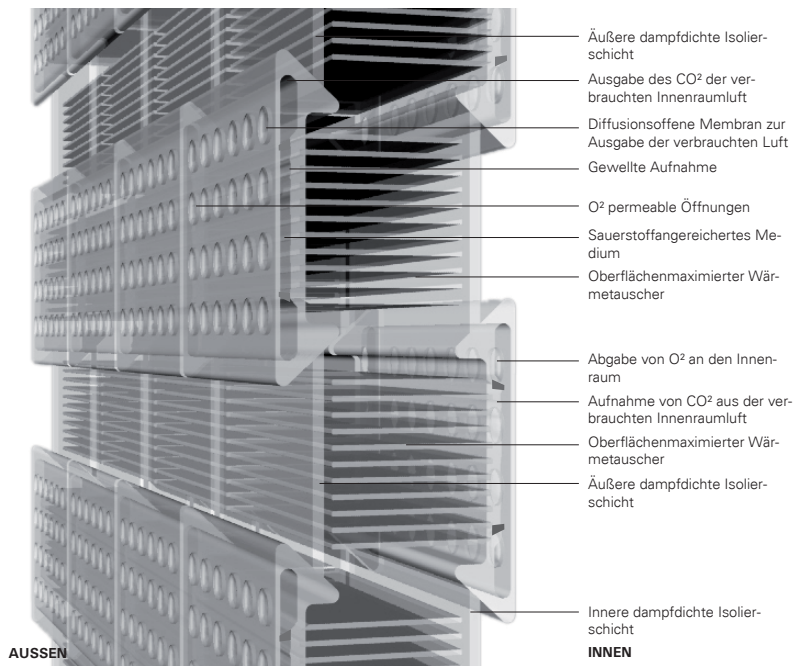


Abb. 4.4.13: Darstellung der Funktionsweisen einer exemplarischen Dezentralen Flächenlüftung

In der Abb. 4.4.13 sind die verschiedenen Wirkungsweisen einer dezentralen Flächenlüftung mit Wärmetauschfunktion in einer Schnittdarstellung aufgezeigt. Der dargestellte mehrschichtige modulare Aufbau ist inspiriert durch die Vorgänge der Hautatmung eines Froschlurches. Der Sauerstoff (O^2) der Außenluft wird über die beiden mittleren Membraneinlässe in ein Medium aufgenommen und gibt dabei seine Energie (Wärme oder Kälte) an die gewölbte Innenstruktur mit maximaler Oberfläche ab. Das ent- oder erwärmte Medium wird nun über die isolierende Schicht an die Innenseite transportiert wo es durch O^2 permeable Membrane wieder an den Innenraum abgegeben wird. In einem ähnlichen Vorgang diffundiert das Kohlendioxid (CO^2) in die mittleren Einlässe auf der Innenseite und tauscht seine Energie mit

der des einströmenden Gases aus. Kondensat ist dabei nicht zu erwarten, da die stehende innere Luftschicht nicht direkt mit Luftschichten höherer oder niedrigerer Luftfeuchtigkeit in Verbindung kommt.

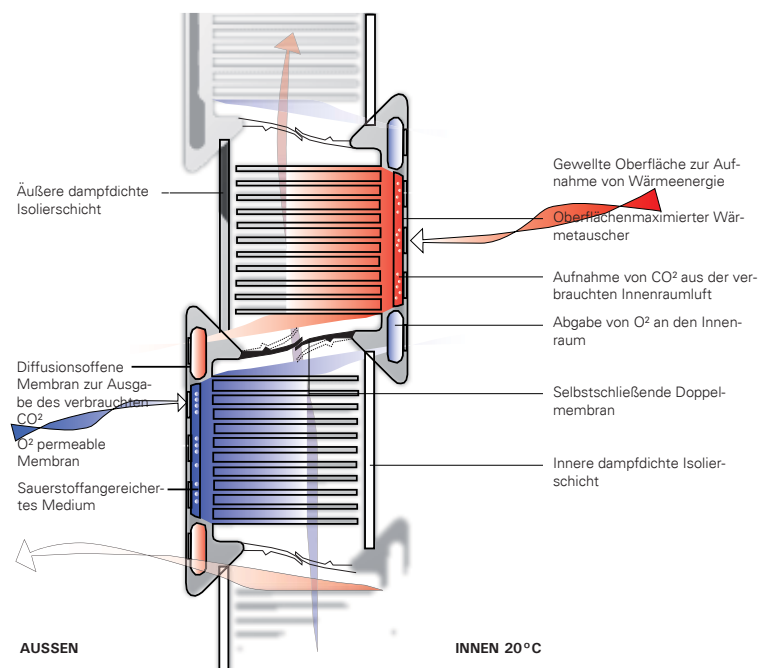


Abb. 4.4.14: Darstellung der Funktionsweisen einer exemplarischen Dezentralen Flächenlüftung

4.4.7 Resümee

Die Weiterentwicklung der kontrollierten Lüftung in moderne Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ist heute vor allem im Passivhausbau Standard. Der hier verfolgte Ansatz könnte auf diesen Systemen aufsetzen, da auch er die Energie in

auszutauschenden Gasen über einen Wärmetauscher leistet. Besonders ist bei diesem Ansatz jedoch der Einsatz gaslösender Medien, die einen direkten Austausch der Sauerstoff und Kohlendioxidmoleküle obsolet machen. Daraus könnte wiederum eine gänzlich andere isolierende Eigenschaft in die Baukomponente bringen, eine enorm wichtige Grundeigenschaft für hochleistungsfähige und dennoch permeable Hüllsysteme.

Exkurs: Grundlagen zur Berechnung der zu erwartende Sauerstoffmengen

Um Sauerstoff zu den Zellen zu transportieren und Kohlendioxid von den Zellen abzutransportieren, wird das Blut zum Verteilen verwendet. Hierbei muß das Blut in der Lunge Kohlendioxid abgeben und Sauerstoff aufnehmen. Dieser Austausch der Atemgase findet zwischen den Alveolen und Lungenkapillaren statt. Es kommt hier zur Aufnahme von Sauerstoff (O_2) aus den Alveolen auf die Erythrozyten (Rote Blutkörper) und zur Abgabe von Kohlendioxid (CO_2) von den Erythrozyten in die Alveolen. Treibende Kraft des Gasaustausches sind die Konzentrationsunterschiede in den Alveolen und dem Kapillarblut.

- *Konzentrationsunterschiede: Die Konzentration an O_2 beträgt in der Alveole ca. 100 mm Hg, im Kapillarblut der Lungenarterie ca. 40 mm Hg. Damit ergibt sich ein Konzentrationsunterschied. Beim CO_2 ist dies umgekehrt. Hier beträgt der Druck in der Alveole ca. 40 mm Hg, im Kapillarblut dagegen 46 mm Hg. Auch dieser geringere Konzentrationsunterschied reicht aus, die Diffusion anzutreiben. Faktoren, die den Gasaustausch und damit die Anreicherung des Blutes mit Sauerstoff beeinflussen, sind:*

- 1 *Alveoläre Ventilation (Belüftung der Lunge)*
- 2 *Perfusion (Lungendurchblutung)*
- 3 *Diffusionskapazität*

Das normale Ventilations/ Perfluationsverhältnis der Lunge ist 0,8. 4 Liter alveolärer Ventilation/min stehen dabei einer Lungendurchblutung von ca. 5 Liter/min gegenüber ($4:5=0,8$). Störungen dieses Ventilations-/Perfluationsverhältnisses nennt man Verteilungsstörungen. Verdickungen der Alveolarmembran, wie sie bei manchen Lungenerkrankungen vorkommen, führen zu einer Vergrößerung der Diffusionsstrecke, die die Atemgase überwinden müssen. Daraus ergibt sich eine Diffusionsstörung. Ebenso führen nicht belüftete Alveolen oder eine Minderdurchblutung der Kapillaren (z.B. Lungenembolie) zu Störungen des Gasaustausches. Der gesamte Raum der Atemwege, durch den die Luft im Körper bis zu den Lungenbläschen, wo der Gasaustausch stattfindet, strömt, wird Totraum genannt. Dieser entspricht jedoch nicht dem

Atemvolumen.

- *Raumluftgeschwindigkeit: Die mittlere Luftgeschwindigkeit im Raum sollte aus Gründen der thermischen Behaglichkeit zur Vermeidung von Zugerscheinungen gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Die zulässige Luftgeschwindigkeit v liegt nach DIN 1946 T2 bei Aktivitätsstufe 1 je nach Lufttemperatur und Turbulenzen etwa zwischen 0,15 und 0,4 m/s.*
- *Gasmengen: Im Ruhezustand benötigt der Mensch pro Tag ca. 0,45 kg Sauerstoff O_2 . 1 mol O_2 entspricht dabei 0,032 kg. Es werden also ca. 15 mol O_2 benötigt. Beim Ausatmen stößt der Mensch pro Tag ca. 0,9 kg Kohlendioxid CO_2 . 1 mol O_2 entspricht dabei 0,044 kg. Es werden also ca. 20 mol O_2 ausgestoßen.*

Daraus ergibt sich folgende Berechnung der benötigten Sauerstoffmenge pro Person und pro Stunde für das Einatmen (Tagesbedarf Sauerstoff pro Mensch ca. 0,45 kg/Tag): $(0,45 \text{ kg/d}) / 24h = 0,01875 \text{ kg/h} = 0,5859375 \text{ mol/h}$ (bei $1 \text{ mol} = 0,032 \text{ kg}$),

Einatmung	Anteil an der Luftmenge %	kg/h	mol/h
Stickstoff N	78	0,6964308	2,176356
Sauerstoff O_2	21	0,01875	0,5859375
Kohlendioxid CO_2	0,03	0,000267858	0,00083706
Andere Gase (Ar, Ne, He, Kr, Xe)	1	0,00089286	0,027902
Ausatmung	Anteil an der Luftmenge %	kg/h	mol/h
Stickstoff N	79	0,740625	0,0,0325875
Sauerstoff O_2	16	0,15	0,0066
Kohlendioxid CO_2	4	0,0375	0,00165
Andere Gase (Ar, Ne, He, Kr, Xe)	1	0,009375	0,0004125

Abb. 4.4.15: Tabellarische Darstellung der Gasanteile der Atmungsluft beim Ein- und Ausatmen

Bei einem prozentualen Anteil von 21% Sauerstoff in der Zusammensetzung von Luft, sind dies in kg/h:

Sauerstoff O_2 : $21\% = 0,01875 \text{ kg/H}$, $1\% = 8,9286 \times 10^{-4} \text{ kg/H}$

Stickstoff N: $78\% = 78 \times 8,9286 \times 10^{-4} \text{ kg/h} = 0,6964308 \text{ kg/h}$
 Kohlendioxid CO₂: $0,03\% = 0,03 \times 8,9286 \times 10^{-4} \text{ kg/H} = 0,000267858 \text{ kg/h}$
 Andere (Ar, Ne, He, Kr, Xe): $1\% = 1 \times 8,9286 \times 10^{-4} \text{ kg/H} = 8,9286 \times 10^{-4} \text{ kg/h}$

Bei einem prozentualen Anteil von 21% Sauerstoff in der Zusammensetzung von Luft, sind in mol/h:

Sauerstoff O₂: $21\% = 0,5859375 \text{ mol/H}$, $1\% = 0,027902 \text{ mol/h}$
 Stickstoff N: $78\% = 78 \times 0,027902 \text{ mol/h} = 2,176356 \text{ mol/h}$
 Kohlendioxid O₂: $0,03\% = 0,03 \times 0,027902 \text{ mol/H} = 0,00083706 \text{ mol/h}$
 Andere (Ar, Ne, He, Kr, Xe): $1\% = 1 \times 0,027902 \text{ mol/H} = 0,027902 \text{ mol/h}$

Für die Ausatmung ergibt sich folgender Tagesausstoss an Kohlendioxid pro Mensch bei ca. 0,9 kg/Tag: $(0,9 \text{ kg/d}) / 24\text{h} = 0,0375 \text{ kg/h} = 0,00165 \text{ mol/h}$ (bei $1 \text{ mol} = 0,044 \text{ kg}$)

Bei einem prozentualen Anteil von 4% Kohlendioxidausstoss in der Luft, sind das in kg/h:

Kohlendioxid CO₂: $4\% = 0,0375 \text{ kg/h}$, $1\% = 0,009375 \text{ kg/h}$
 Stickstoff N: $79\% = 79 \times 0,009375 \text{ kg/H} = 0,740625 \text{ kg/h}$
 Sauerstoff O₂: $16\% = 16 \times 0,009375 \text{ kg/H} = 0,15 \text{ kg/h}$
 Andere (Ar, Ne, He, Kr, Xe): $1\% = 1 \times 0,009375 \text{ kg/h} = 0,009375 \text{ kg/h}$

Bei einem prozentualen Anteil von 4% Kohlendioxidausstoss in der Luft, sind in mol/h:

Kohlendioxid CO₂: $4\% = 0,00165 \text{ mol/h}$, $1\% = 0,0004125 \text{ mol/h}$
 Stickstoff N: $79\% = 79 \times 0,0004125 \text{ mol/h} = 0,0325875 \text{ mol/h}$
 Sauerstoff O₂: $16\% = 16 \times 0,0004125 \text{ mol/h} = 0,0066 \text{ mol/h}$
 Andere (Ar, Ne, He, Kr, Xe): $1\% = 1 \times 0,0004125 \text{ mol/H} = 0,00004125 \text{ mol/h}$

Berechnung der zu erwartende Luftmengen bei einem Testraum nach typischem Gebäudemaß eines Verwaltungs- oder Bürogebäudes. Der Testraum besitzt fol-

gende Eckdaten:

Raster: 1,50 Meter
Breite: 3,00 Meter
Länge: 4,50 Meter
Höhe licht: 3,00 Meter
Grundfläche: 13,5 m²
Volumen: 40,5 m³

Die Schnittstelle zwischen thermisch kontrolliertem und thermisch nicht kontrolliertem Raum umfasste eine Fläche von Austauschfläche (aF) 9,00 m².

Anm.: Die abzuziehenden Wandmaße sind hier nicht berücksichtigt. Unter Lichter Höhe wird der direkte Abstand zwischen Oberkante (OK) Boden und Unterkante (UK) Decke verstanden

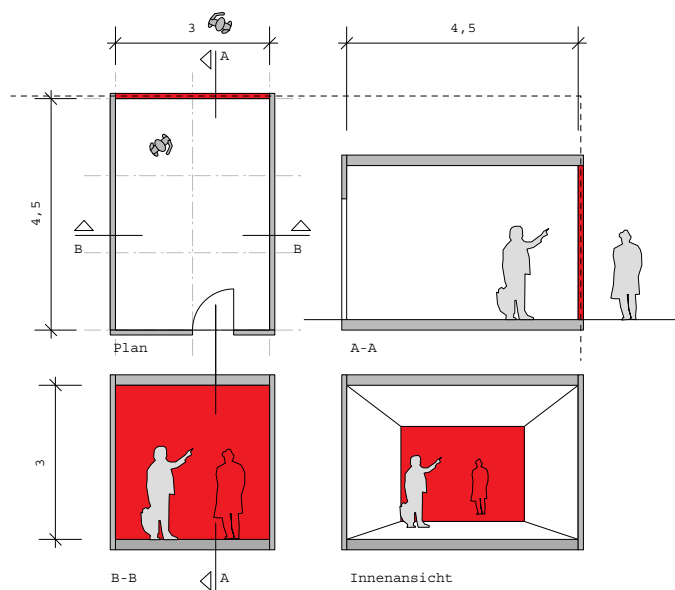


Abb. 4.4.16: Zeichnerische Darstellung eines Beispielraumes zur Ermittlung des Raumvolumenstroms

Das Luftvolumen des Raumes (V_{Raum}) errechnet sich somit auf: V_{Raum} : 40,50 m^3 . Im Folgenden wird der erforderliche Luftwechsel und der nötige Außenluftstrom berechnet.

Bei einer Luftwechselzahl (LW) von 4-fachen Luftvolumenwechsel ergibt sich daraus ein flächenbezogener zu wechselnder Luftvolumenstrom (V_h) von: $V_h: 40,5 \text{m}^3 \times 4 \text{h}^{-1} = 162 \text{m}^3/\text{h}$, bei einer Belegung des Raumes mit 2 Personen ($n=2$) ergibt sich nach der Formel: $V_h = n \times \text{ALS}$ in m^3/h ein erforderlicher Außenluftstrom von: $V_h = 2 \times 40 \text{m}^3/\text{h} = 80 \text{m}^3/\text{h}$, Maßgebend ist hier der größere Wert des flächenbezogene Mindestaußenluftstrom, also $162 \text{m}^3/\text{h}$. Bezogen auf die zur Verfügung stehende Austauschfläche a_F ergibt sich daher folgende Beziehung:

$$P = \text{geforderte Permeabilität der Austauschfläche}/\text{m}^2$$

$$V_h = \text{ALS in } \text{m}^3/\text{h}$$

$$a_F = \text{Austauschfläche bei der Formel: } P = V_h \times a_F^{-1}$$

$$P = 162 \text{m}^3/\text{h} \times 9,00 \text{m}^2^{-1}$$

$$P = 18 \text{m}^3/\text{h}$$

$$P = 18 \times 106 \text{cm}/\text{h}$$

$$P(\text{cm}^3) = 1800 \text{cm}^3/\text{h}$$

Bei einer Luftwechselzahl (LW) von 4-fachen Luftvolumenwechsel ergibt sich daraus ein flächenbezogener zu wechselnder Luftvolumenstrom (V_h) von: $V_h: 13,5 \text{m}^2 \times 4 \text{h}^{-1} = 54 \text{m}^3/\text{h}$, bei einer Belegung des Raumes mit 2 Personen ($n=2$) ergibt sich nach der Formel: $V_h = n \times \text{ALS}$ in m^3/h , ein erforderlicher Außenluftstrom von: $V_h = 2 \times 40 \text{m}^3/\text{h} = 80 \text{m}^3/\text{h}$, maßgebend ist hier der größere Wert des personenbezogenen Mindestaußenluftstrom, also $80 \text{m}^3/\text{h}$. Bezogen auf die zur Verfügung stehende Austauschfläche a_F ergibt sich daher folgende Beziehung:

$$P = \text{geforderte Permeabilität der Austauschfläche}/\text{m}^2$$

$$V_h = \text{ALS in } \text{m}^3/\text{h}$$

$$a_F = \text{Austauschfläche}$$

$$a_{\text{erf}} = \text{erforderliche Öffnungsfläche, Formel: } P = V_h \times a_F^{-1}$$

$$P (m^2) = 80 \text{ m}^3/h \times 9,00 \text{ m}^{-2} \cdot 1$$

$$P (m^2) = 8,89 \text{ m}^3/h \text{ (gerundet)}$$

$$P (m^2) = 8,89 \times 106 \text{ cm}/h$$

$P (\text{cm}^2) = 889 \text{ cm}^3/h = 0,000889 \text{ m}^3/h$, Ermittlung der erforderlichen Öffnungsanteile bezogen auf 1 cm^2 bei einem Luftstrom pro Stunde und einer Geschwindigkeit von 1 m/s : Formel: $Vh = 1 \text{ m/s} \times a_{\text{erf}} \times 3600 \text{ s}$, d.h. $a_{\text{erf}} = Vh / 3600 \text{ s} \times 1 \text{ m/s}$

$a_{\text{erf}} = 0,022 \text{ m}^2$. Verteilt auf die Austauschfläche aF bedeutet dies eine Aufteilung von $0,0025 \text{ m}^2$ Öffnungsfläche a_{erf} bezogen auf 1 m^2 Austauschfläche aF . $a_{\text{erf}}/m^2 = 0,0025 \text{ m}^2$, d.h. quadratisch erfasst eine Öffnung von mindestens:

$a_{\text{erf}}/m^2 = 0,016 \text{ m} \times 0,016 \text{ m} = 0,00256 \text{ m}^2 > 0,0025 \text{ m}^2$. Dies bedeutet pro 1 m^2 ein minimale Öffnung von $1,6 \text{ cm} \times 1,6 \text{ cm}$, also einem Anteil von $0,256 \%$ oder $2,56$ Promille. Verteilt man auf einem 1 cm^2 die erforderlichen Austauschflächen könnte ein mögliche Aufteilung folgendermaßen aussehen:

$$aF = 1 \text{ cm}^2 = 100 \text{ mm}^2 = 100 \%$$

$a_{\text{erf}} = 0,256 \%$ $= 0,256 \text{ mm}^2$, also z.B: $0,11 \text{ mm} \times 0,11 \text{ mm} = 0,012 \text{ mm}^2$, davon 25 Stück verteilt auf 1 cm^2 , $a_{\text{erf}} = 25 \times 0,012 \text{ mm}^2 = 0,30 \text{ mm}^2 > 0,256 \text{ mm}^2$

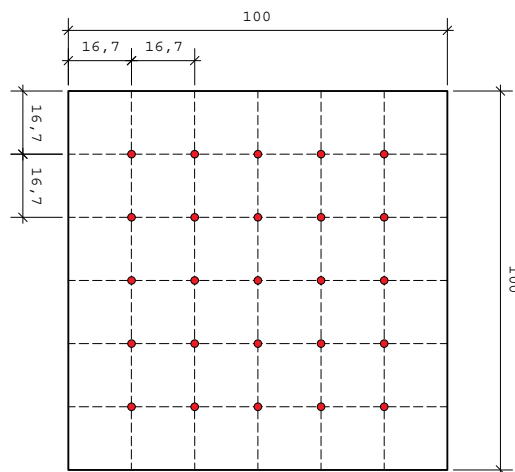


Abb.. 4.4.17: Zeichnerische Darstellung eines perforierten Einzelfläche m^2

4.5 Selektiv permeable Hüllstruktur

4.5.1 Inspiration

Biomembranen dienen der Transportvermittlung, regulieren das Fließgleichgewicht zwischen Zellkompartimenten und sind damit essentiell für den Stoffwechsel verantwortlich. Biomembranen sind semipermeabel (selektiv permeabel) und nur für kleine Moleküle frei durchlässig.

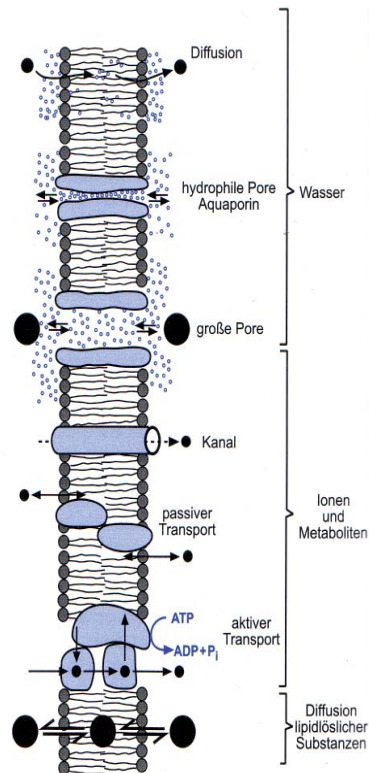


Abb. 4.5.1: Schematische Schnittdarstellung einer Plasmamembran

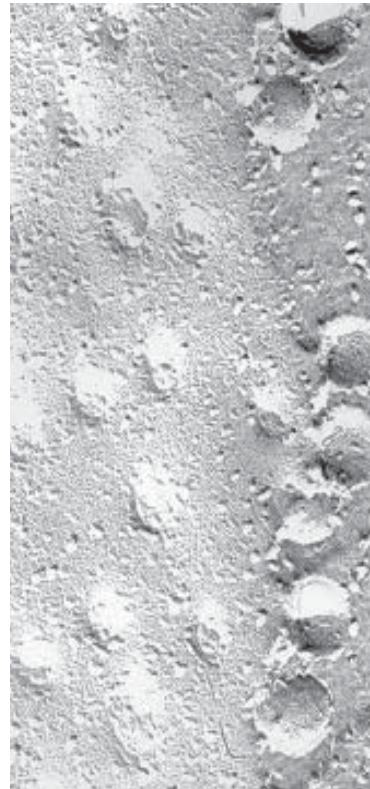


Abb. 4.5.2: Membranstruktur einer Plasmamembran

Diese Moleküle können auf Grund von Unregelmäßigkeiten in der Lipid-Doppelschicht durch die Membran diffundieren. Da größere Moleküle wie Glucose oder Aminosäuren aber nur schwer die Membran passieren können, sind Transportmechanismen für eine erleichterte Aufnahme oder zum Aufbau eines Konzentrationsgradienten als Kurzzeit-Energiespeicher notwendig. Dieser Vorgang erfolgt dabei als passiver oder aktiver Transport und könnte zur Entwicklung einer selektiv permeablen Hüllstruktur führen, die für unterschiedliche Moleküle mittels aktivem oder passivem Transport verschiedene Transportkonzepte zwischen dem Innen- und dem Außenraume eines Gebäudes ausbildet. Dabei erfolgt der Austausch meist ohne den Einsatz zusätzlicher Energie ergo ohne Einsatz von haustechnischen Geräten. Diese filternden und atmenden Hüllstrukturen könnten die Leistungsfähigkeit moderner Gebäudehüllen u.U. mit völlig neuen Ansätzen erweitern.

4.5.2 Allgemeine Beschreibung

Alle lebenden Zellen verfügen über eine zellwandartige Membran bzw. Plasmamembran, die die jeweilige Zelle umgibt und als halbporöse Sperre zu den umhüllenden Stoffen dient. Biomembranen sind Trennschichten zwischen den unterschiedlichen Bereichen innerhalb einer lebenden Zelle oder auch zwischen dem Zellaußenraum und dem Zellinnenraum (Zellmembran). Biomembranen trennen innerhalb der Zelle das Innere von Organellen oder die Vakuolen vom Cytoplasma. Die Biomembran dient jedoch nicht nur als passive Trennschicht, sondern spielt auch eine aktive Rolle beim Molekül- und Informationstransport von einer Seite zur anderen, wobei kleine Moleküle, wie z.B. Kohlendioxid, Sauerstoff und Wasser die Membrane frei passieren können und größere Moleküle, wie z.B. Aminosäuren, Zucker, sorgfältig kontrolliert und reguliert werden. Der wichtigste Bestandteil der Biomembran ist die Doppellipidschicht, deren Lipide unter anderem als Energiespeicher dienen. Die Lipidschicht besteht aus amphipolaren Molekülen, die aus einem hydrophilen und einem hydrophoben Teil gebildet werden. Der wasserlösliche kopfförmige hydrophile Teil bildet den äußeren Teil, die fettlöslichen, wasserunlöslichen hydrophoben Teil den inneren. Aufgrund ihrer amphipatischen Natur bilden die Lipide in wässrigen Lösungen entweder die Anordnung einer Micelle (vor allem in ionisierten Fettsäuren) oder die einer Membran, die meist aus Phospholipiden besteht [GOR-

TER & GREDEL 1925], aus (s. Abb. XX). Neben der Lipiddoppelschicht besteht eine Biomembrane aus Proteinen, deren Struktur aus vier Ebenen besteht. Die Primärstruktur eines Proteins ist seine Aminosäurefolge, die zuerst ein beta-Faltblatt ausbildet, das sich dann in eine alpha-Helix erweitert (Sekundärstruktur). Die Tertiärstruktur bezeichnet dann die dreidimensionale Struktur einer Aminosäurekette. Abhängig von ihrer Funktion, dienen die Proteine als Kanalproteine (Kanäle in der Membran) oder Carrier-Proteine (Pumpen).

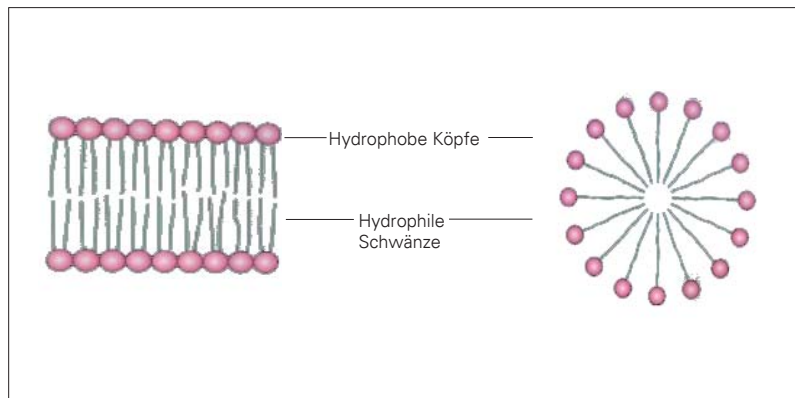


Abb. 4.5.3: Diagrammatische Darstellung einer Doppellipidschicht und einer Micellenform

4.5.3 Phänomenologische Betrachtung

In der unteren Darstellung werden der passive Transport entlang einem elektrochemischen Gradienten und der aktive Transport gegen einen elektrochemischen Gradienten verglichen. Die einfache Diffusion und der passive Transport laufen spontan ab, der aktive Transport erfordert die Zufuhr von Stoffwechselenergie. Nur durch die Carrier-Proteine wird ein aktiver Transport ermöglicht, wobei die Carrier-Proteine und die Kanalproteine eine erleichterte Diffusion vermitteln. Ein Kanalprotein durchquert vermutlich die Doppelschicht als wassergefüllte Pore, durch die jeweils bestimmte Ionen diffundieren können [SINGER & NICOLSON 1972].

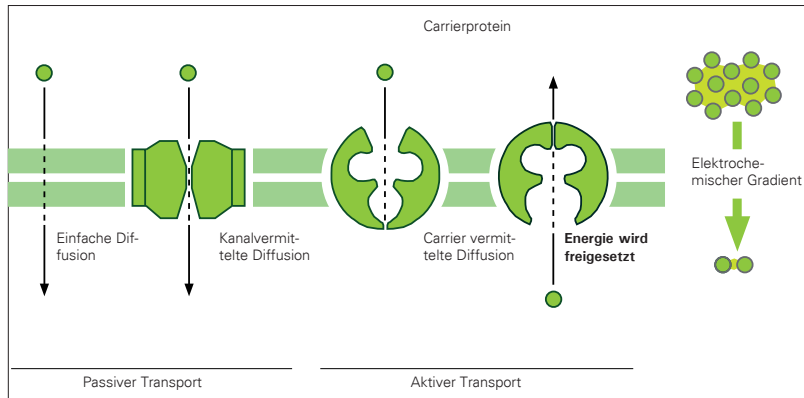


Abb. 4.5.4: Diagrammatischer Vergleich zwischen aktivem und passivem Transport

Beim passiven Transport überwinden die Moleküle die Zellmembran ohne jegliche Energiezuführung von außen oder von der Zelle in Richtung eines Konzentrations- oder Potentialgefälles. Der passive Transport ist nur ein Spezialfall der Diffusion, da hier auch größere Ionen und Moleküle, für die die Zellmembran sonst unüberwindlich ist, wie z. B.: Zucker, Aminosäuren oder Nukleotide, mit Hilfe von Membrantransport-Proteinen von einer Seite auf die andere Seite befördert werden. Für diesen Transport gibt es zwei Möglichkeiten: Den Ionenkanal und den Carrier. Bei der erleichterten Diffusion wird das Molekül von so genannten Carriern von einer Seite auf die andere Seite transportiert. Carrier sind dabei nur auf ganz bestimmte Moleküle spezialisiert, für die sie eine Bindungsstelle haben. Bei der Verbindung des Carriers mit dem Substrat, verändert der Carrier seine Konformation, wodurch das entsprechende Molekül durch die Membran geschleust und auf der anderen Seite wieder freigesetzt wird. Dabei ist jeder zu transportierende Stoff auf sein ihm entsprechendes Carrier-Protein angewiesen. Manche Carrier sind nur in der Lage ein Molekül auf einmal zu befördern (Uniport), andere haben Bindungsstellen für 2 verschiedene Moleküle. Diese ändern ihre Konformation erst dann, wenn beide Bindungsstellen besetzt sind. Der Transport erfolgt für beide Moleküle in der gleichen (Symport) oder in entgegengesetzter Richtung (Antiport). Im folgenden wird ein

hypothetisches Modell dargestellt, das zeigt, wie eine Konfigurationsänderung in einem Carrier-Protein die erleichterte Diffusion gelöster Moleküle bewirkt. Das Carrier-Protein kann in zwei Konfigurationen vorliegen. Im Zustand „pong“ sind die Bindungsstellen für die gelöste Substanz A auf der Außenseite der Doppelschicht zugänglich, im Zustand „ping“ liegen sie auf der Innenseite.

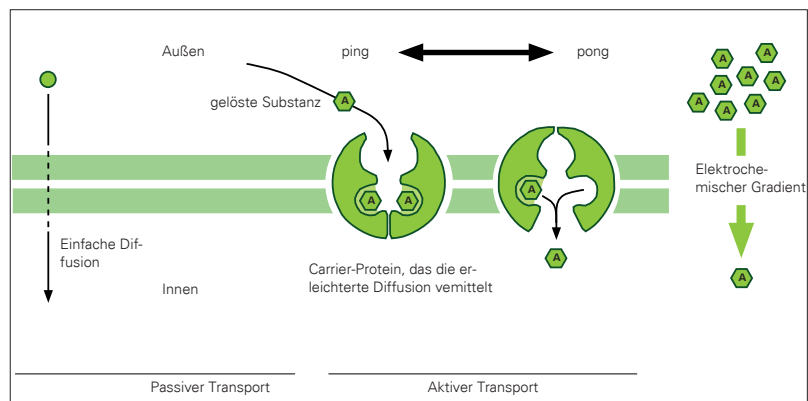


Abb. 4.5.5: Diagrammatische Darstellung eines Carrier-Proteins

Die Diffusion ist der Mechanismus durch den sich mikroskopische Partikel in Flüssigkeiten oder Gasen frei oder durch semipermeable Barrieren hindurch ausbreiten können. Grundlage der Diffusion ist die Brownsche Molekularbewegung. Dies basiert auf dem Prinzip, daß kleinste Teilchen stets versuchen sich gleichmäßig im vorhandenen Raum zu verteilen. Es herrscht dabei ein Nettofluss bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Die Diffusion ist passiv und unspezifisch. Sie bedient sich dabei eines Konzentrationsgefälle. Bei der freien Diffusion kommen dabei Kanäle zum Einsatz, von so genannten Tunnelproteinen gebildet werden und die die Membran ungeordnet durchspannen. Durch diese Kanäle können kleine polare oder geladene Teilchen wie Ionen in die Zelle gelangen, wobei ein Tunnelprotein nur für Ionen einer bestimmten Art oder Größe durchlässig ist. Erstaunlich ist dabei, daß sich die meisten Kanäle erst auf bestimmte Signale hin öffnen. Bei chemisch gesteu-

erten Kanälen fungieren z.B. Hormone als Botenstoffe und lösen diese Signale aus. Spannungsgesteuerte Kanäle reagieren hingegen auf eine mögliche Änderung des elektrischen Potentials. Mechanisch gesteuerte Kanäle auf Reize wie Druck oder Scherung.

Die Osmose ist die gerichtete Diffusion eines Lösungsmittels durch ein semipermeables Medium, das aus einem Bereich mit niedriger Konzentration hin zu einem Bereich mit hoher Konzentration des gelösten Stoffes erfolgt. Das semipermeable Medium ist dabei für das Lösungsmittel durchlässig nicht aber für den gelösten Stoff. Beim semipermeablen Medium handelt es sich häufig um eine Membran oder eine Scheidewand (Diaphragma). Osmotisch aktive Bestandteile in einer Volumeneinheit werden in [osmol/l] angegeben, wobei zwischen ionischen und nichtionischen Substanzen unterschieden wird. Bei nichtionischen Substanzen entspricht die Osmolarität der Molarität, bei ionischen Substanzen muss die Molarität zusätzlich mit der Anzahl der Ionen in einem Molekül multipliziert werden.

[Beispielrechnung: Eine 1 molare Glucose-Lösung entspricht 1 osmolar; eine 1 molare CaCl_2 -Lösung entspricht 3 osmolar (Beinhaltet drei Ionen pro Molekül CaCl_2)].

Bei der Osmose werden immer die Konzentration zweier Lösungen verglichen, wobei man als standardisierte Terminologie folgende Begriffe benutzt. Lösungen mit gleicher Konzentration gelten als Isotonisch, Lösungen mit höherer Konzentration als Hypertonisch und Lösungen mit niedrigerer Konzentration als Hypotonisch. Antriebskraft der Osmose ist der Ausgleich des sogenannten osmotischen Drucks. Teilchen aus der Lösung mit geringerer Konzentration diffundieren dabei in die Lösung mit höherer Konzentration. Der osmotische Druck einer Teilchensorte ist in etwa gleich dem Druck eines idealen Gases mit der Dichte einer Gasart. Das klassische Beispiel für den Nachweis des osmotischen Druckes ist das Eintauchen von roten Blutkörperchen in Lösungen mit unterschiedlicher Osmolarität. Das Blutserum ist dabei isotonisch und die roten Blutkörperchen bilden die Form eines bikonkaven Diskus aus. In einer Isotonischen Lösung (Serum) weisen die Blutzellen weiterhin die normale Form im Blutbild auf. Werden die Zellen hingegen mit Wasser verdünnt (Hypertonisch Lösung) verlieren sie ihre bikonkave Form (bei 200 Millionen Mols [mOs]). Ab 100mOs platzen viele Rote Blutkörperchen und hinterlas-

sen so genannte Gespenster, da nun Wasser in das Zellinnere eingedrungen ist. Eine konzentrierte Lösung aus NaCl (Hypotonische Lösung) in Verbindung mit dem Serum und mit den roten Blutkörperchen erhöht die Osmolarität. Bei Erreichen von 400mOs bis 500mOs fließt das Wasser aus den Zellen heraus. Die Zellen kollabieren.

Während beim passiven Transport die Moleküle die Membran eigenständig, dem Konzentrationsgefälle entsprechend und energielos überwinden, kann der aktive Transport auch gegen dieses Gefälle stattfinden, wobei nun Energie gebraucht wird. Besonders interessant ist hier, daß die Größe der Moleküle beim aktiven Transport unwichtig ist. Die für den Transport notwendige Energie wird in Form von ATP (Adenosintriphosphat) zur Verfügung gestellt, wobei es einen primären, einen sekundären und einen tertiären aktiven Transport gibt.

Beim primär aktiven Transport werden unter ATP-Verbrauch Protonen und anorganische Ionen mittels der sogenannten „Transport-ATP-Phasen“ durch die Zytoplasmamembran hindurch aus der Zelle herausgepumpt. In Pflanzenzellen z.B. wirken diese „H⁺-ATP-Phasen“ als Protonenpumpe, wobei ein Ion durch eine dieser Ionenpumpe von der Seite der niedrigeren Konzentration auf die Seite der höheren Konzentration gepumpt wird. Die Energie entstammt aus dem Hydrolyseprozess von ATP zu ADP (Adenosindiphosphat) und dem anorganischem Phosphat. Eine andere wichtige Anwendung für den primär aktiven Transport ist die „Natrium-Kalium-Pumpe“, ein in die Zellmembran integriertes Protein, das unter Verbrauch von ATP drei positiv geladene Natrium-Ionen aus der Zelle hinaus pumpt und parallel zwei ebenfalls positiv geladene Kalium-Ionen in die Zelle hineinpumpt. Dadurch wird das Ruhepotential in Nervenzellen (Neuronen) aufrechterhalten, das zur Erzeugung und Weiterleitung von Aktionspotentialen notwendig ist.

Der sekundär aktive Transport hingegen befördert ein Ion passiv entlang seines Konzentrationsgradienten und nutzt dabei die potentielle Gradientenenergie aus, um damit ein zweites Substrat gegen dessen Konzentrationsgradienten in gleicher Richtung (Symport, z.B. Natrium-Glukose-Symport im Dünndarm) bzw. in entgegengesetzter Richtung (Antiport, z.B. der Natrium-Kalzium-Antiport durch den Natrium-Kalzium-Austauscher) zu transportieren.

Beim tertiär aktiven Transport wird der Konzentrationsgradient genutzt, den ein sekundär aktiver Transport auf der Basis eines primär aktiven Transports aufgebaut hat. Durch diese Form des aktiven Transports werden im Dünndarm z.B. Di- und Tripeptide aufgenommen.

4.5.4 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Die funktionalen Abläufe innerhalb einer Zellstruktur und zwischen benachbarten Zellen sind mit den Abläufen einer Gebäudehülle durchaus vergleichbar. Die Transportmechanismen von Molekülen verschiedener Größe zwischen innen und außen, sind auch in der Gebäudehülle zu leisten, auch wenn dort gänzlich andere Mengen und Volumina ausgetauscht werden müssen. Die prinzipiellen Vorgehensweisen des aktiven und des passiven Transportes könnten jedoch bei näherer Betrachtung zu spezialisierten Funktionseinheiten einer Gebäudemembran führen, die gezielt für den Austausch spezieller Stoffe zuständig sind. Porenähnlich übernehmen sie den aktiven Transport von Duftstoffe, Gerüchen, Wassermolekülen etc. wobei der grundsätzlich Austausch von O² und CO² durch den passiven Transport durch den Hauptteil einer solchen Membran erfolgt, denn auch der prozentuale Anteil an den Durchdringungsmöglichkeiten einer Plasmamembran ist je nach Zelle, Zellart und Funktionsweise unterschiedlich. In Abb. 3.5.6 ist eine Übersicht der einzelnen Transportmöglichkeiten für eine membrananaloge Gebäudehülle dargestellt.

Lufthushalt	Lufterneuerung, Sauerstoffzufuhr, CO ₂ - Abtransport
Gerüche	Ausschluss von Gerüchen, gezielter Abtransport von störenden Gerüchen, gezielte Zufuhr von gewünschten Gerüchen
Luftschadstoffe	Ausschluss von Luftschadstoffen bei gleichzeitigem Abtransport der Schadstoffe von Innen nach Außen
Wasser	Regulierung des Feuchtigkeitsgehaltes der Raumluft bei gleichzeitigen Schutz vor Niederschlag
Wärme	Regulierung des Wärmehaushaltes, Schutz vor Überhitzung bzw. Auskühlung
Licht	Regulierung der Lichtzufuhr, Filterwirkung in Bezug auf einzelne Strahlungen und Strahlungsintensitäten

Abb. 4.5.6 : Beispiele für mögliche Filterwirkungen bei Fassaden

4.5.5 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Der hier vorgeschlagene Ansatz für eine selektiv permeable Hüllstruktur als Gebäudedefassade ist funktional der Wirkungsweise einer Biomembran nachempfunden. Für verschiedene Aufgaben des aktiven oder passiven Transportes gibt es verschiedene Arten von Öffnungen, Poren oder Düsen. In den Abbildungen XX-XX sind die verschiedenen Transportvorgänge auf einer Fläche proportional verteilt. So dient die Funktionsoberfläche der einfachen Diffusion von Sauerstoff, die Strukturoberfläche der einfachen Diffusion von Kohlendioxid, die Transportdüsen dem Aufbau eines Konzentrationsgefälles und die Poren dem Wassertransport. Ergo wäre das Phänomen der selektiv permeablen Zellmembranen als eine technische Umsetzung in Membrane mit steuerbaren Filterfunktionen denkbar. Durch Steuerung der Oberflächenspannung z.B. könnten Mikrofugen entstehen, die den Gasaustausch kontrollieren und als Zwei-Wege-Systeme fungieren. Durch den Einsatz der Filterwirkung für Sonnenstrahlen könnten Verschattungselemente für Gebäudehülle direktes und indirektes Licht filtern und dabei schädlich UV-Strahlungen ausblenden.

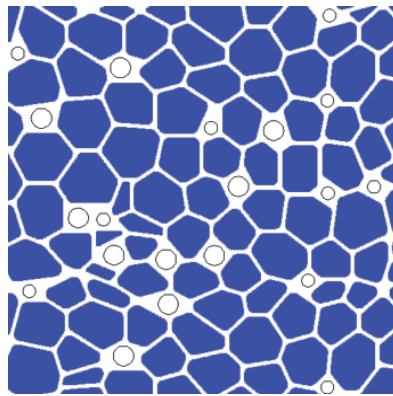


Abb. 4.5.7: Zeichnerische Darstellung der Funktionsfläche für die einfache Diffusion von Sauerstoff

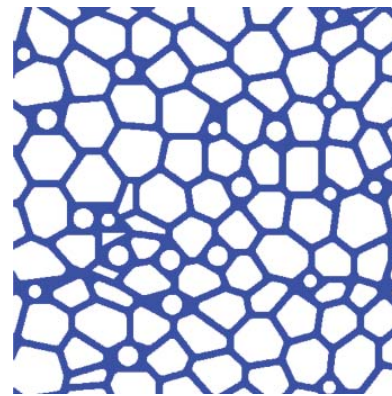


Abb. 4.5.8: Zeichnerische Darstellung der Funktionsbänder für die einfache Diffusion von Kohlendioxid

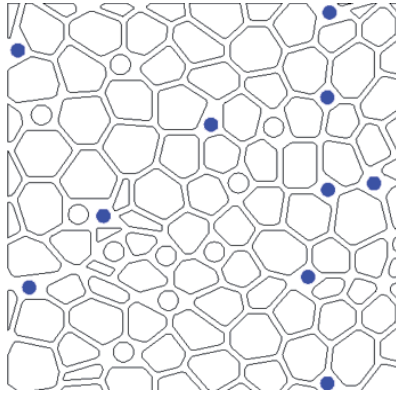


Abb. 4.5.9: Zeichnerische Darstellung der Funktionsdüsen für den Transport von Wasser

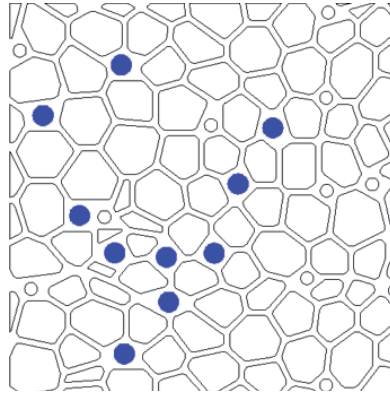


Abb. 4.5.10: Zeichnerische Darstellung der Funktionssporen für den Aufbau eines Konzentrationsgefälles

4.5.7 Resümee

Die hier angedachten Ideen für eine selektiv permeable Hüllstruktur versprechen gänzlich neue Ansätze für die Entwicklung multifunktionaler Ein- oder Mehrschicht-Hüllsysteme auf Basis der Funktionsweise einer Plasma- oder Biomembran. Schon 1981 wurde eine polyvalente Schichtwand durch Mike Davies angedacht, die optische Eigenschaften durch äußere Einflüsse wie Temperaturanstieg oder Sonneneinfallswinkel verändern konnte und aus den verschiedenen Schichtenkomponenten bestand (von außen nach innen): Silikat-Wetterhaut und Schichtenträger, Sensor- und Steuerungslogik außen, Photoelektrisches Gitter, Wärmestrahlende Schicht/selektiver Absorber, Elektroreflektierende Schicht, feinporige gasdurchströmte Schicht, Elektroreflektierende Schicht, Sensor- und Steuerungslogik innen, Silikat- und Innenhaut und Schichtenträger. Die aktuellen Probleme einer Umsetzung der oben angedachten Hüllstruktur liegen jedoch vorallem in der Nachbildung des aktiven Transportes von Molekülen und der Integration eines solchen Vorgangs in technisch herstellbare Membrane, die auch im Masstab eines Gebäudes verwendbar wäre. Hier liegt die Entwicklungsaufgabe vorallem in der Materialforschung und den Möglichkeiten Schichtträger im molekularen Bereich zu dotieren. Dennoch kön-

nen diese Ansätze auch in anderen und größeren Masstäben zu Initialzündungen neuartiger Konstruktions- und Funktionsweisen führen und nicht zuletzt auch eine neuartige gestalterische Komponente in die Fassadenausbildung integrieren, denkt man nur an den Interpretationsspielraum für „atmende“ oder „lebende“ Fassaden, den sich Architekten damit erobern können.

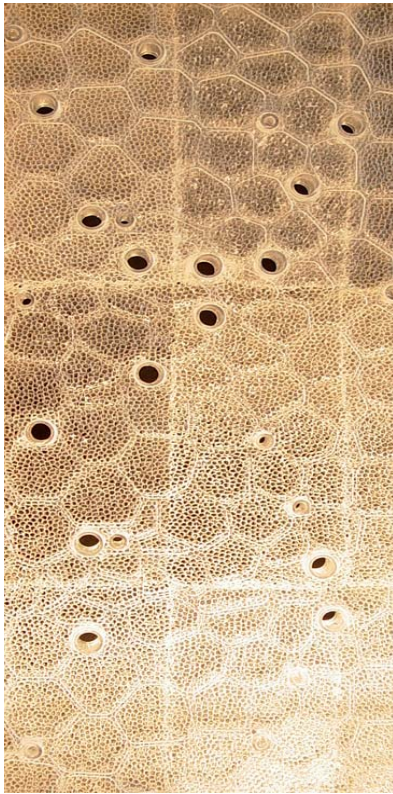


Abb. 4.5.11: Modellfoto permeables Fassadenelement



Abb. 4.5.12: Nahaufnahme des Strukturmodells

4.6 Autosensitive Leuchtbeschichtung

4.6.1 Inspiration

Die Fähigkeit verschiedener Lebewesen eigenständig oder mit Hilfe von Symbionten kaltes Licht zu emittieren, wird Biolumineszenz genannt. Erzeugt wird das kalte Licht durch die chemische Reaktion der Luziferase, die bei einem speziellen Stoffwechsel ausgelöst wird. Weltweit wird intensiv an der Übertragung des Lumineszenzvorganges für unterschiedliche Anwendungen wie z.B. als genetischer Reporter, als Toxizitätsnachweis von Gewässern und zur Überprüfung von Stoffwechselprozessen in der Medizin geforscht. Als völlig risikoarme Markierungsmethode innerhalb der Molekularbiotechnologie, wird sie als heißer Favorit zur Ablösung der radioaktiven Markierung gehandelt. Diese Wirkungsweise könnte in der Architektur zu einer Art Autosensitiver Leuchtbeschichtung führen, die als kaltlichtemittierende Bauteilkomponente durch sensorische Fähigkeiten z.B. vorhandene Temperaturschwankungen, den Ozongehalt der Luft oder den UV-Gehalt des einfallenden Lichtes messen kann. Dies würde neben dem technischen Vorteil u.U. auch zu völlig neuen Fassadenerscheinungen führen, Fassaden, die ihre Farbe am Tag und in den Abendzeiten je nach Kondition der Umgebung einstellen könnten.



Abb. 4.6.1: *Aequorea Victoria*

4.6.2 Biologische Klassifizierung

Domäne	Bakterien
Abteilung	Proteobacteria
Klasse	Gamma Proteobacteria
Ordnung	Vibrionales
Familie	Vibrionaceae
Gattung	Vibrio

Abb. 4.6.2: Biologische Klassifizierung der *Vibrio Harveyi*, *Vibrio Fischeri*

4.6.3 Allgemeine Beschreibung

Das Wort Biolumineszenz setzt sich aus dem griechischen *bíos* »Leben« und lateinisch *lumen* »Licht« zusammen. Dieses Phänomen basiert auf chemischen Prozessen, in denen freiwerdende Energie in Form von kaltem Licht abgegeben wird. Es handelt sich also um eine spezielle Form der bekannten Chemolumineszenz. Das von Lebewesen, seien es Tiere oder Pflanzen, erzeugte Licht hat dabei eine bläulich grüne Farbe mit einer Wellenlängen zwischen 440 und 479 nm. Es gibt dabei zwei wesentliche Unterschiede bei der Erzeugung des Lichtes. Erzeugt ein Lebewesen das Licht selbst, spricht man von „primärem Leuchten“. Erzeugt es das Licht mittels eines Symbionten spricht man von „sekundärem Leuchten“. Primäres Leuchten kann sowohl intrazellulär, also innerhalb von Zellen, oder extrazellulär durch Abgabe bestimmter Stoffe erfolgen.

Abgesehen von höhere Pflanzen- und Wirbeltierarten und einigen wenigen Fischarten findet man die Biolumineszenz bei fast allen Organismengruppen. Bei Insekten sind die bekanntesten Vertreter mit der Fähigkeit zur biolumineszenten Lichterzeugung die Leuchtkäfer (*Lampyridae*), die Leuchtschnellkäfer (*Cucujo*, *Pyrophorus*) und die Springschwänze (*Collembolen*). Bei den Pilzen (*Fungi*) z.B. sind vor allem der Hallimasch (*Armillaria*), der Ölbaumpilz (*Omphalotus olearius*) und einige Arten der Gattungen *Panellus*, *Pleurotus* und *Mycena* als biolumineszenzfähig einzustufen. Besonders häufige ist die Lumineszenz jedoch im Meer und hier besonders in der Tiefsee (bis zu 90% der Tiefseeorganismen sind biolumineszent). Aber auch in

Küstengewässern findet man dieses Phänomen bis zu einem Prozentsatz von ca. 5%. Zu den Vertretern der verschiedenen Gattungen der Tiefseefische gehören vor allem die Kopffüßer, wie der Vampirtintenfisch (*Vampyroteuthis infernalis*) oder die Wunderlampe (*Lycoteuthis*), die Kalmare (*Theutida*), die Leuchtkrebse (*Euphausiidae*), die Leuchtquallen (*Pelagia noctiluca*, *Aquorea victoria*, *Periphylla*), die Ringelwürmer (*Polychaeten*) und last but not least auch bestimmte Korallenarten (*Renilla reniformis*).

Darüber hinaus erzeugen einige im Meer lebende Bakterien des Stammes Proteobacteria unter bestimmten Lebensbedingungen Biolumineszenz. Die Gattung *Vibrio Harveyi* leuchtet eigenständig im Meerwasser während die Gattung *Vibrio Fischeri* eine Symbiose mit Leuchtfischen eingeht, z.B. mit den Angler- und Laternenfischen. Die biolumineszenten Bakterien findet man auch auf Fisch, Fleisch oder Eiablagen. Der *Vibrio fischeri* ist auch im Alltag leicht zu erkennen, wenn man z.B. einen frischen Salzhering einige Tage kühl aufbewahrt, beginnt er im Dunklen stellenweise zu leuchten.

Die Funktionsweise der Biolumineszenz ist in der aktuell geführten Debatte heftig umstritten. Man vermutet, dass es bei den ersten einzelligen Lebewesen ein Mechanismus war, um den für sie schädlichen Sauerstoff zu emittieren. Das Leben auf der Erde war vor ca. drei Milliarden Jahren anaerob, also sauerstofflos, geprägt. Es gab nur Gase wie Kohlendioxid, Stickstoff, diverse Edelgase sowie Schwefel- und Stickstoffoxide. Sauerstoff stellte für die bereits entwickelten Organismen ein Gift dar, welches ihre Stoffwechselprozesse zerstörte oder zumindest stark behinderte. Vor ungefähr zweieinhalb Milliarden Jahren entwickelten sich dann Organismen, die in der Lage waren photosynthetische Prozesse zu etablieren. Da diese Lebewesen, quasi als Abfallprodukt, durch die Photosynthese auch Sauerstoff in die Atmosphäre abgaben, bedrohten sie die Stoffwechselsysteme der bereits existierenden Lebensformen durch eine nun erstmals mögliche Oxidation. Die anaeroben Organismen entwickelten daraufhin neue Überlebensstrategien, wie z.B. das schädliche Gas gleich im Zellinneren der Organismen zu vernichten. Ein Nebeneffekt dieser Strategie ist die Biolumineszenz, die sich bei einigen Lebewesen bis in die heutige Zeit etabliert hat. Die Natur hat diesen Vorgang als Erfolgsmodell der Evolution beibehalten und mit einem anderen Nutzen versehen, denn heute dient die Bio-

lumineszens, soweit man das bis dato erforscht hat, vielfach anderen Zwecken wie z.B. der Werbung bei der Partnersuche (Gravidität), der Kommunikation unter Artgenossen, als Warn- und Drohfunktion und natürlich zur Tarnung und zum Ködern von Beute.

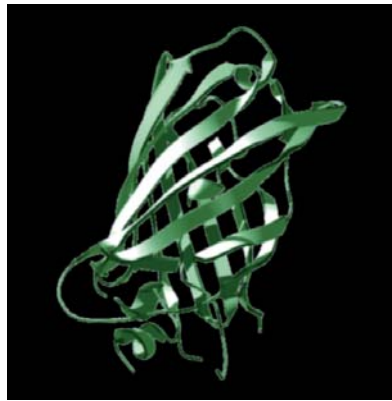


Abb. 4.6.3: Struktur des Grün-fluoreszierenden Proteins (GFP)



Abb. 4.6.4: Qualle „Aequorea Victoria“

4.6.4 Phänomenologische Betrachtung

Eine besondere Art der Lumineszenz ist die Fluoreszenz, bei der bestimmte Farbstoffe mit UV-Licht bestrahlt werden, das Licht dann absorbieren und mit einer längeren Lichtwelle zurückstrahlen. Das Grün-Fluoreszierende-Protein (GFP), wurde erstmals bei der blau-grün leuchtenden Qualle *Aequorea Victoria* entdeckt und isoliert. Das molekular speziell gefaltete GFP wird durch UV-Licht angeregt, wobei die seitlichen Ketten vom im Protein vorhandenen Serin-, Tyrosin- und Glycerinreste reagieren miteinander reagieren. Während dieses Vorhangs gelangt ein Elektron von einem niedrigen in einen höheren Energiekreislauf, wo es sich kurz halten kann, bevor es wieder in seinen ursprünglichen Kreislauf zurückspringt. Dabei wird die überschüssige Energie via längerer Lichtwellen abgegeben. Diesen Vorgang erkennen

wir dann als kaltes Licht. Erstaunlich ist jedoch, daß die Qualle *Aequorea Victoria* auch und gerade in extrem lichtarmen Gewässertiefen in der Lage ist ein Leuchten zu erzeugen. Unter diesen Bedingungen erzeugt das Tier quasi eine Grundstimulation durch eine chemolumineszenten Prozess, der das GFP wiederum anregt und grünes Licht zurückgestrahlt. Die Lichtanregung durch den die chemolumineszenten Vorgang erfolgt in Wellenlängen bis zu 475 nm, also im violetten bis blauen Farbbereich. Die Lichtemission dagegen liegt bei 509 nm und somit im grünen Farbbereich.

Durch intensive Forschungen in der Biologie und der Medizin, bei denen das Protein derzeit als Zellen- und Genmarker genutzt wird, wurde das GFP auf andere Proteine übertragen und damit replikabel gemacht. Dabei wird die DNA eines Proteins mit der GFP-DNA verknüpft, von der Zelle mitaufgenommen und anschliessen selbstständig reproduziert. Markiert durch das Leuchten kann man die Entwicklung der Zelle mit bloßem Auge verfolgen. Entscheidender Vorteil des GFP bei dieser Verwendungsstrategie ist die Tatsache, dass fast keine eukaryotischen Zellen vorkommen, die durch die Kombination mit dem GFP beeinträchtigt werden könnten. Daher kann das GFP die normale Entwicklung der lebenden Zelle mitverfolgen. Besonders einfach und daher häufig verwendet ist der Bakterienstamm *Escherichia Coli*.

Für den Transfer des GFP Proteins in eine bakterielle Zelle gibt es derzeit zwei Möglichkeiten. Zum einen die Verwendung springender Gene (Transposonen) und zum anderen der Einsatz von Klonierungsvektoren. Bei der ersten Variante werden die Transposonen innerhalb eines Transportplasmids mit dem GFP-Gen gekoppelt, wobei sich die Transposonen im Plasmid der Bakterienzellen nicht etablieren können nach und nach aufgelöst werden. Zurück bleibt das GFP, das jedoch bei dieser Technik innerhalb der Bakterienzelle keine überlebenswichtigen Funktionen übernimmt und ergo nicht weitervererbt wird. Der Betrachtungszustand ist also bei Variante 1 deutlich beschränkt. Bei der zweiten Variante kommen Klonierungsvektoren zum Einsatz, die gemeinsam mit dem GFP im Zellplasmid etabliert werden. Diese Klonierungsvektoren können für die Zelle wichtige Informationen wie z.B Resistenzen gegen Schadstoffe in sich tragen. Der Trick ist nun die Kulturen mit diesen Schadstoffen zu konfrontieren und damit eine Weitervererbung zu erzeugen.

In der weiter unten erarbeiteten Tabelle (Abb. XX) wurden die Eigenschaften unterschiedlicher Bakterienstämme nebeneinander aufgelistet und mit den bereits untersuchten *Vibrio Fischeri* und *Vibrio Harveyi* verglichen. Die Temperaturoptima liegen in sehr unterschiedlichen Bereichen, wobei bis auf die *Escherichia Coli* die Lebensgrundlage der Meerwasserlösung auf alle Spezies zutrifft. Allerdings liegen die pH-Werte teils deutlich auseinander.

Bakterien	Cyanobakterien	Purpurbakterien	Vibrio Fischeri/Vibrio Harveyi	Escherichia Coli
Domäne	Bakterien	Bakterien	Bakterien	Bakterien
Stamm	Cyanobakterien	Proteobacteria	Proteobacteria	Proteobacteria
Ordnung	Oscillatoriales		Vibrionales	Enterobacteriales
Eigenschaften	Phototroph aerob oxygene Photosynthese: Sauerstoff entsteht	Phototroph aerob anoxygene Photosynthese: kein Sauerstoff entsteht, elementar für die Wasserstoff- produktion	Chemotroph fakultativ aerob (mit und ohne Sauerstoff für Stoffwechsel)	Chemotroph fakultativ aerob Nahrung: Zucker und Aminosäuren Teilt sich alle 20 Minuten unter opt. Bedingungen
Lebensumfeld	Aerobe Zonen von Süß- und Salzwasser (Artenabhängig)	Aerobe Zonen von Süß- und Salzwasser (Artenabhängig)	Meerwasser oder künstliches Meer- wasser	Menschlicher und tierischer Darm, Glycerinlösung; Säuren und Salz sind schädlich
Lichtansprüche	Schwachlichtbereiche	Opt. Wellenl. 600 nm Intensität 500-800 W/m ²	Tiefes und flaches Meerwasser, Lumi- neszenz, sauerstoff- abhängig	keine
Temperatur	Optimal 40 - 50 °C (Spirulina), unter 0°C schädlich	Optimal 30-40°C, unter 0 und über 40°C schädlich	Optimal 25-28°C, unter 0 und über 40°C schädlich	Optimal 37°C, unter 0 und über 40°C schädlich
pH-Werte	Spirulina 9-11	7,4 +/- 0,2	6,8 – 7,5	7,0
Lichtwellenlänge	Mit GFP: Grün, 509 nm	Mit GFP: Grün, 509 nm	Blau-grünes Licht, 495 nm	Mit GFP: Grün, 509 nm
GFP Transfer	Grundsätzlich möglich	Grundsätzlich möglich		bereits angewendet

Abb. 4.6.5: Vergleich verschiedener Bakterienarten

4.6.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Die Fähigkeit äußere Umgebungseinflüsse sensorisch zu erfassen und zudem kaltes Licht zu erzeugen, könnte im Fassadenbereich für innovative Impulse bei der

Funktionalität und Gestaltung moderner Gebäudehüllen sein. Abseits des gestalterischen Potentials, bei dem sich Farbe, Opazität oder Struktur einer Gebäudehülle in Abhängigkeit der Umgebung ändern würden, ist auch der sensorische Ansatz verfolgenswert. Diese multifunktionale Anwendung greift Themen wie Health Monitoring oder die Fähigkeit zur Selbstreparatur auf, Funktionen, denen sich Fassaden von Morgen früher oder später stellen werden müssen.

4.6.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Ein erster Ansatz wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie in Vaihingen und freundlicher Unterstützung von Herrn Prof. Sprenger der Prototyp eines Fassadenmoduls entwickelt, das im Zwischenraum zweier Plexiglas-scheiben eine Meerwasserlösung mit einer hohen Konzentration von *Vibrio Fischeri* (VB) enthielt. Zur Reaktivierung der VB-Kolonien musste zu Beginn eine Nährlüssigkeit hergestellt werden, in der die Mikroorganismen überleben konnten. Dazu wurde artifizielles Meerwasser benutzt, das die Lebensgrundlage der Bakterien bildet. Unter Zugabe der Nährlüssigkeit war nach drei Tagen die benötigte Menge der mit Leuchtbakterien durchsetzten Nährlüssigkeit vorhanden.



Abb. 4.6.6: Petrischale mit Kolonien von *Vibrio Fischeri*



Abb. 4.6.7: Prototyp eines Fassadenelements

Das Exponat besteht aus zwei Acrylglasplatten mit 10 mm Scheibezwischenraum und einer seitlich geführten perforierten Acrylglasröhre. Diese kann mit Sauerstoff durchströmt werden und gewährleistet eine permanente Zufuhr. Nach kurzer Zeit wurde das bläuliche Licht schwach erkennbar und durch Steigerung der Sauerstoffzufuhr immer deutlicher. Ohne Probleme konnte man aus unmittelbarer Nähe das Ziffernblatt einer Uhr ablesen.

Ein nächster Schritt in Richtung einer möglichen Anwendung des beschriebenen Exponats als Fassadenmoduls in der Gebäudehülle ist die Weiterentwicklung des Prototypen zu einem medialen Fassadenelement, das durch sensorische Leistung seinen umgebenden Einflüssen Ausdruck verleihen kann. Dazu wurde recherchiert, welche Reaktionen die Bakterien auf ihre umgebenden Einflüsse ausführen könnten. Ziel ist das selbst leuchtende Fassadenelement zu einem biolumineszenten Sensor weiterzuentwickeln, der z.B. die Temperatur eines Fassadenelementes darstellt. Wie empfindlich dieser Sensor dabei reagiert und man diese tatsächlich mit dem bloßen Auge sehen, muss an einem weiteren Prototypen getestet werden.

Eigenschaften	<i>Vibrio Fischeri/Vibrio Harveyi</i>
Domäne	Bakterien
Stamm	Proteobacteria
Ordnung	Vibrionales
Eigenschaften	chemotroph, fakultativ aerob (mit und ohne Sauerstoff für Stoffwechsel), Gram-negativ, Bewegung durch Geißeln sind halophil (überleben in Salzwasser) und lysieren (lösen sich auf) in hypotonischen (schwächer konzentrierten) Lösungen, gekrümmte Stäbchen, Lumineszenz sauerstoff-abhängig
Lebensumfeld	Meerwasser oder künstliches Meerwasser
Lichtansprüche	Tiefsee
Temperatur	Optimum bei 25-28°C, unter 1°C und über 40°C schädlich
pH-Wertbereich	6,8 – 7,5
Lichtwellen	Blau-grünes Licht mit Wellenlänge von 495 nm, Vorgang der Luciferase ab einer Dichte von 10e8 cells/ml

Abb. 4.6.8: Eigenschaften von Vibrionen

Das Konzept dahinter sieht folgende „Schaltzustände“ vor, wobei die optisch sichtbare Reaktion der Bakterienkultur aus drei möglichen Zuständen besteht: Die klare

Sicht heißt, die Populationsdichte ist sehr gering, die milchige Sicht bedeutet eine hohe Populationsdichte, jedoch noch keine Ausbildung der Lumineszenz, das milchig bläuliche Licht zeigt eine sehr hohe Populationsdichte unter Aktivierung des Lumineszenzvorganges. Wenn dieser Temperatursensor jedoch nur mit der Gattung *Vibrio Fischeri* oder *Vibrio Harveyi* konfiguriert ist, zeigt er nur in einem bestimmten Temperaturspektrum eine starke Lumineszenz. Dies ist eine klare aber recht eingeschränkte Sensorfunktion. Daher wäre interessant über eine Verschiebung der sensorisch erfassbaren Wellenlängen nachzudenken, die bei unterschiedlichen Außentemperaturen ihre Länge ändern und somit in der Lage wären eine farbliche Veränderung herbeizuführen. Der nächste logische Schritt ist also eine andere Bakteriengattung mit dem grün fluoreszierenden Protein so anzureichern, daß diese auf andere Temperatureigenschaften reagiert, eine Art sensorische Züchtung. Je nach Temperatur der Umgebung leuchtet das Fassadenelement dann blau oder grün. Dies immer völlig energielos, wartungsfrei und biologisch abbaubar.

Ein Ansatz wird nun mit der Kombination aus *Vibrio Harveyi* (VH) und *Cyanobakterien* weiterverfolgt, zwei Bakterienstämme, die im Salzwasser überlebensfähig sind und deren Nährstoffzusammensetzung ist auf Grund des gleichen Lebensraums ähnlich ist. Da diese beiden jedoch gänzlich unterschiedliche pH-Werte benötigen, wurde ein 2x2-Scheiben-Sensor entwickelt, wobei die *Cyanobakterien* im äußeren Scheibenzwischenraum und die *VH* im inneren Scheibenzwischenraum angeordnet sind. Dies basiert auf der Überlegung die sensibleren *VH* vor zu großer Hitzebelastung zu schützen. Weiter kann man davon ausgehen, dass ab einer gewissen Dichte der Bakterienpopulation die Strahlung des gesamten Spektrums absorbiert wird, da es sich bei Bakterienzellen um opake Oberflächen handelt. Diese dichten Populationen bilden dann eine Art Biofilm, der im Scheibenzwischenraum zu einer milchigen Flüssigkeit führt. Da die Bakterienkultur im Frühjahr und Sommer bei steigenden Temperaturen wächst, wird auch das Fassadenelement mit zunehmender Einstrahlung zunehmend transluzent bis gänzlich opak. Somit kann angenommen werden, dass sich der g-Wert des Fassadenelements vom Winter zum Sommer hin verändert. Dies hätte durch die Wirkung als jahreszeitlicher Sonnenschutz eine positive Auswirkungen auf die Energiebilanz der Gebäudehülle.

Ausgebildet ist der Prototyp wie eine flächiges Fassadenelement, das je nach Tem-

peratur graduell von transparent zu milchig-blau zu milchig-grün wechselt und bei hohen Temperaturen die Funktion eines Sonnenschutzes übernimmt. Bei Außentemperaturen von 25°C bis 30°C bleibt der äußere Scheibenzwischenraum klar, während die Bakterien des inneren wachsen und lumineszieren. Bei Außentemperaturen von 35°C bis 45°C wachsen die Äußeren und schützen gleichzeitig den inneren Scheibenzwischenraum vor extremen Temperaturen. So lumineszieren an heißen Sommertagen beide Schichten und man kann von außen die grüne Fluoreszenz und von innen die blaue Biolumineszenz erkennen.

4.6.7 Resümee

Da die Ausbildung der Lumineszenz extrem empfindlich auf ihre Umgebungssituationen reagiert, werden Leuchtbakterien seit mehr als zehn Jahren zur Messung der Toxizität von Wasserproben eingesetzt, denn schon bei leichtesten Verunreinigungen der Wasserqualität stellen sie innerhalb kürzester Zeit das Leuchten ein. Organismen, die biolumineszieren sind weltweit ein begehrtes Forschungsobjekt, in der Gentechnik z.B. wird das Luziferasesystem als genetischer Reporter benutzt, in der Lebensmitteltechnologie werden Leuchtbakterien zum Nachweis von Toxinen eingesetzt, in der Ökotoxilogie zur Erkennung mangelhaften Fleisches, in der Medizin zur Verfolgung komplexer Stoffwechselprozesse, wobei hier die Biolumineszenz als völlig risikoarme Markierungsmethode der Molekulartechnologie dient und die bei weitem gefährlichere radioaktive Markierung ablösen soll. Auch in der Industrie wird die Struktur des kalten Lichtes und anderer Organe, die in der Lage sind biolumineszente Organismen zu produzieren erforscht. Dort gibt es bereits Anwendungsvorschläge für biolumineszente Weihnachtsbäume, die kein elektrisches Licht benötigen, biolumineszent glühende Bäume als Begrenzungsmarkierungen an Straßen oder der Einsatz von Lumineszenz als Sensor auf Getreide, das leuchtet, wenn es gewässert werden muss oder durch Schädlingen befallen wurde. Auch Anwendungen in der Strömungsforschung werden derzeit diskutiert, hier sollen Dinoflagellaten zum Nachweis von Turbulenzen eingesetzt werden. Auch hört man vor allem aus japanischen Forscherkreisen von der Entwicklung biolumineszenter selbstleuchtender Monitore, die naturgemäß so gut wie keinen externen Stromverbrauch benötigen. Zur Einschätzung einer Umsetzung für die im Vorfeld

angesprochene Autosensitiver Leuchtbeschichtung müssten in weiterführenden Untersuchungen vor allem geklärt werden, wie lange man die Bakterienkultur im Scheibenzwischenraum bei konstanter Nährstoffzufuhr am Leben erhalten kann, wie schnell sich die unterschiedlichen Populationen bei optimalen Bedingungen durch Zellteilung vermehren könnten und welche genaue Dichte notwendig ist, damit das Leuchten dauerhaft mit dem bloßen Auge erkennbar wird. Des Weiteren muss erarbeitet werden, wie sich diese Faktoren auf die Sichtbarkeit der Lumineszenz als Sensorfunktion auswirken und wie schnell die Zu- und Abnahme der Population bei Veränderung der Umgebungstemperatur erfolgt. Davon hängt ab, ob der Sensor eher als Thermometer, als Tag-Nacht-Amplitudenmesser oder wie ein Jahreszeitenbarometer funktionieren könnte. Ein erster Schritt wäre sicherlich die Erstellung eines Diagrammes mit den Parametern Lichtintensität in Abhängigkeit der Populationsdichte und der Temperatur sein.

Man kann davon ausgehen, daß die bakterielle Lumineszenz bei starker Sonneneinstrahlung nicht gut zu erkennen sein wird, da sie durch das eintreffende Sonnenlicht überleuchtet wird. Spannend wäre also, in welchem Zeitraum die Bakterien bei sinkenden Temperaturen ihre Beleuchtungsstärke verringern, denn hält die Leuchtkraft einige Stunden nach, würde sie an Frühlings-, Sommer- und Herbstabenden eine verzögerte Lumineszenz ausbilden. ein Vorteil für ihre Verwendung nach ästhetischen Gesichtspunkten. Interessant wäre auch die Vorstellung, die chemische Reaktion synthetisch nachzuempfinden, zum Beispiel durch Aufbringen von Biofilmen der beiden synthetisierten Enzyme.

4.7 Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem

4.7.1 Inspiration

In der Natur finden wir immer wieder erstaunliche Lösungsansätze für Problem-bereiche, denen wir uns bei der Beschäftigung mit Gebäudehüllen ebenso stellen müssen. Ein besonders effizientes Hüllensystem stellt dabei die Haut, oder besser die Zusammensetzung aus mehreren Schichten zu einem Fell, verschiedener Rob-benarten dar, die unter extremsten Bedingungen nicht nur unterschiedliche Körper-volumen ausbilden können, sondern durch einen intelligenten Einsatz von Energie-wandlung einen nahezu unwirklichen Lebensraum bewohnen können. Sie verfügen über eine Art Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem.

Dieses *Rete Mirabile*, oder auch Wundernetz genannte, Wärmeaustauschsystem ist in Kombination mit einer variierenden Wärmedämmschicht und der fellartigen Struktur der Haut eine ausgezeichnetes thermoregulierendes Mehrschichtsystem, das die wesentlichen Faktoren wie Wärmestrahlung, Wärmeleitung (Konduktion) und Verdunstung (Transpiration) bestimmt.

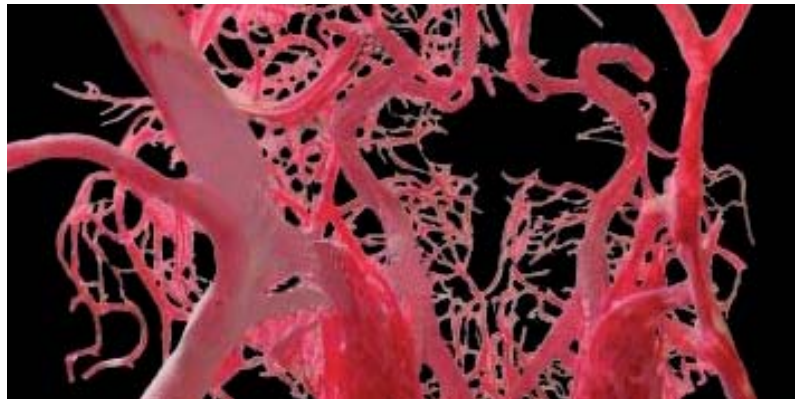


Abb.4.7.1: Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines *Rete Mirabile*

4.7.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Überabteilung	Kiefermäuler	<i>gnathostomata</i>
Klasse	Säugetiere	<i>mammalia</i>
Ordnung	Raubtiere	<i>carnivora</i>
Familie	Hundeartige	<i>canoidea</i>
Gattung	Robben	<i>pinnipedia</i>

Abb. 4.7.2: Biologische Klassifizierung der Robben

4.7.3 Allgemeine Beschreibung

Die drei verschiedenen Familien der Robben spalten sich in 18 Gattungen und 34 Arten auf. Die Hundsrobber (*phocidae*) bestehen aus 10 Gattungen, 19 Arten und zwei Unterfamilien (nördl. Hundsrobber und Mönchsrobber), die Ohrenrobber (*otariidae*) unterteilen sich in 7 Gattungen, 14 Arten und ebenfalls zwei Unterfamilien (Seelöwen und Seebären) und die dritte Familie bilden die Walrosse mit einer Gattung und einer Art.

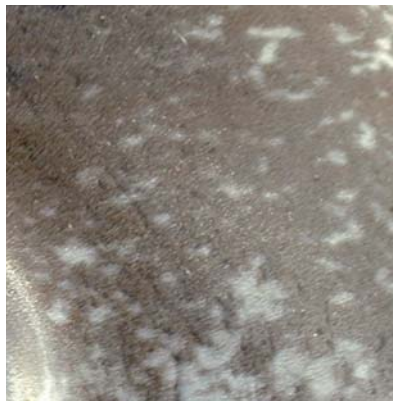


Abb. 4.7.3: Robbenfell in einer Nahaufnahme



Abb. 4.7.4: Robbe

Äußere Erscheinungsmerkmal ist der massige, spindelförmige Körper, der mit glatthaarigem Fell bedeckt ist. Der Hals ist zum Körper ein wenig abgegrenzt und die größten Teile der Extremitäten (Penis, Hoden, Milchdrüsen) sind im Körperinneren versenkt. Die Flossen der Robben enden in fünf Zehen, die durch eine Schwimmhaut miteinander verbundenen sind, wobei die Vorderflossen durch fettreiches Bindegewebe verbunden sind und die Hinterflossen durch Schwimmhäute. Am deutlichsten unterscheiden sich die Ohrenrobben (*Otariidae*) von den Hundsrobben (*Phocidae*) durch ihre nackten Flossen und Ohrmuscheln. Die Hundsrobben haben Fell an den Flossen, die ihnen zugleich als Ohrmuscheln dienen. Dabei sind ihre Hinterfüße nach hinten gerichtet, wodurch sich unterschiedliche Fortbewegungsarten ergeben. Die Ohrenrobben und Walrösser (*odobenidae*) können dagegen ihre Hinterfüße nach vorne drehen und „schreiten“. Die *Phocidae* bewegen sich durch ihren Hinterkörper fort, die *Otariidae* mit den Vorderflossen.

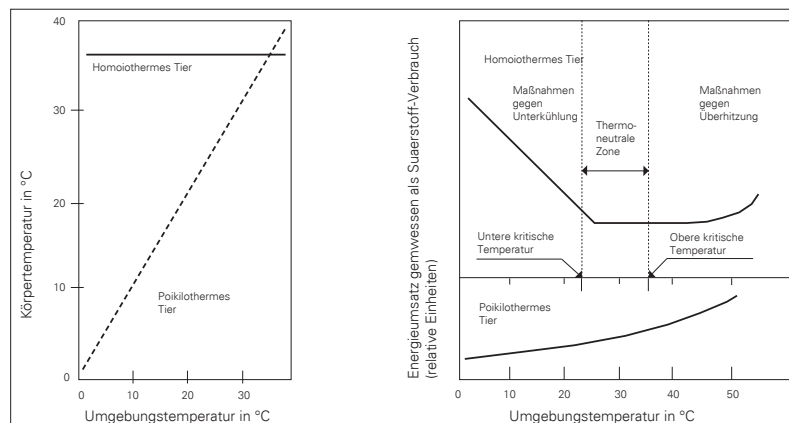


Abb. 4.7.5: Körpertemperatur in Bezug zur Umgebungstemperatur

Abb. 4.7.6: Energieumsatz Homoiotherme-Poikiotherme

Nach der Bergmannschen Regel [BERGMANN, 1847] passt sich die Körpergröße eines Tieres jeweils der Region und deren Temperaturniveau an. Die Bergmannsche Regel beschreibt, daß innerhalb einer systematischen Gruppe die homoiother-

men Tiere, also die eigenwarmen Tiere wie Vögel und Säugetiere, in kälteren Regionen zu größerem Wachstum neigen als ihre Artgenossen in wärmeren Regionen. Dies ist einfach nachvollziehbar, da ein größeres Tier bei gleicher Körperform ein effizienteres A/V Verhältnis aufweist als sein kleinerer Verwandeter und damit der Wärmeverlust relativ zum Körpervolumen geringer ausfällt. Auch rechnerisch ist dies einfach zu erklären, da bei zunehmender Größe die Oberfläche quadratisch zunimmt und das Volumen mit einer Potenz mehr kubisch zunimmt. Daher sucht man in kalten bis sehr kalten Regionen vergeblich nach sehr kleinen Säugetieren.

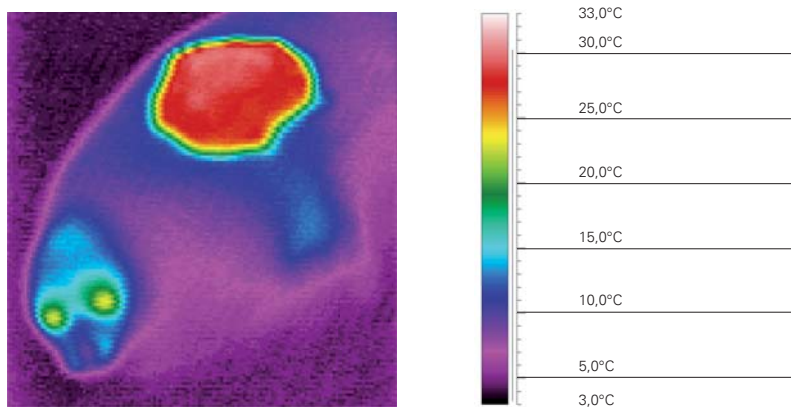


Abb. 4.7.7: Thermografische Aufnahme einer liegenden Robbe mit Angabe der Kerntemperatur

Der Wärmeaustausch bei Robben wird im Wesentlichen durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung (Konduktion) und Verdunstung (Transpiration) bestimmt. Homoiothermen Säugetiere benötigen eine konstante Körpertemperatur zwischen 36,5°C und 37,5 °C. Zur Vermeidung einer Überhitzung oder einer Unterkühlung hat die Natur verschiedene Strategien entwickelt, die es den Säugetieren ermöglicht ihre Körpertemperatur konstant zu halten. Z.B. das Ändern der Durchblutung, das Kälte- oder Muskelzittern, die zitterfreie Wärmebildung, bei der das braune Fettgewebe wie ein Ofen wirkt, das Aufrichten der Fellhaare, der Haarwechsel im Winter und Sommer, das Schwitzen oder das Verlagern des Lebensraumes in behaglichere Regionen. Die Organe im Kerntemperaturbereich des Tieres bilden dabei mit einem

Energieumsatz von 70% lediglich 8% der Körpermasse. Der Energieumsatz der Muskulatur und der Haut, die 52% der Körpermasse ausmachen, liegt dagegen bei lediglich 18%. Der Körperkern ist ein nicht fest umrissenes Gebiet und hängt von der Umgebungstemperatur ab, sein größter Wärmeverlust erfolgt über die Haut. Die Haut oder besser das Fell spielt also bei der Thermoregulierung eine entscheidende Rolle, daher widmet sich der folgende Inhalt diesem Themenbereich.

Die gesamte Haut der Robben heißt *Cutis* und besteht aus der Oberhaut (*epidermis*), der Lederhaut (*dermis*) und der Unterhaut (*subcutis*). Die Haut selbst übernimmt dabei alle Grenzschichtaufgaben zwischen dem Tier und seiner Umgebung. Anhangsorgane, wie z.B. die Haare, unterstützen darüber hinaus die Aufrechterhaltung der konstanten Körpertemperatur als justierbare Konvektionsschichten. Neben den Haaren gehören auch die Nägel, die Talg- und Schweißdrüsen und die Milchdrüsen zu den Anhangorganen. Auch das Fettgewebe unterhalb der Haut spielt eine wichtige Rolle bei der konstanten Regulierung der Körpertemperatur. Bei Jungtieren ist diese Schicht besonders wichtig, sie haben an bestimmten Körperstellen von Geburt an ein spezielles braunes Fettgewebe, das sie vor dem Erfrieren schützt, während ihr Fell noch nicht vollständig ausgebildet ist. Bei erwachsenen Tieren kommt dieses Spezialfett nicht mehr vor.

Auch wenn sich die Felle unterschiedlicher Robbenarten nach Länge, Dicke und Form des Fells unterscheiden, findet man generell zwei Arten von Haaren, zum einen die Deckhaare, die eine äußere Schutzschicht bilden und zum anderen die Wollhaare, eine darunterliegende Schicht aus feineren Haaren. Ähnlich wie bei Vögeln werden die Haare mittels Talgdrüsen in der Epidermis gefettet und bilden ein wasserundurchlässiges Fell. Gewechselt wird das gesamte Fell einmal im Jahr, wobei der Fellwechsel nicht überall gleichzeitig beginnt, sondern sich den klimatischen Bedingungen anpasst. Das Winterfell ist dabei meist etwas länger und deutlich dichter. Dies führt zu einer dickeren ruhenden Luftschicht zwischen dem Deck- und dem Wollhaar, die eine gesteigerte Isolationsfähigkeit aufweist als das Sommerfell. Z.B. etablieren Pelzrobber in ihrem sehr dicht eingefetteten Wollhaar Luftschichten, mit denen sie sich theoretisch 2 Jahre im Wasser aufhalten könnten ohne tatsächlich „nass“ zu werden. Ein zusätzlicher Mechanismus zur Regulierung des Temperaturhaushaltes ist das gezielte Aufstellen der Fellhaare mittels der Haarmuskeln.

Durch die graduelle Ausrichtung der Deckhaare wird die Luftschicht, ergo die Isolation, in ihrer Dicke gezielt gesteuert. Unterstützt wird dies darüber hinaus durch die Orientierung des Körpers zur Hauptwindrichtung. Wird die Fellrichtung in den Wind gedreht, wärmt sich das Tier, richtet es sein Fell gegen den Wind aus, durchlüftet das Tier sein Fell und kühlt damit den Körper herunter.

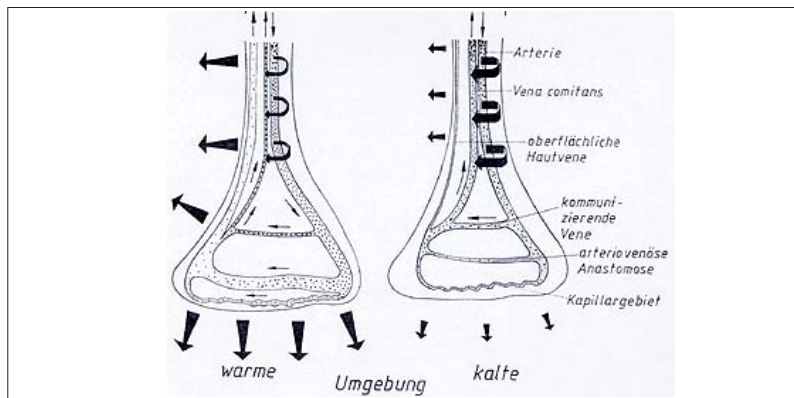


Abb. 4.7.8: Schema zur Durchblutung einer Extremität bei kalter und warmer Umgebung

Im Bereich des thermischen Fensters (s. Abb. 4.4.7) ist das Temperaturgefälle zur Luft größer als an anderen Körperstellen. Die gute Isolation zeigt sich daran, dass die Robben nicht in Eis oder Schnee einschmelzen. Wenn die Tiere auf dem Eis liegen, kontrahieren sich die Blutgefäße in der Haut und in der Speckschicht, so dass nur soviel Blut zirkuliert, dass die Haut auf einer Temperatur von 1°C gehalten wird.

4.7.4 Phänomenologische Betrachtung

Die im Vorfeld beschriebenen Tiere sind, ähnlich wie bestimmte Gänse- und Entenarten, in der Lage ihre Durchblutung und damit ihren Wärmehaushalt durch ein aus-

geklügeltes Gegenstromaustauschsystem zu steuern. Dies geschieht primär durch eine Verengung von Blutgefäßen (*Vasokonstriktion*) oder eine Erweiterung von Blutgefäßen (*Vasodilatation*). Diese sogenannte *Vasomotorik* funktioniert nach dem Prinzip, daß in einer kalten Umgebung weniger Blut durch die oberflächennahe Gefäße fließt wie bei warmer Umgebung. Dabei wird die Volumengröße vom Sauerstoffgehalt definiert, der eine minimal überlebensnotwendige Dosis für das umliegende Gewebe gewährleistet. Das Blut fließt dabei überwiegend durch Kapillaren, die arteriovenösen *Anastomosen* werden so gut wie nicht durchströmt. Das Blut in der kommunizierenden Vene fließt dabei fast vollständig in die *Vena Comitans*, wobei das abgekühlte Blut direkt an der Arterie vorbeifließt und seine Wärme an die *vena comitans* abgibt. Das arterielle Blut wird nun abgekühlt und das venöse Blut gleichzeitig erwärmt. Dies hat zur Folge, daß das Temperaturgefälle zwischen Blut und Umgebung nicht mehr so groß ist und es zu keinen Transmissionsverlusten mit der Umgebung kommt. Bei Robben z.B. sind die Arterien, die zu den Extremitäten führen mit mehreren Venen umgeben und sorgen so für eine nahezu gleichartiges Temperaturniveau mit den umschließenden Flächen (s. Abb.4.7.8).

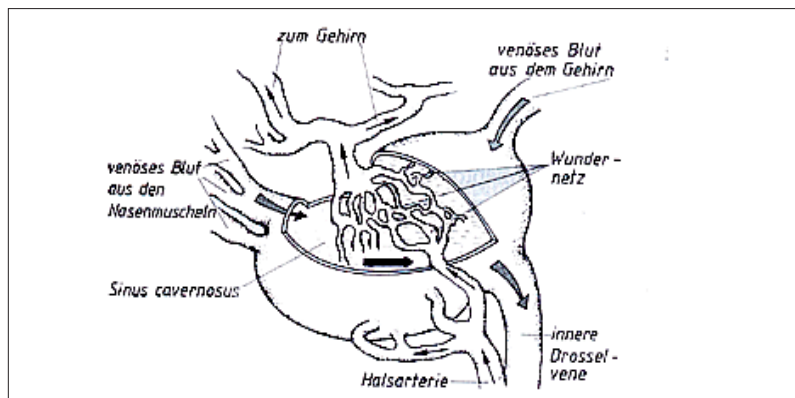


Abb. 4.7.9: Zeichnerische Darstellung eines *Rete Mirabile*, auch Wundernetz genannt, welches als Wärmetauscher fungiert

Dieses *Rete Mirabile*, oder auch „Wundernetz“ genannte, Wärmeaustauschsystem

stem ist in Kombination mit einer variierenden Wärmedämmschicht und der fellar-tigen Struktur der Haut eine ausgezeichnetes thermoregulierendes Mehrschicht-system. In der Abb. 4.7.10 ist dieser Aufbau schematisch dargestellt, wobei die direkten Kurzschlüsse, die arterivenösen Anastomosen, nur in den Hautpartien vor-kommen, die der Kälte ausgesetzt sind [HARDY 1972].

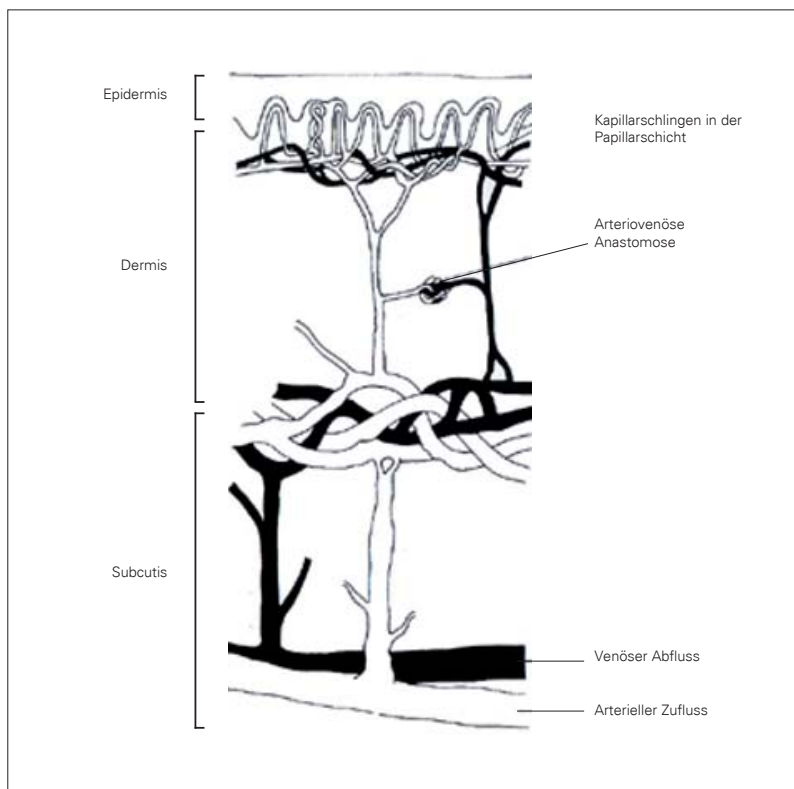


Abb. 4.7.10: Zeichnerische Darstellung des Hautaufbaus mit einer arteriovenösen Anastomose

4.7.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Sowohl die Gebäudehülle als auch das Fell der Robben dienen der Temperaturregulierung und dem Wärmeschutz ihrer dahinterliegenden Bereiche respektive ihrer Organe. Die Umgebungseinflüsse sind dabei bei beiden Anforderungsprofilen analog, wobei die Leistungsfähigkeit der Felllösung in Kombination mit einem darunterliegenden Wärmetauscher der konventionellen Gebäudehülle in nahezu allen Punkten überlegen ist. Seien es die extremen Temperaturschwankungen von nahezu 100K, die Anpassungsfähigkeit an kleinste Veränderungen oder die Fähigkeit bei enormer Dämmleistung dennoch Gase von innen nach außen zu transportieren. Die Haut der Robben ist diesen extremen Bedingungen gegenüber ihren anthropogenen Lösungen durch die Verlagerungsoption des thermischen Fensters vor allem auch in energetischer Sicht deutlich überlegen.

Analogiebetrachtung	Robbenfell	Gebäudehülle
Temperaturregulierung	Gegenstrom-Wärmeaustausch, Wundernetz (<i>rete mirabile</i>) zur Kühlung, durch Erweiterung oder Verengung der Blutgefäße wird die Durchblutung verändert (Vaskomotorik)	Heizung, Klima- und Lüftungsanlagen, Heizung und Kühlung durch Erhöhung oder Senkung der Temperatur im geschlossenen System (Erhalt der Raumtemperatur)
Wärmeschutz	Ändern der Durchblutung, Fettdimensionierung	Ändern der Temperatur, Wärmedämmung, Fassadenleistung
Umgebungseinflüsse	Umgebungstemperatur, Jahreszeit, Wind etc.	Umgebungstemperatur, Jahreszeit, Wind etc.
Wärmeaustauschmedium	Blut, Luft	Wasser, Kühlmittel, Luft
Direkte solare Wärmegewinne	Körperorientierung zur Sonne	Gebäudeorientierung, Fassadenorientierung
Größe	Regional gebunden, Bergmannsche Regel, Körperkern nicht fest umrissen	Regional Unabhängig, Nutzungsabhängig, Kernzone Ortsgebunden

Abb. 4.7.11: Tabellarische Analogiebetrachtung eines Robbenfells bezogen auf die Gebäudehülle

4.7.6 Ansatz für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

Ein Ansatz könnte nun sein ein, durch die Funktionsweise des Robbenfelle inspiriertes Fassadenpaneel, zu entwickeln, das mit variabler Dämmstärke, gezielt geführter Wärmeleitung, justablen Konvektionsschichten und einem gesteuerten Wärmeaustausch die Thermoregulierung der Fassade unterstützt. Dieser Ansatz ab-

strahiert die Funktionsweise eines *Rete Mirabile* als Wärmeaustauschsystem und könnte in Kombination mit einer variierenden Wärmedämmschicht und den außenliegenden Konvektionsschichten u.U. zu einem ausgezeichneten vasomotorischen thermoregulierendem Mehrschichtsystem führen. Die wesentlichen Faktoren wie Wärmestrahlung, Wärmeleitung (Konduktion) und Verdunstung (Transpiration) werden durch diesen Ansatz sequentiell mit Lösungsansätzen aus der Natur belegt. Die Abb. XX zeigt exemplarisch einen möglichen Aufbau eines solchen Panels im Modell.

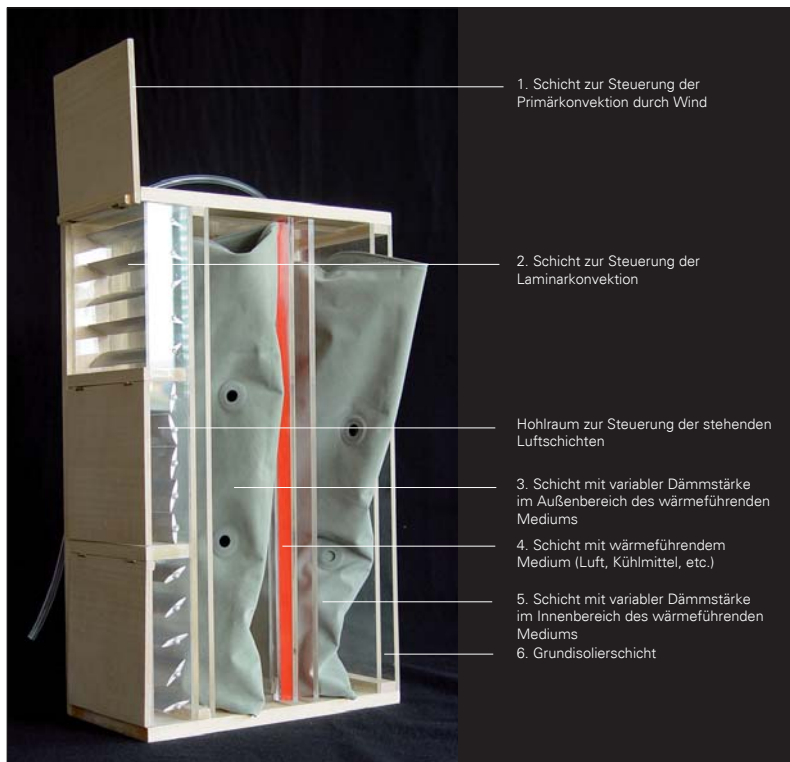


Abb. 4.7.12: Schematisches Testmodell eines Vasomotorischen thermoregulierenden Mehrschichtsystems

Ein wesentlicher Bestandteil dieses Ansatzes ist das isolierende Material in zwei Dämmzonen aufzuteilen und diese in Abhängigkeit zum äußerem Temperaturniveau unterschiedlich stark einstellbar zu machen. Damit soll erreicht werden, daß die Dämmleistung vor und hinter der Abwärme- oder Zuwärme führenden Schicht jeweils reagieren kann. In einem abstrahierten Modell wurden diese Dämmschichten als Luftsäcke visualisiert und mittels eines Luftkompressors unter Druck gesetzt oder entleert.

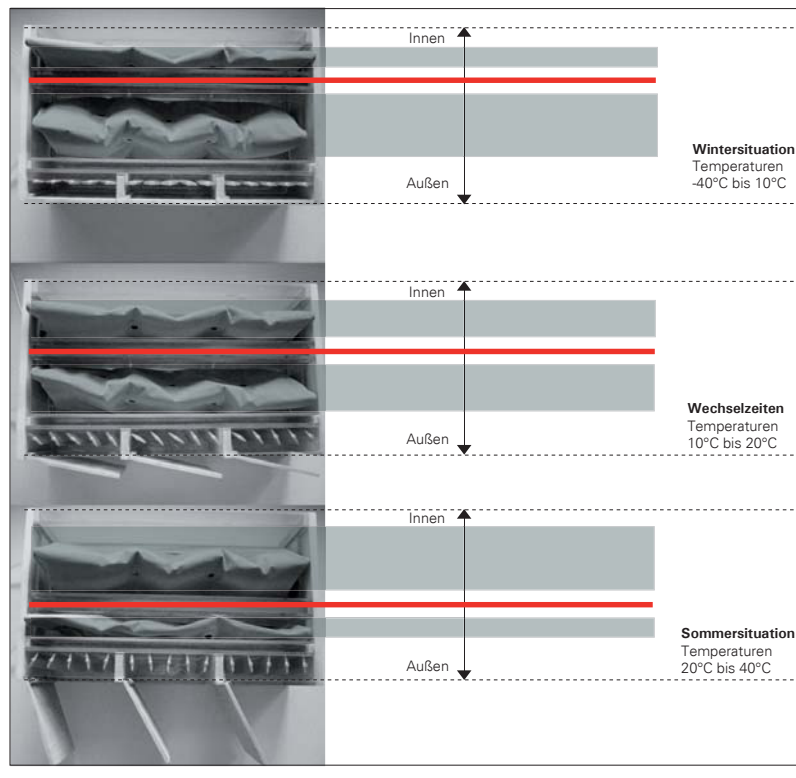


Abb. 4.7.13: Schematisches Testmodell eines variablen Mehrschichtsystems aus zwei Dämmschichten

Die graduelle Funktionsweise des Paneels wurde mittels weiterer Arbeitsmodelle eingekreist, um die Wirkungsweise der verschiedenen Kreisläufe, der Kurzschlüsse und Beziehungen zueinander deutlicher zu verstehen. Dabei entstanden mehrere Schaltzustände, die im Folgenden diagrammatisch dargestellt werden. Diese stellen einen Jahresablauf dar, beginnend mit einer Wintersituation, einer Wechselsituation, mehreren Sommerzuständen und einem Sommerhöchststand.

Im Winter sind die äußeren Konvektionsschichten geschlossen und der innenliegende vom außenliegenden Kreislauf getrennt, so daß die Zirkulation des Transportmittels hinter der Wärmedämmung stattfindet. Dadurch werden die wärmeren Schichten im Inneren gehalten und mittels einer „kommunizierenden“ Verbindung kurzgeschlossen (1). Der Bereich vor der Wärmedämmung funktioniert in diesem Moment wie eine hinterlüftete Fassade. Sobald die Temperaturen steigen, werden die Kurzschlussverbindungen geöffnet und mittels gleichförmigen Wärmeaustausches in einer Balance gehalten, die innere Wärmelasten senkt und anhebt (2). Das warme Transportmittel gelangt dann durch die Wärmedämmung nach außen, wo es durch die kalte Außentemperatur abkühlt und wieder zurück durch die Wärmedämmung in den Innenraum gelangt. Wenn die Temperaturen in den Wechselzeiten weiter steigen wird die vom Innenraum erwärmte Luft mittels Wärmeaustausch von außen gekühlt und wieder an den Innenraum abgegeben (3). Bei Temperaturen von +10°C bis +15°C sind dann alle Regler ganz offen und der maximale Durchfluß ist gewährleistet. Werden nun zusätzlich die beweglichen Zwischenteiler im Bereich des warmen Transportmittels verengt, wird zusätzlich ein schnellerer Durchfluß erreicht, denn die Rückleitung erfolgt jetzt in einem breiteren „Gefäß“ indem ein geringerer Durchfluß herrscht und daher mehr Kälte- oder Wärmeenergie in den Innenraum abgegeben werden kann. Steigt die Temperatur weiter auf bis zu 20°C an, werden die Kühlelemente sukzessive aufgeklappt, wodurch man primär eine Verschattung der Fassade erreicht und sekundär eine größere Kühloberfläche generiert. Zusätzlich wandert die Wärmeabführende Schicht durch die Wärmedämmung immer weiter nach außen. Dadurch wird der erwärmte Bereich immer weiter in die kühlende Zone gerückt (4-6). Steigen die Umgebungstemperaturen über 30°C, werden alle Kühlelemente bis über 90° geöffnet, wodurch ein Maximum an Sonnenschutz und Oberflächenverhältnis entsteht (7). Durch die vasomotorische Verengung der kühlen Kreisläufe werden zusätzliche Leitungsbe-

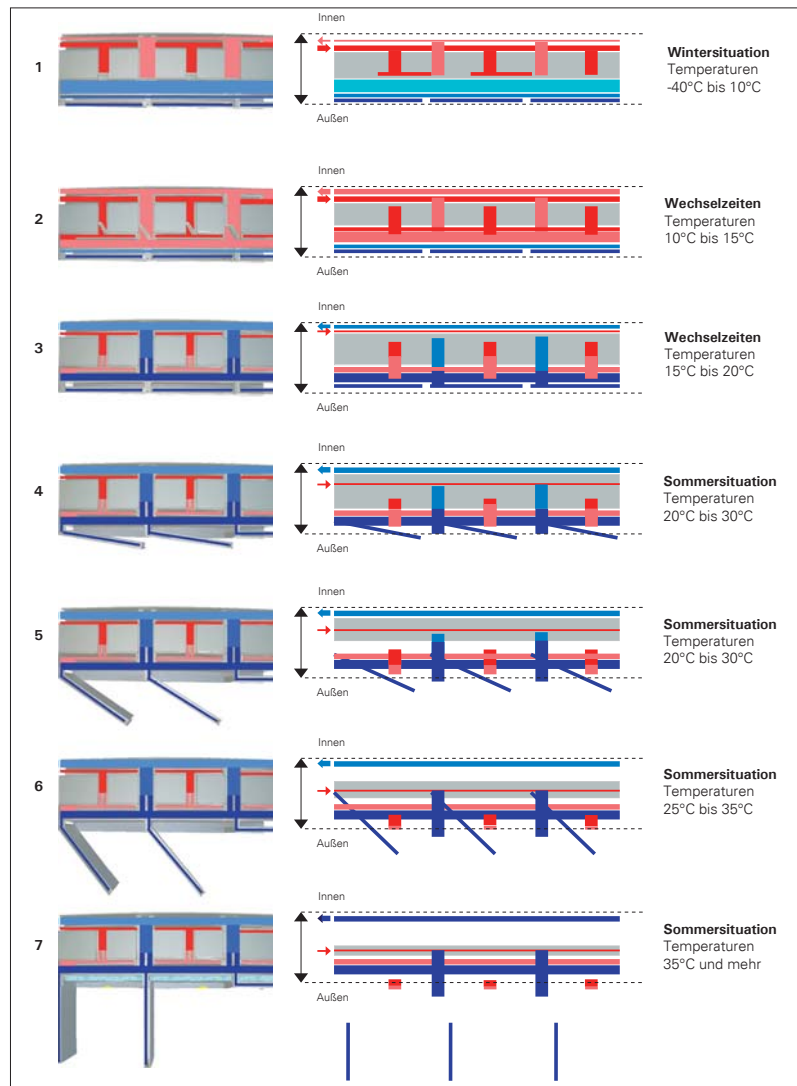


Abb. 4.7.14: Diagrammatische Darstellung eines sequentiellen Jahresablauf eines thermoregulierenden Mehrschichtsystems inspiriert durch die Wirkungsweise des Robbenfelles

reiche aktiviert, wobei die geschrumpfte Wärmedämmung nun im wesentlichen die kühlenden Kreisläufe dämmt.

4.7.7 Resümee

Der im Vorfeld dargestellte Ansatz für eine vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem, inspiriert durch die Leistungsfähigkeit eines Robenfells, ist bis dato noch nicht näher untersucht worden. Die Kombination aus variabler Wärmedämmung, justierbaren Wärmeaustauschsystemen und kontrollierter Konvektionsschichten stellt naturgemäß ein System mit extrem hohem Komplexitätsgrad dar. Im stark heterogen geprägten Baugewerbe sind solche Systemkomponenten naturgemäß selten, da Gewährleistungsfristen und Haftungsfragen eine innovative Haltung bremsen. Es wäre also der nächste logische Schritt mittels Testmodellen und vermessenen Versuchsreihen in einem kontrollierten Versuchsaufbau die tatsächliche Leistungsfähigkeit und Funktionalität eines solchen Systems zu ermitteln. Mit den Kenndaten, wie z.B. U- oder Transmissionswerten, könnten dann weitere Schritte in Richtung einer möglichen Serienreife unternommen werden.

4.8 Photomechanischer Strahlungssensor

4.8.1 Inspiration

Die Kiefernprachtkäfer *melanophila acuminata* verfügen über besondere photomechanische Infrarotsensoren. Die Käfer paaren sich in der Nähe von Waldbränden und legen ihre Larven in der Rinde von frisch verbrannten Baumstämmen ab, um ihnen das Aufwachsen an einem von potentiellen Feinden vermiedenen Ort zu ermöglichen. Daher sind Waldbrände für ihre Fortpflanzung von besonderer Bedeutung und sie sind daher ständig auf der Suche nach neuen Brandstellen. Ihr in den Körper integrierter Mechanorezeptor wird von einer Chitinklammer umfasst, die sich bei brandbedingter Infrarotstrahlung ausdehnt und den Rezeptor erregt. Dieser sendet Signale an den Käfer, der dadurch Brände in mind. 20 km Entfernung lokalisieren kann. Um Waldbrände frühzeitig erkennen zu können, haben Bonner Forscher bereits einen Infrarotsensiblen Prototyp im Testbetrieb. In Fassaden integriert könnte ein photomechanischer Infrarotsensor auf Wärme oder Strahlung reagieren, um Mechanismen zum Strahlungs- und Wärmeschutz auszulösen.



Abb. 4.8.1: Schwarzer Kiefernprachtkäfer (*melanophila acuminata*)

4.8.2 Biologische Klassifizierung

Reich	Tiere	<i>animalia</i>
Unterreich	Vielzeller	<i>metazoa</i>
Abteilung	Gewebetiere	<i>eumetazoa</i>
Überklasse	Sechsfüßer	<i>hexapoda</i>
Klasse	Insekten	<i>insecta</i>
Ordnung	Käfer	<i>coleoptera</i>
Familie	Prachtkäfer	<i>buprestidae</i>
Gattung	Schwarzer Kiefernprachtkäfer	<i>melanophila acuminata</i>

Abb. 4.8.2: Biologische Klassifizierung

4.8.3 Allgemeine Beschreibung

Prachtkäfer (*buprestidae*) sind eine besonders in den Tropen verbreitete Familie von Käfern, die mit ca. 15.000 Arten und 450 Gattungen eine der acht größten Käferfamilien bildet. Ihre Körperform erinnert an Schnellkäfer (*elateridae*), allerdings ohne den typischen Sprungapparat. Ihre Körperlängen variieren zwischen 2 und 80 Millimetern und sie haben oft einen bunten, metallischen Glanz. Ihr Kopf ist tief in den Halsschild zurückgezogen, die Fühler sind kurz und gedrunken und die Augen sind relativ groß. Ein Großteil der Arten ist wärmeliebend, deswegen sind sie in Mitteleuropa mit nur ca. 100 Arten vertreten und leben vor allem dort, wo es viel Sonne und Wärme gibt.

Eine besondere, in unseren Breiten heimischen Käfergattung ist der schwarze Kiefernprachtkäfer. Er ist pyrophil, das heißt feuerliebend und fliegt Waldbrände auch aus großen Distanzen gezielt an. Auf der frischen Brandfläche findet die Paarung der Männchen und Weibchen statt. Danach legt das Weibchen ihre Eier unter die verkohlte Rinde der verbrannten Bäume. Die Larven schlüpfen im Baumstumpf und ernähren sich von der (trotz des Feuers) intakten Bast-schicht, ohne von konkurrierenden Insekten, die verbrannte Flächen meiden, angegriffen zu werden.



Abb. 4.8.3: durch roten Pfeil markierter Feuersensor des Kiefernprachtkäfers

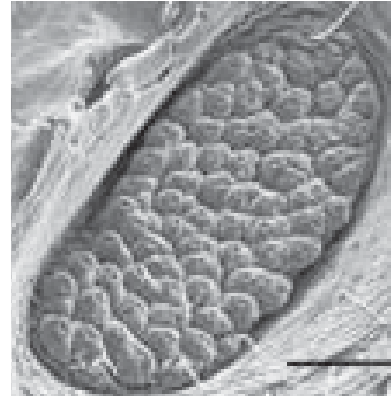


Abb. 4.8.4: REM-Aufnahme des Infrarot-Organ des Kiefernprachtkäfers

Um Brände lokalisieren zu können hat der schwarze Kiefernprachtkäfer ein spezielles Organ, eine Art Mechanorezeptor, der auf Infrarotstrahlung einer bestimmten elektromagnetischen Wellenlänge reagiert. Das Organ ist mit einem dünnen Panzer aus Chitin überzogen,

Chitin ist der in der Insektenwelt am meisten verbreitete Baustoff. Auch bei Krustentieren kommt Chitin zu Einsatz. Durchsichtige Schutzpanzer, massive Schutzpanzer, leichte, faltbare und transparente Flügel, Haut, Eier und sonstige Körperteile bestehen aus Chitin oder Chitin in Verbindung mit eingelagerten Stoffen. Durch unterschiedliche Einlagerungen kann der Baustoff sowohl weiche als auch harte Eigenschaften vorweisen. Chitin ist ein biologischer Faserverbundwerkstoff, bestehend aus einer langkettigen Faserkomponente aus Chitin (Poly-N-Acetylglucosamin) und einer Matrix aus Proteinen, Lipiden und anderen Bestandteilen. Chitin ist in Wasser, organischen Lösungsmitteln und verdünnten Säuren bzw. Laugen unlöslich. In konzentrierter Ameisen- und Methansulfonsäure ist es löslich. Von starken Säuren wird das Polysaccharid in Essigsäure und D-Glucosamin gespalten, während starke Laugen es zu Chitosan und Essigsäure umsetzen. Chitin ist farb-, geschmack- und geruchlos, basophil und acidophob und sein spezifisches Gewicht

beträgt $1,35 \text{ g/cm}^3$. In der Natur wird es durch Enzyme aufgelöst, die sich z.B. bei Schnecken nachweisen lassen die Pilze und Flechten verwerten. Weiter findet man es bei einigen Bakterien und Pilzen, die parasitisch auf Insekten leben. Die Jahresproduktion von Chitin beträgt 10 Mio. bis 100 Mio. Tonnen und ist damit das am zweithäufigsten synthetisierte Polysaccharid nach der Cellulose. Jährlich werden 150 000 Festtonnen Chitin aus Chitinresten (Muscheln, Austern, Tintenfische, Pilze, usw.) gewonnen, indem der Crustaceenpanzer zermahlen und eine Proteinseparation mit NaOH durchgeführt wird. Danach wird es gewaschen, demineralisiert (HCl) und das Wasser entzogen. Man erhält das reine Chitin, das biologisch abbaubar und nicht toxisch ist.

4.8.4 Phänomenologische Betrachtung

Unter dem Bauch des Kiefernprachtkäfers befinden sich zwei Gruben, in denen sich je 75 sogenannte Feuermelder befinden. Ihr Aufbau setzt sich aus einem druckempfindlichen, fingerförmigen Mechanorezeptor und einem aufgesetzten „Köpfchen“ aus Chitin zusammen. Der Mechanorezeptor steckt in der winzigen Chitinkugel, die ihn wie eine Klammer umfasst. Die Kugel absorbiert besonders gut Wärmestrahlung von ca. drei Mikrometern Wellenlänge.

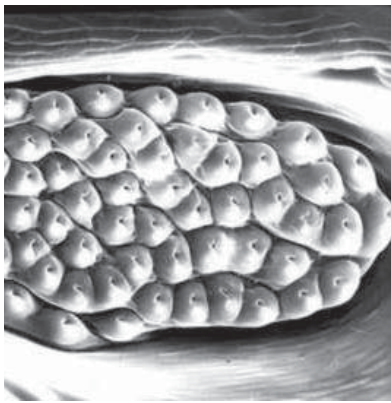


Abb. 4.8.5: IR-Organ des Schwarzen Kiefernprachtkäfers mit ca.75 kuppelförmigen photomechanischen IR-Sensillen



Abb. 4.8.6: REM-Aufnahme IR-Sensillen mit zweitausendstel Millimeter dicken chitinösen Panzerschicht

Das entspricht genau der Infrarotlänge, die bei einem Waldbrand freigesetzt wird. Trifft die Infrarotstrahlung auf die Chitinkugel, dehnt sie sich aus und die drucksensible Spitze des Mechanorezeptors leitet die empfangenen Signale weiter an das Nervensystem des Käfers. Dabei erkennt der Käfer nicht nur die Nähe eines Waldbrands, sondern die Signale seiner Infrarot-Organen weisen ihm auch die Richtung.

Forscher beschäftigen sich nun damit, die Fähigkeiten von pyrophilen Insekten, Waldbrände schnell zu bemerken und zu lokalisieren, in die Entwicklung von Waldbrandsensoren zu übersetzen. Die Feuerwehr könnte mit Sensoren dieses Prinzips Waldbrände in abgelegenen trockenen Regionen frühzeitig bekämpfen und große Flächenbrände vermeiden. Professor Schmitz der Universität Bonn hat einen Prototypen eines Brandmelders entwickelt, der den Infrarotsensor des Kiefernprachtkäfers mit einfachem Aufbau und Materialien imitiert. Anstelle der Chitinkugeln kommen Polyethylen-Plättchen zum Einsatz. Der Kunststoff absorbiert Infrarotstrahlung annähernd im gleichen Infrarotbereich von drei Mikrometern und reagiert ebenfalls mit Ausdehnung. Die sensorische Fähigkeit des Prototypen ist zurzeit noch nicht auf dem Stand aktuell handelsüblicher Sensoren, allerdings deutet die Einfachheit, Schnelligkeit und Kostengünstigkeit des Modellprodukts auf das Potential des Infrarotsensors hin.



Abb. 4.8.7: Querschnitt durch ein Sensillum

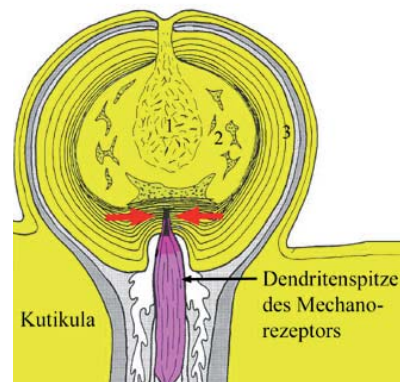


Abb. 4.8.8: Schematische Zeichnung des photomechanischen Prinzips des Sensillums

4.8.5 Schnittstellenbildung Architektur - Natur

Im Gegensatz zu aktuellen Brandsensoren mit dem Bolometerprinzip kann der Mechanorezeptor ein mikromechanisches Ausdehnungsereignis innerhalb weniger Millisekunden erkennen. Die Sensivität und das exakte fehlerfreie Ansprechvermögen machen die Weiterentwicklung des Infrarotmechanorezeptors interessant. Darüber hinaus ist die genaue Lokalisierung des Brandherds von großer Bedeutung. So könnte frühzeitig der genaue Löschvorgang und Einsatz geplant werden. Aktuelle Brandmelder könnten in Gebäuden durch einen Infrarot-Branddetektor ergänzt werden, der bestimmte Wellenlängen im Infrarotbereich des Feuerherdes erkennen kann. Die Detektoren könnten Ausmaß, Ort und eventuell das schwelende Material erkennen, bevor es zum offenen Feuer kommt. Dabei könnte sowohl Chitin als auch Materialien ähnlicher Eigenschaften eingesetzt werden.

4.8.6 Anwendung auf Gebäudehüllen

Im Anwendungsbereich der Gebäudehülle wäre ein Sensor vorstellbar, der auf das Phänomen des pyrophilen Käfers der Strahlungserkennung zurückgreift und spezielle Strahlungsintensitäten wahrnimmt.

Farbton	Wellenlänge	Energie pro Photon
UV-B	280 - 315 nm	4,40 - 3,90 eV
UV-A	315 - 380 nm	3,90 - 3,10 eV
Violett	380 - 420 nm	3,26 - 2,95 eV
Blau	420 - 490 nm	2,95 - 2,53 eV
Grün	490 - 575 nm	2,53 - 2,16 eV
Gelb	575 - 585 nm	2,16 - 2,12 eV
Orange	585 - 650 nm	2,12 - 1,91 eV
Rot	650 - 750 nm	1,91 - 1,65 eV
Infrarot	750 - 1 000 000 nm	1,65 - 0,00 eV

Abb. 4.8.9: Vergleich der elektromagnetischen Strahlung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche

Der vom menschlichen Auge wahrgenommene Lichtbereich liegt bei Wellenlängen von 380 bis 750 nm. Daran grenzt im Bereich der kurzwelligeren Strahlung die Ultraviolette Strahlung und im Bereich längerer Wellen der Infrarotbereich. Jede unterschiedliche Wellenlänge hat eine unterschiedlich hohe Wärmeeinstrahlung und einen unterschiedlichen hohen Energieanteil. Der höchste Energieanteil liegt im Bereich der UV-Strahlung. Diese wird allerdings bis zur Wellenlänge von UV-B ca. 290 nm von der Ozonschicht absorbiert. Daher trägt sie nur zu 7% zur Wärmestrahlung bei. 47% liegen im sichtbaren Bereich und 46% im Infraroten Bereich. Im langwelligen Bereich, ab ca. 2500 nm kann sie vernachlässigt werden, da Glas für sie nicht transparent ist. Daher liegt das Interesse des Wärmeschutzes im Bereich von 310 - 2800 nm. Die Spitze der Globalstrahlung liegt mit $1,5 \text{ W/m}^2\text{nm}$ bei 470 nm, also im Bereich des blauen Lichts.

Vorstellbar wäre nun ein Sensor, der ab einer gewissen Strahlungsintensität einen Sonnenschutzimpuls auslöst der idealerweise in einem bestimmten spektralen Bereich liegen würde. Der Sensor misst die Wellenlänge und die Bestrahlungsstärke, um besonders die Spitzen der Strahlung abzufangen.



Abb. 4.8.10: Skizzenhafte Visualisierung der photomechanischen Infrarotsensoren des *melanophila acuminata*

In den Abb. 4.8.10 bis 4.8.12 ist exemplarisch ein solcher flächiger Sensor als 3D-Modell ertellt worden, um sich die unterschiedlichen Komponenten besser vor Augen führen zu können. Ähnlich dem Mechanorezeptor des Prachtkäfers liefert eine chitinöse Umhüllung, die sich je nach Strahlung dehnt oder zusammenzieht, die Grundfunktion des Sensors. Ähnlich wie in der aktuellen Brandmelderforschung könnte nun ein Polymer zum Einsatz kommen, das genau die Wellenbereiche von 310-2800 nm sensorisch erfasst und einen Verschattungsmechanismus aktiviert.

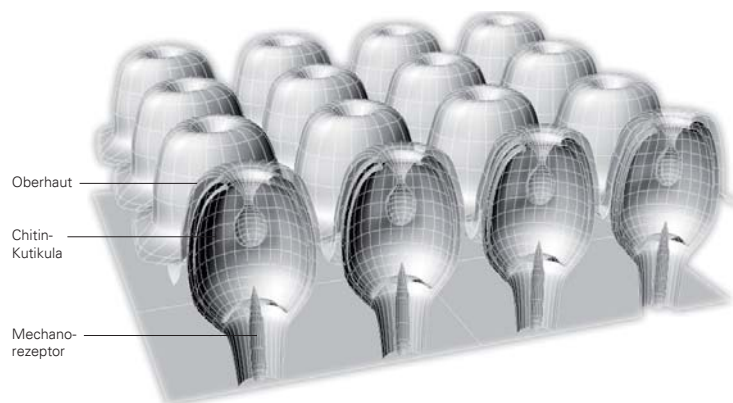


Abb. 4.8.11: Skizzenhafte Visualisierung der photomechanischen Infrarotsensoren des *melanophila acuminata*

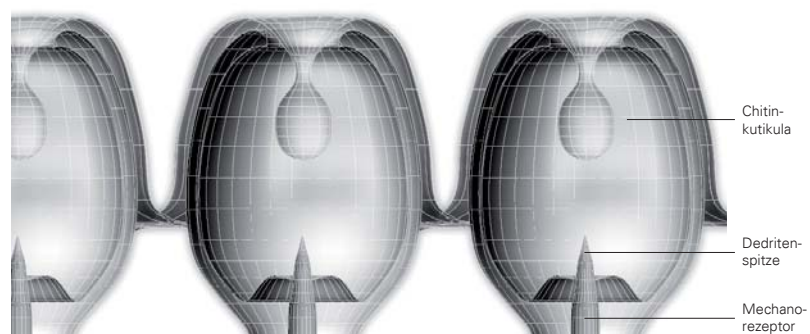


Abb. 4.8.12: Skizzenhafte Visualisierung der photomechanischen Infrarotsensoren des *melanophila acuminata*

4.8.7 Resümee

Die Entwicklung photomechanischer Strahlungssensoren nach dem Vorbild des Prachtkäfers stehen kurz vor dem Abschluss und einer für die Brandmeldung optimierten Serienproduktion. Dabei steht die Natur Pate für ein neues Brandmelde- und Brandortungssystem, das wegen seiner Einfachheit und Robustheit jedem bekannten System deutlich überlegen ist. Der entscheidende Vorteil ist ein Minimum an Verschleißteilen und ein Maximum an Zuverlässigkeit. Für den Einsatz als UV-Strahlungssensor im Gebäudehüllenbereich, der gezielt auf spezielle Strahlungswellen reagiert, stehen derzeit noch keine Systeme zur Verfügung. Dies sicherlich auch, weil ein solcher Ansatz bis dato noch nicht weiter verfolgt wurde. Erste Schritte müssten sein, ein geeignetes Polymer zu entwerfen und herzustellen, das exakt und zuverlässig auf die im Vorfeld angegebenen Strahlungswellen durch minimale Oberflächenzunahme reagiert. Dieser Impuls müsste dann mittels einer Dendritenspitzen ähnlichen Konstruktion abgegriffen werden und wäre dann geeignete weitere Schritte wie z.B. Verdunkelung oder andere additive Massnahmen einzuleiten. Denkbar wäre natürlich auch, daß der ganze Sensor als Verschattungssystem agiert, indem er sich stärker ausdehnt und damit eine Verschattung der dahinterliegenden Flächen erzeugt.

Teil 4 - Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle

Vorbemerkungen

Der Teil 4 der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit dem konzeptionellen Aufbau einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle auf Grundlage der in Teil 3 erarbeiteten Erkenntnisse aus 19 selektierten und untersuchten natürlichen Hüll- und Hautsystemen. Dazu werden in einem ersten Schritt die Prinzipien der Phänomene nach ihren Wirkungs- und Verfahrensweisen aufgeklärt und je nach Möglichkeit in die zu entwerfende Hüllstruktur übernommen. Weitere Randbedingungen werden durch die erarbeiteten Anforderungen aus dem Teil 2 bestimmt. Dadurch ergibt sich eine Hüllkonzeption, die auf den Erkenntnissen aus der Beschäftigung mit natürlichen Hüllsystemen aufbaut, anthropogene Anforderungen überlagert und sich somit zu einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle entwickelt. Dabei steht jedoch nicht im Vordergrund, daß ein natürliches System auf alle Anforderungen moderner Gebäudehüllen projizierbar ist, sondern vielmehr, daß die Summe der Lösungsansätze als Ganzes zu einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle führt, die den klassischen Fasadiskonzeptionen überlegen sein kann.

1.0 Übersicht natürlicher Lösungen

Im Laufe des selektiven Arbeitens mit natürlichen Hüllen und Häuten haben sich unterschiedliche Prinzipien und Wirkungsweisen innerhalb der untersuchten Phänomene ergeben, die im Anforderungsschema (s. Teil 2, Abb. 5.4.2) einen Lösungsansatz für bisher bekannte Fassadenanforderungen darstellen könnten.

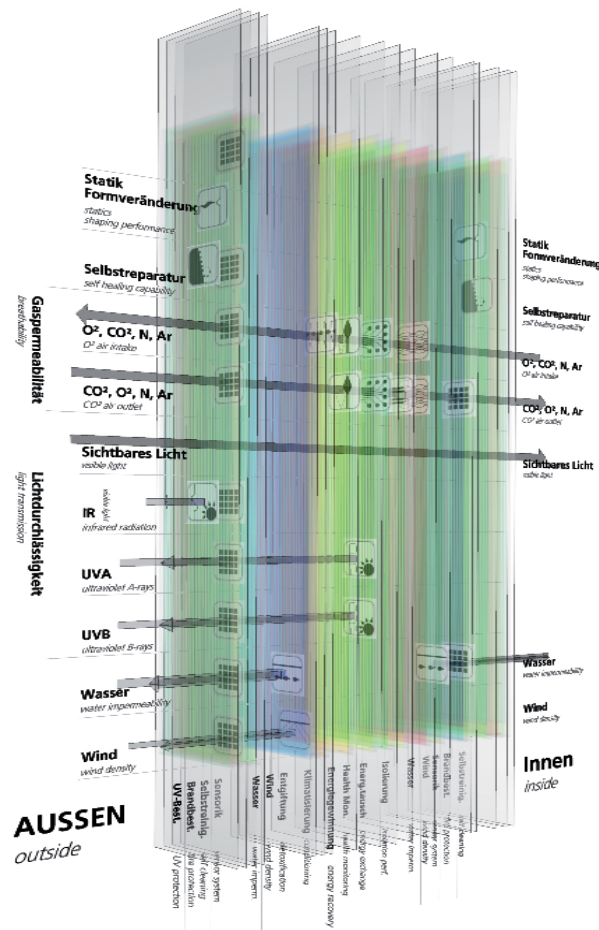



































Abb. 5.4.2 aus dem Teil 2 - Anforderungen -: Perspektivische Darstellung der Anforderungen an eine Hüllstruktur

In der Abb. 1.0.2 sind den einzelnen Anforderungen nun mögliche natürliche Lösungsansätze gegenübergestellt, bei denen die Evolution im Kontext analoger Problemstellungen zu anderen Lösungen gekommen ist als wir mit den uns bekannten

Thema	Anforderung	Natürliches Phänomen	Bionisch inspirierter Lösungsansatz		
Energie	Gaspermeabilität		Amphibienhautatmung	Dezentrale Flächenlüftung	
			Fliegeneischale	Permeable Struktur	
			Hornissenhaut	Thermoelektrische Beschichtung	
			Plasmamembran	Selektiv permeable Hüllstruktur	
	Klimatisierung		Fliegeneischale	Permeable Struktur	
			Robbenfell	Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem	
	Dämmung		Robbenfell	Vasomotorisches Mehrschichtsystem	
	Energiegewinnung		Hornissenhaut	Thermoelektrische Beschichtung	
			Grünalgen	Photobiologische Wasserstofffassade	
			Amphibienhaut	Farbwechsel	
	Energieaustausch		Robbenfell	Rete Mirabile	
	Sicherheit	Brandverhalten		Chitinwerkstoff	Nicht brennbare Polysaccharide
		Health Monitoring		Bakterien	Biolumineszenz
Selbstreparatur			Glasschwamm	Biogene Glasfaserverbundwerkstoffe	
Entgiftung			Retikulum	Antikörper, Endo-/Exocytose	

Betrieb	Selbstreinigung		Rosenkäfer	Selbstreinigende Struktur
			Schmetterlingsflügel	Strukturelle Lichtlenkung
			Schwarzkäferpanzer	Strukturelle Reflexion
			Geckofüße	Reversible Haftstruktur
	Winddichtigkeit		Fliegeneischale	Permeable Struktur
	Wasserabweisung		Plasmamembran	Selektiv permeable Struktur
			Cellulose	Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien
			Perlmutter	Progressives Leichtbaumaterial
			Schwarzkäferpanzer	Strukturelle Reflexion
			Selbstreinigende Struktur	Rosenkäferpanzer
			Abrasionsfeste Struktur	Sandfischhaut
			Autosensitive Verschattungsstruktur	Schlangensterne
			Permeable Struktur	Fliegeneischale
			Thermoelektrische Beschichtung	Hornissenhaut
			Farbwechsel	Amphibienhaut
			Dezentrale Flächenlüftung	Amphibienhautatmung
			Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem	Robbenfell
			Photomechanischer Strahlungssensor	Brandkäfer

technischen Lösungen. Dabei ist klar, daß z.B. der Komfort oder das Design (*wie wir es verstehen. Anm.: Autor*) und die Automation in der Natur eine untergeordnete Rolle spielen, die Begriffe Energie, Sicherheit oder Betrieb jedoch von besonderer Bedeutung sind. Die Themengruppe „Energie“ stellt daher den Schwerpunkt der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit mit den Spezifikationen Gaspermeabilität, Klimatisierung und Konditionierung, Dämmeigenschaften, Wärme- oder Kältegewinnung, die Speicherfähigkeit sowie die Energiegewinnung und deren Austausch dar. Dazu kommen die Eigenschaften des Brandverhalten, des Health Monitoring, der Selbstreparaturfähigkeiten und der Entgiftung und die Eigenschaften der Selbstreinigung, die Winddichtigkeit, die Wasserabweisung, die UV-Beständigkeit und die Sensorik.


	UV-Beständigkeit		Quallenhaut	Noch unbekannt, wahrs. Melanin
	Sensorik		Schlangensterne	Autosensitives Verschattungsstruktur
			Cellulose	Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien
			Membranrezeptoren	Sensorik
			Farbwechsel	Amphibienhaut
			Biolumineszenz	Autosensitive Leuchtbeschichtung
			Brandkäfer	Photomechanischer Strahlungssensor

Abb. 1.0.2: Tabellarische Darstellung der Anforderungen, Lösungsansätze und Phänomene

2.0 Lösungsansätze aus der Natur

Nun werden die einzelnen Phänomene mit der Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle verknüpft. Dies führt dann zur einer diagrammatischen Schichtdarstellung einer Gebäudehüllstruktur. Dazu werden die wesentlichen Ei-

genschaften der unterschiedlichen Schichten vorab anhand ihres ursprünglichen Beispiels erläutert und abschließend in die Hüllstruktur eingebunden. Die Anordnung der Schicht erfolgt dann analog der erarbeitenden Schichtenabfolge aus dem Teil 2 (Abb. 5.4.2) mit einem äußeren, einem mittleren und einem inneren Schichtenbereich.

2.1 Energie

Im Bereich Energie werden die Phänomene der Permeabilität für Gase und Licht, die Fähigkeit zur Konditionierung, die Dämmeigenschaften und die Energiegewinnung und deren Austausch näher erläutert.

2.1.1 Gaspermeabilität

Bei der Gaspermeabilität handelt es sich um eine äußerst wesentliche Eigenschaft für neuartige Hüllstrukturen, die bei folgenden untersuchten Phänomenen eine bedeutsame Rolle spielt:

- Permeable Struktur - Fliegeneischale (s. S. 202)
- Thermoelektrische Beschichtung - Hornissenhaut (s. S. 218)
- Dezentrale Flächenlüftung - Amphibienhautatmung (s. S. 252)
- Selektiv permeable Hüllstruktur - Plasmamembran (s. S. 271)

Dieser Ansatz steht im krassen Widerspruch zu aktuell praktizierten Ausführungsstrategien moderner Gebäudehüllen, die im Wesentlichen ein Maximum an Dichtigkeit im Lastenheft haben. Dies verhält sich fast genau reziprok zu den Vorgehensweisen natürlicher Systeme. Der Hintergrund ist das Minimieren der Transmissionswärmeverluste durch die Gebäudehülle unabhängig davon ob es sich um Wärmeverluste (bei Wohngebäuden) oder um Kälteverluste (bei Bürogebäuden) handelt. Durch extrem diffusionsdichtes Bauen erhofft man sich ein Minimum an einzuspeisender Wärme- oder Kälteenergie für die Konditionierung der Innenräume. Dies führt leider auch zu unangenehmen Nebenerscheinungen wie schlechter Luftqualität, Fäul-

nis und gesundheitlichen Einschränkungen. Die Natur dagegen arbeitet meist mit permeablen Systemen und bildet dabei raffinierte Hüllstrukturen aus, die in der Lage sind, die Energie aus dem vorbeiströmenden Medium herauszufiltern bevor sie im Außenraum ungenutzt verpufft. Dieser direkte Übergang ist z.B. in der Fliegenegenschale zu beobachten, bei der sich die chitinöse Struktur mit Wärmeenergie „auflädt“ und zeitversetzt wieder „entlädt“. Bei der thermoelektrischen Beschichtung der Hornissenhaut liegt der Schwerpunkt der Permeabilität eher auf einem wärmenden und kühlenden Effekt, den die Hornisse erzeugt, wenn sie mittels der gelben „Blasebläge“ Luft in die Systemkammern der photovoltaischen Kutikula presst. Dennoch ist auch sie für Luftmoleküle durchlässig. Bei der Hautatmung der Amphibien wird ein Medientausch mittels Alveolen erzeugt, der den Sauerstoff und das Kohlendioxid im Blut gelöst zur zentralen Pumpe führt und anschliessend wieder zurück bringt. Die Wärme im System wird dabei durch ein ausgeklügeltes Wärmetauschersystem immer jeweils im Inneren einbehalten, so daß nur wenige bis keine Transmissionswärmeverluste entstehen können. Wieder ein anderes Konzept verfolgt die Plasmamembran, deren Durchlässigkeit für Moleküle unterschiedlicher Größe zu unterschiedlichen Transportmechanismen geführt hat, die sowohl aktiver wie passiver Natur sein können. Hier ist vor allem der passive Transport von großem Interesse, da er gänzlich energielos nur durch Druckunterschiede zwischen den Transportschichten aktiviert wird. Die Osmose oder barrierefreie Diffusion ist dabei als grundmotorischer Prozess zu sehen. Diese Betrachtungen führen zu dem Schluss eine Bionisch inspirierte Gebäudehülle gänzlich permeabel zu konzipieren und dies als Schichtenkohärente Eigenschaft allen zusätzlichen Komponenten ins Lastenheft zu schreiben. Dabei muss gewährleistet sein, daß der Energiegehalt der auszutauschenden Gase im Zuge der Permeabilität innen und außen jeweils genau gleich bleibt, d.h. die Energie immer innerhalb des Schichtsystems verbleibt. Man kann sich das ungefähr so vorstellen, wie wenn man bei 10° C Außentemperatur durch das Schichtensystem ausatmen würde und dahinter der Atem, der mit ca. 32° C den Mund verläßt, wieder nur 10°C hätte. Dieser Vorgang wäre zudem Kondensatfrei, da die Senkung der Temperatur graduell im Inneren des Schichtensystems erfolgt.

Die Schichtenkohärente Eigenschaft der Gaspermeabilität muss also folgende Funktionen gewährleisten:

- Lufthaushalt: Lufterneuerung, Sauerstoffzufuhr, CO² - Abtransport
- Gerüche: Ausschluss von Gerüchen, gezielter Abtransport von störenden Gerüchen, gezielte Zufuhr von gewünschten Gerüchen
- Luftschadstoffe: Ausschluss von Luftschadstoffen bei gleichzeitigem Abtransport der Schadstoffe von Innen nach Außen
- Wasser: Regulierung des Feuchtigkeitsgehaltes der Raumluft bei gleichzeitigen Schutz vor Niederschlag
- Wärme: Regulierung des Wärmehaushaltes, Schutz vor Überhitzung bzw. Auskühlung
- Licht: Regulierung der Lichtzufuhr, Filterwirkung in Bezug auf einzelne Strahlungen und Strahlungsintensitäten

2.1.2 Konditionierung

Gemeint ist hier die Konditionierung ein- und ausströmender Gase mit Wärme- oder Kälteenergie während diese den Schichtbereich zwischen kontrollierten und unkontrollierten Bereichen passieren. Folgende Struktur und Funktion sind dazu in der Lage:

- Permeable Struktur - Fliegeneischale (s. S. 202)
- Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem - Robbenfell (s. S. 293)

Man vermutet, daß die chitinöse Struktur der Fliegeneischale in der Lage ist kurzzeitig Wärmeenergie aus den vorbeiströmenden Gasen aufzunehmen und damit den Innenbereich des Eies zu konditionieren. Die Fähigkeiten des Robbenfelles sind ebenso konditionierender Art, werden jedoch unter 2.1.3 Dämmung erst näher erläutert, da dort die variable Dämmfähigkeit der Haut im Mittelpunkt steht. Dieser Vorgang ist als Schichteninkohärente Eigenschaft einem Bereich oder einer Schicht zuzuordnen und muss folgende Eigenschaften erfüllen:

- Porengröße < 5 µm
- Lufthaushalt: Lüfterneuerung, Sauerstoffzufuhr, CO²-Abtransport

2.1.3 Dämmung

Eine besonders ausgeklügelte Dämmfähigkeit in Kombination mit unterschiedlichen Temperaturbereichen wurde bei folgendem Hautsystem untersucht:

- Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem - Robbenfell (s. S. 293)

Das Fell der Robbe ist in der Lage durch veränderliche Kerntemperaturzonen den Wärmehaushalt verschiedener Gewebebereiche so zu steuern, daß nur noch eine minimale lebensnotwendige Versorgung des Gewebes durch Sauerstoff vorliegt und die wärmeintensiven Bereiche dennoch ausreichend unterstützt werden. Durch feinste Kapillarverzweigungen des sogenannten *Rete Mirabile* (Wundernetz) wird die Wärmeenergie dem in Richtung Außenluft vorbeiströmenden arteriösen Blut entnommen und dem hineinströmenden venösen Blut wieder zugeführt. Eine optimierte Strategie zur Minimierung sämtlicher Transmissionswärmeverluste, da überhaupt keine Wärme an die Außenhaut gelangt. Im Umkehrschluss kann dieses System auch überschüssige Wärmeenergie zu Kühlzwecken an die Außenluft abgeben, wenn die wärmeführende Schicht nach ganz außen geführt wird. Für eine Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle wären also folgende Schichteninkohärente Eigenschaft einem Bereich oder einer Schicht notwendig:

- Veränderliche Schichtdicke
- Veränderliche Außenlage der wärme führenden Medien

2.1.4 Energiegewinnung

Für eine oberflächennahe Form der Energiegewinnung durch solare Einstrahlung sind im wesentlichen drei Systeme aufgefallen und näher untersucht worden:

- Thermoelektrische Beschichtung - Hornissenhaut (s. S. 218)
- Photobiologische Wasserstoffassade - Grünalgen (s. S. 229)
- Farbwechsel - Amphibienhaut (s. S. 239)

Bei der Hornissenhaut kommen besondere biologische Solarzellen zum Einsatz deren Photorezeptoren mit einer dünnen Hautschicht überzogen sind, die den elektrischen Widerstand je nach Lichtverhältnissen und Umgebungstemperatur regulieren kann. Diese Funktion macht die Haut zu einer Art organischem Halbleiter ähnlich einer Thermoelektrischen Beschichtung. Die Energie kann in Form einer „photovoltaischen Zelle“ gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder in Form von Wärme abgegeben werden. Amphibien dagegen können ihre Außenfarbe durch Zu- und Abnahme pigmenthaltiger Zellen oder durch schnelle Pigmentbewegungen innerhalb der Zelle verändern, wobei sie grundsätzlich auf Licht- und Temperaturveränderungen reagieren. Dabei nutzen sie den Effekt der Absorption solarer Einstrahlung durch dunklere und hellere Farben, je nach Lichtintensität. Für eine Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle wären also folgende Schichteninkohärente Eigenschaft einem Bereich oder einer Schicht notwendig:

- Photovoltaische Energiewandlung der UVA (315-400nm) Strahlung
- Energiewandlung der UVB (280-315 nm) Strahlung durch Absorption

2.1.5 Energieaustausch

Das effektivste Wärme- und Energietauschersystem der untersuchten Phänomene ist das beim Robbenfell und den Gänsefüßen vorkommende *Rete Mirabile* (Wundernetz):

- Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem - Robbenfell (s. S. 293)

Dieses ist in der Lage eine Bluttemperatur von ca. 37° C innerhalb von wenigen Zentimetern Hautzone in eine Bluttemperatur von ca. 3° C zu verwandeln ohne dabei wertvolle Energie an die u.U. bis zu -40°C kalte Umgebung abzugeben. Dies kann

man allein daran schon erkennen, daß arktische Robben auch nach längerer Liegezeit auf dem vereisten Boden nicht durch „einschmelzen“ versinken, sondern nach dem Fortbewegen lediglich ein Liegabdruck zu erkennen ist. Die auf dem Boden liegende Haut hat also die gleiche oder eine ähnliche Temperatur wie die angrenzenden Flächen. Dies ist auch der Grund dafür, daß Gänse, Schwäne oder Enten auf eisiger Oberfläche nicht versinken. Ihre Füße haben eine Oberflächentemperatur von lediglich 3°C. Dahinter wirkt das System der kapillar verzweigten Netze, die dem Medium Blut die Energie entziehen und auf dem Rückweg in den Körper wieder zuführen. Ähnlich wie unter 2.1.2 Konditionierung und unter 2.1.3 Dämmung schon erläutert, sollte die zu konzipierende Hüllstruktur also ein solches Wärmetauschersystem aufweisen, um damit etwaige Transmissionswärmeverluste auszuschließen. Diese Fähigkeiten müssten also in einer Schichteninkohärenten Eigenschaften in einem Bereich oder einer Schicht gewährleistet sein:

- Temperaturwandlung der Luft oder eines Mediums von ca. 28° C auf bis zu -5° C innerhalb der Schichtzone
- Kurzfristige Speichermöglichkeit der gewonnen Wärme- oder Kältenenergie innerhalb des Schichtensystems

2.2 Sicherheit

Der Bereich der Sicherheit umfasst die Brandhemmenden Fähigkeiten, das permanente Überprüfen der Subsysteme (*neu deutsch: Health Monitoring, Anm.: Autor*), die Fähigkeit zur Selbstreparatur und die Entgiftung von Stoffen während des Durchganges durch die Hüllstruktur.

2.2.1 Brandverhalten

Im Bereich der Werkstoffe, die zur feuergeschützten Konstruktion einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle dienen könnten und Brandhemmende Eigenschaften aufweisen, fiel das Polysaccharid Chitin auf, das unter anderem schwer entflammbar ist. Chitin ist der in der Insektenwelt am meisten verbreitete Baustoff. Durchsich-

tige Schutzpanzer, massive Schutzpanzer, leichte, faltbare und transparente Flügel, Haut, Eier und sonstige Körperteile bestehen aus Chitin oder Chitin in Verbindung mit eingelagerten Stoffen. Durch unterschiedliche Einlagerungen kann der Baustoff sowohl weiche als auch harte Eigenschaften vorweisen und wäre damit auch als Trägermaterial geeignet. Chitin ist ein biologischer Faserverbundwerkstoff aus einer langkettigen Faserkomponente und einer Matrix aus Proteinen, Lipiden und anderen Bestandteilen. Chitin ist in Wasser, organischen Lösungsmitteln und verdünnten Säuren bzw. Laugen unlöslich und daher auch für den Außeneinsatz geeignet. Chitin ist farb-, geschmack- und geruchlos, basophil und acidophob und sein spezifisches Gewicht beträgt lediglich $1,35 \text{ g/cm}^3$. Untersucht wurde der Verbundwerkstoff im Kapitel:

- Photomechanischer Strahlungssensor - Brandkäfer (s. S. 307)

Diese Fähigkeit könnte als sensorische Komponente als eine Schichteninkohärente Eigenschaft innerhalb eines Bereiches oder einer Schicht eingesetzt werden.

2.2.2 Health Monitoring

Die Fähigkeit permanent einzelne Subsysteme zu überprüfen und auf Ihre Funktionssicherheit hin auszulegen bedarf sensorischer und aktuatorischer Eigenschaften. Die Veranlagung dazu hängt sehr stark mit dem Themenbereich der Selbstreparatur zusammen, die unter 2.2.3 näher erläutert wird. Die untersuchten Systeme aus dem Teil 3 sind zum Großteil in der Lage Ihre Funktionalität durch permanentes Überprüfen und Nachregeln sicherzustellen, ein einfacher direkter Übertragungsansatz wurde jedoch nicht herausgearbeitet, weil die Systeme gänzlich unterschiedliche Herangehensweisen ausbilden. Für die Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle wird daher eine solche Wirkungsweise hypothetisch angesetzt, da diese Funktion von großer Bedeutung für die Gesamtleistungsfähigkeit und Betriebsstabilität der Hüllstruktur ist.

2.2.3 Selbstreparatur

Die Fähigkeit zur selbstständigen Reparatur und Wiederherstellung der Funktionswirkung wurde bei fast allen Phänomenen gefunden, da es sich dabei um eine grundlegende Strategie natürlicher Systeme handelt. Für den Einsatz in eine Gebäudehüllenstruktur wird an dieser Stelle festgehalten, daß alle Schichten eine solche selbstreparierende Eigenschaft aufweisen sollten. Die Schichtenkohärente Eigenschaft der Selbstreparatur muss also folgende Funktionen gewährleisten:

- Eigenständige Wiederherstellung der Funktionsweise
- Regenerationsmechanismus
- Erstellung notwendiger neuer Materialien
- Entsorgung und Rezyklierung des ersetzten Materials

2.2.4 Entgiftung

Während den Untersuchungen zur Thematik des molekularen Transportes der Plasmamembran wurden unterschiedliche Mechanismen zur Entgiftung passierender Stoffe während des permeablen Vorgangs betrachtet. Dabei wurden Varianten mit Antikörpern, Endo- und Exocystasen und die Wirkungsweisen des Retikulums näher untersucht. Für den Einsatz in einer Gebäudehüllstruktur erschien, unter Berücksichtigung des aktuell vorliegenden geringen Wissenstandes solcher hochkomplexer biochemischer Systeme, die Variante des Retikulums mit heckenähnliche Molekülstrukturen am vielversprechendsten. Dies auch weil sich solche „Entgiftungsstrukturen“ dem Zielstoff anpassen lassen und somit ein hohes Maß an Adaptivität an die jeweilige Anforderung möglich wird. Folgende Fähigkeiten müssten also als eine Schichteninkohärente Eigenschaft innerhalb eines Bereiches oder einer Schicht geleistet werden.

- Entgiftung der passierenden Stoffe
- Entsorgung und Rezyklierung des selektierten Materials

2.3 Betrieb

Der Betriebsbereich umfasst sowohl strukturelle wie auch funktionale Fähigkeiten wie die selbstreinigende Eigenschaft der Oberfläche, die Winddichtigkeit zur Verringerung etwaiger Transmissionswärmeverluste, die Dichtigkeit gegen Wassereintritt, die Beständigkeit gegen schädliche UV-Strahlungen des Sonnenlichtes und sensorische Eigenschaften zur Ermittlung innen- und außenliegender Zustände.

2.3.1 Selbstreinigung

Im Feld der natürlichen Hüll- und Hautsysteme wurde folgende Exponate mit selbstreinigender Oberfläche ausfindig gemacht und näher untersucht:

- Strukturelle Lichtlenkung - Schmetterlingsflügel (s. S. 139)
- Strukturelle Reflexion - Schwarzkäferpanzer (Selektion 1)
- Selbstreinigende Struktur - Rosenkäferpanzer (s. S. 153)
- Reversible Haftstruktur - Geckofüße (s. S. 189)

Für eine bionisch inspirierte Gebäudehülle wird für die selbstreinigende Wirkung eine der Oberflächenstruktur des Rosenkäfers affine Struktur vorgeschlagen, da diese neben ihrem hervorragenden Anschmutzverhalten auch unterschiedliche Reflexionen ermöglicht. Damit wird erreicht, daß die zu konzipierende Hülle nicht immer nur matt erscheinen wird, sondern auch reflektiv bis glänzend. Eine Eigenschaft, die der Rosenkäfer mit wunderschönen schillernden Grün-, Grünblau- und Ockerfarben eindrucksvoll unter Beweis stellt. Zudem verfügt die Panzerstruktur des Rosenkäfers über sogenannte Stippen in unterschiedlichen Höhen durch die auch feinste Schmutzpartikel mittels abperlenden Wassertropfen mitgenommen werden. Folgende Fähigkeiten müssten also als eine Schichteninkohärente Eigenschaft innerhalb eines Bereiches oder einer Schicht geleistet werden.

- Hexagonale Stippenstruktur in unterschiedlichen Höhen (s. S. 153)

2.3.2 Winddichtigkeit

Die Winddichtigkeit spielt bei den untersuchten Phänomenen eine eher untergeordnete Rolle, da Öffnungen, Fugenundichtigkeiten oder Spaltbereiche so gut wie nicht vorkommen. Lediglich beim Robbenfell wird eine heckenähnliche Struktur eingesetzt, die dem anströmenden Wind einen Widerstand bietet und somit eine erhöhte Transmission von Wärme nach außen verhindert. Die Wirkungsweise vorbeiströmenden Winde ist jedoch für spezielle Situationen von Vorteil und wird daher wie folgt eingesetzt:

- Abtransport ausgegitterter Materialien durch Winddruck- und sog
- Kühlende Wirkung der Außenoberfläche durch laminare Windströme (Konvektion)
- Abtransport eventuell anfallender Kondensatflüssigkeit

2.3.3 Wasserdichtigkeit

Die Dichtigkeit gegenüber Wassereintritt spielt vor allem für die dauerhafte Funktionalität eine bedeutsame Rolle, da Flüssigkeit innerhalb des Mehrschichtsystems zu deutlichen Funktionseinbußen führen kann. Bei folgenden Systemen wurde eine Wassertropfendichtigkeit der Oberfläche festgestellt:

- Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien - Cellulose (s. S. 88)
- Progressives Leichtbaumaterial - Perlmutter (s. S. 102)
- Strukturelle Reflexion - Schwarzkäferpanzer (Selektion 1)
- Selbstreinigende Struktur - Rosenkäferpanzer (s. S. 153)
- Abrasionsfeste Struktur Sandfischhaut (s. S. 166)
- Autosensitive Verschattungsstruktur Schlangensterne (s. S. 177)
- Permeable Struktur - Fliegenenschale (s. S. 203)
- Thermoelektrische Beschichtung - Hornissenhaut (s. S. 218)
- Farbwechsel - Amphibienhaut (s. S. 239)
- Dezentrale Flächenlüftung - Amphibienhautatmung (s. S. 252)

- Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem - Robbenfell (s. S. 293)
- Photomechanischer Strahlungssensor - Brandkäfer (s. S. 307)

Die Häufigkeit dieser Eigenschaft innerhalb der 19 weiterverfolgten Phänomene zeigt, welche Bedeutung einer Wasserdichtigkeit zukommt. Dabei wird meist die Tatsache benutzt, daß Wassermolekülverbindungen (H_2O) größer sind als Gasmolekülverbindungen und sich Poren oder Öffnungen diesen Umstand zu Nutze machen. Bei der Schale des Fliegenegies wurde z.B. auf der Innen- und Außenseite raufenförmige Öffnungen gefunden, die in der Querflächensumme nie größer als $5\ \mu m$ waren und damit für Wassertropfen undurchlässig. Folgende Fähigkeiten müssten also in einer Schichteninkohärente Eigenschaft einem Bereich oder einer Schicht gewährleistet sein.

- Porengröße $< 5\ \mu m$

2.3.4 UV-Beständigkeit

Die Beständigkeit gegen UVB- (280-315 nm) und UVA-Strahlung (315-400 nm) aus dem Sonnenlicht bedeutet, daß auch die besonders hohen Energieanteile von bis zu 4,40 eV pro Photon bei der UVB-Strahlung keinen Schaden am Mehrschichtsystem verursachen. Ansatz war hier die Wirkungsweise der Quallenhaut der Portugiesische Galeere (*Physalia physalia*) oder „Der Segler vor dem Wind“ (*Velella velella*). Das Wasser der Ozeane ist erstaunlich transparent für die aggressive UVB Strahlung der Sonne. Kurze energiereiche Wellenlängen mit 315 nm werden innerhalb des ersten Meters nur um ca. 14% absorbiert. Die Lebewesen des Meeres haben daher unterschiedliche Strategien im Umgang mit der gefährlichen Strahlung:

- Schutz durch Absinken in tiefere Wasserschichten
- Reparatur der entstandenen Schäden während der Nacht
- Schutz durch Verwendung von Sonnenschützenden Beschichtungen

Mit der Photolyase, einem Enzym, das Erbsubstanzen nach UV-Bestrahlung repa-

rieren kann, forscht heute vor allem die Kosmetikindustrie für den Einsatz in biologischen Sonnencremes und ähnlichen Beschichtungen der menschlichen Haut. Die Arbeiten rund um das dunkelblaue Melanin, ein Molekül, das sich wie ein Schutzschild um die empfindlichen Zellkerne der Oberhaut legen kann, sind ein weiterer Forschungsschwerpunkt, da diese Strategie einen permanenten Schutz der menschlichen Haut von innen verspricht. Die genaue Wirkungsweise der oben angedeuteten Phänomene konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit leider nur oberflächlich erfasst werden, da es sich bei beiden Ansätzen um besonders lukrative Bionische Umsetzungen handelt und ergo so gut wie keine Informationen allgemein zugänglich sind. Für den Einsatz in einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle, wird demnach von einer solchen Wirkungsweise hypothetisch ausgegangen. Daher müssen folgende Fähigkeiten in einer Schichteninkohärente Eigenschaft einem Bereich oder einer Schicht gewährleistet sein.

- Beständigkeit gegen UVB- (280-315 nm) und UVA-Strahlung (315-400 nm) - Quallenhaut (Selektion 1)

2.3.5 Sensorik

Bei folgenden Phänomenen wurden autosensitive sensorische Fähigkeiten gefunden:

- Autosensitive Lasterkennung natürlicher Faserverbundmaterialien - Cellulose (s. S. 88)
- Sensorik - Membranrezeptoren (Selektion 1)
- Autosensitive Verschattungsstruktur Schlangensterne (s. S. 177)
- Farbwechsel - Amphibienhaut (s. S. 239)
- Autosensitive Leuchtbeschichtung Biolumineszenz (s. S. 282)
- Photomechanischer Strahlungssensor - Brandkäfer (s. S. 307)

Da die oben angegebenen natürlichen Sensoren jeweils unterschiedliche Zielausrichtungen haben, der Bambus z.B. erkennt Deformationen, die Amphibienhaut unterschiedliche Farben, der Schlangensterne sogar Entfernungen, wird eine sen-

sorische Schicht vorgeschlagen, die im Wesentlichen die folgenden Parameter erkennen kann und sich dafür jeweils des dafür ausgerichteten natürlichen Systems bedient, das für diese Leistung ausgerichtet ist. Folgende Fähigkeiten müssten also in einer Schichteninkohärente Eigenschaft einem Bereich oder einer Schicht gewährleistet sein.

- UVA- und UVB Strahlungsgehalt, Lichtintensität/Lichthelligkeit
- Luftfeuchtigkeit, Zusammensetzung der Luft
- Außentemperatur, Innentemperatur
- Strahlungsenergie
- Windgeschwindigkeit
- Lärmemissionen, Geruchsimmissionen

3.0 Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle

Unter Berücksichtigung der im Vorfeld erarbeiteten Eigenschaften werden die verschiedenen Schichten nun entsprechend der Reihenfolge aus dem Teil 2 Anforderungen tabellarisch aufgelistet (s. Teil 2, Abb. 5.4.2). Im Anschluss wird dann diagrammatisch ein möglicher Schichtenaufbau aufgezeigt und mit Hilfe dreidimensionaler Darstellung visualisiert. Dabei werden verschiedene Szenarien der gaspermeablen adaptiven Hüllstruktur skizziert und erläutert.

3.1 Tabellarischer Schichtenaufbau

Im Teil 2 wurden die notwendigen Anforderungen erarbeitet und im Teil 3 mit natürlichen Lösungsansätzen gegenübergestellt, ergänzt oder überlagert. Dies führt zu den in Abb. 3.2.1 dargestellten Beziehungen innerhalb des Mehrschichtsystems bei einem Aufbau von außen nach innen.

3.2 Diagrammatischer Schichtenaufbau

In den vier unter 4.6.1 bis 4.6.4 dargestellten Szenarien ab Seite 367 werden die Ergebnisse aus dem tabellarischen Aufbau und der Anordnung innerhalb eines Mehrschichtsystems diagrammatisch aufgearbeitet und lassen eine erste konzeptionelle variable Schichtenbildung hin zu einer Bionisch inspirierten Hüllstruktur erkennen. Für den äußeren Schichtbereich ergeben sich folgende Eigenschaften:

- Brandbeständigkeit
- Selbstreinigung
- UV-Beständigkeit
- Sensorik
- Energiegewinnung 1

Für den mittleren Schichtbereich ergeben sich der Hauptteil der zu leistenden Funktionen:

- Wasserdichtigkeit
- Winddichtigkeit
- Energiegewinnung 2
- Konditionierung
- Dämmung
- Energieaustausch
- Health Monitoring
- Entgiftung

Für den inneren Bereich bleiben folgende Funktionen, die denen des Außenbereiches ähnlich sind:

- Brandbeständigkeit
- Selbstreinigung
- Wasserdichtigkeit
- Sensorik








































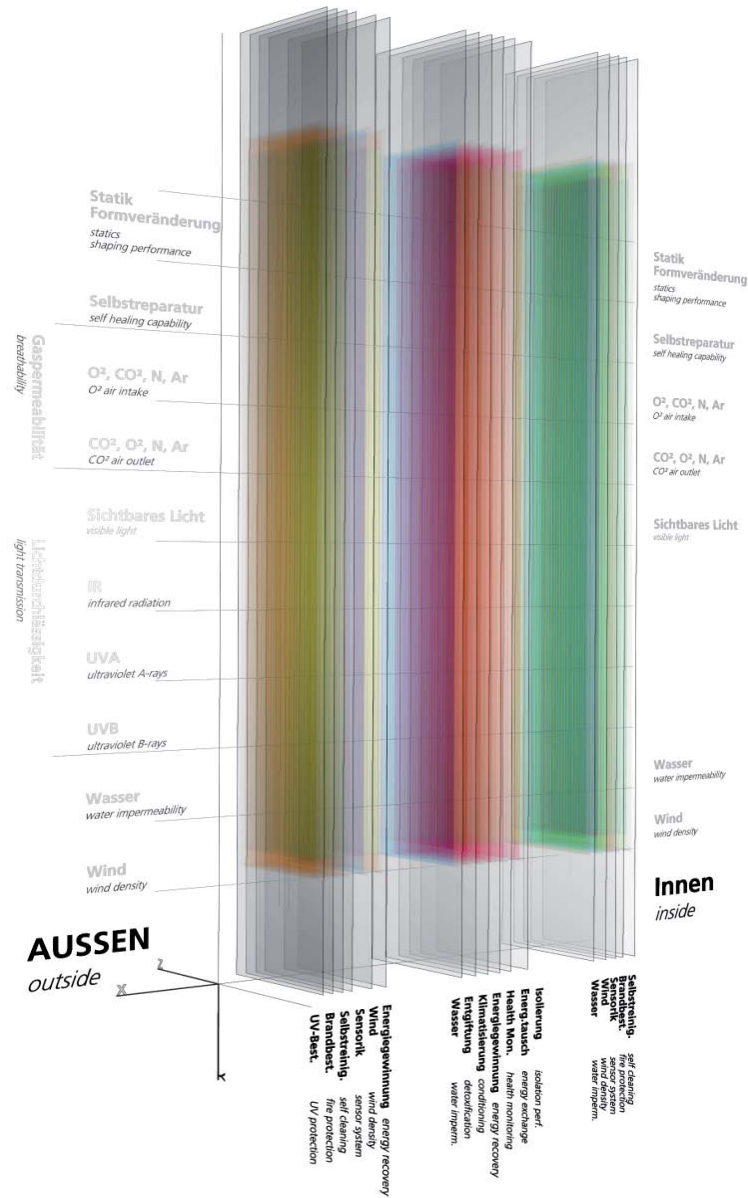
Mehrschichtbereich	Anforderung	Picto	Bild	Phänomen	Natürliches Vorkommen
AUSSEN 	UV-Beständigkeit			Melaninbeschichtung, n.n. erforscht	Quallenhaut
	Brandbeständigkeit			Nicht brennbare Polysaccharide	Chitinwerkstoff
	Selbstreinigung			Selbstreinigende Struktur	Rosenkäfer
	Sensorik			Autosensitives Verschattungsstruktur	Schlangensterne
				Photomechanischer Strahlungssensor	Brandkäfer
Energiegewinnung 1			Thermoelektrische Beschichtung	Hornissenhaut	
MITTE 	Wasserabweisung			Selektiv permeable Struktur	Plasmamembran
	Winddichtigkeit			Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem	Robbenfell
	Energiegewinnung 2			Farbwechsel	Amphibienhaut
	Entgiftung			Entgiftung	Antikörper, Endo-/Exocytose
	Dämmung			Dämmung	Robbenfell
	Konditionierung			Permeable Struktur	Fliegeneischale
				Vasomotorisches thermoregulierendes Mehrschichtsystem	Robbenhaut
	Energieaustausch			Rete Mirabile	Robbenfell
Health Monitoring			Health Monitoring	Bakterien	
INNEN 	Wasserabweisung			Selektiv permeable Struktur	Plasmamembran
	Sensorik			Autosensitives Verschattungsstruktur	Schlangensterne
	Brandbeständigkeit			Nicht brennbare Polysaccharide	Chitinwerkstoff
	Selbstreinigung			Selbstreinigende Struktur	Rosenkäfer

Abb. 3.2.1: Tabellarische Darstellung der Schichten, Diagramme und Phänomene



Zu erkennen sind der äußere, der mittlere und der innere Schichtenbereich, jeweils belegt mit den dazugehörigen Schichtenkomponenten

Abb. 3.2.2: Perspektivische Darstellung des Schichtenaufbaus analog zur tabellarischen Darstellung

4.0 Schichtenadaptivität

Die zu konzipierende Gebäudehülle soll sich, analog zu den untersuchten natürlichen Hüllsystemen, sowohl über das Jahr gesehen wie auch über den Tag betrachtet adaptiv verhalten und ergo in der Lage sein unterschiedliche Schaltzustände einzunehmen. Wir kennen diese Überlegungen aus unserer täglichen Beschäftigung mit Gebäudefassaden im Mitteleuropäischen Raum und anderen Klimazonen, die sich zwischen den im Vorfeld angedeuteten Jahres- und Tagesschwankungen befinden. Es gilt also festzuhalten, wie sich eine Bionisch inspirierte Hüllstruktur auf diese Schwankungen einstellen kann.

Unter Adaptivität versteht man die Fähigkeit eines Systems sich aktiv oder passiv durch Selbststeuerung einer bestimmten Anforderung anzupassen. Dabei ist von besonderer Bedeutung, daß sich diese Systeme entweder durch eine übergeordnete Steuerung/ Regelung angeregt anpassen können oder sogar autoadaptiv agieren, d.h. Sensor und Aktor in einem sind. Man könnte diese Systeme autoadaptive oder autoreagible Systeme nennen. Man spricht sowohl in Natur als auch in der Technik von adaptiven Eigenschaften.

Der Vorgang der Anpassung erfolgt dabei immer durch Aktuatoren, die wiederum durch einen übergeordneten Steuerungs-/Regelungsvorgang initiiert und gesteuert werden. Konventionelle technische Aktuatoren sind z.B. mechanisch längenverändernde Stabmotoren, pneumatisch volumenverändernde Bauteile oder hydraulisch formverändernde Bauteile. Aber auch Aktuatoren wie Gedächtnislegierungen oder Piezoelektrische Bauteile kommen zum Einsatz. In der Natur sprechen wir von Muskeln, Gewebebewegungen oder Drüsenprozessen. Der Regelkreislauf erhält seine Signale wiederum von Sensoren, die Veränderung wie z.B. Temperatur, Verformungen oder UV-Strahlengehalt messen können. Unter Sensoren versteht man Elemente, die in der Lage sind Veränderungen einer Einflussgröße in Form von Signalen wiederzugeben. In der Natur kommen ebenso Sensoren zum Einsatz, die wiederum sehr unterschiedlich arbeiten. Die Fähigkeit wechselnde Umstände wahrzunehmen, erfolgt hier in Millisekunden (spontan sensitiv) oder über einen längeren Zeitraum (gleitend sensitiv).

4.0.1 Graduelle Adaptivität

Von besonderer Bedeutung bei der „gradueller Adaptation“ der Vorgang während der Anpassung des Systems an äußere oder innere Anforderungen. In den folgenden Darstellung ist daher auch die konzeptionelle Intention, analog zu den meisten Systemen in der Natur, die in Teil 3 näher untersucht wurden, eine graduelle stufenlose Leistungsfähigkeit im Unterschied zu Schaltzuständen binärer Herkunft, die „an“ oder „aus“ sind, zu verdeutlichen. In der Natur kommen diese Einstellungsarten so gut wie nicht vor, viele Übergänge und Veränderung haben zumeist einen graduellen Charakter, denkt man beispielhaft an die Farbanpassung sich tarnender Tiere oder an schlagartige Anpassung wie bei der Mimosenpflanze. Die Impulse, meist auf biochemischer Ebene, ermöglichen dann zumeist eine aktive oder passive Adaption und Folgereaktion. Diese erfolgt meist spontan, leicht verzögert oder über einen längeren Zeitraum. Die Reaktion kann aber auch gleitend justabel erfolgen, d.h. in einen Sägezahnprinzip, das sich permanent nachstellt und optimal justiert, dabei aber eine übergeordnete Adaption verfolgt. Die stufenlose Veränderlichkeit der vorgeschlagenen Hüllstruktur soll sich demnach nicht nur auf eine z.B. vertikale (hier z-Achse) Adaption hin beschränken, sondern vor allem auch eine in y- oder x-Richtung ausgelegte Veränderlichkeit ermöglichen.

4.0.2 Selektive Adaptivität

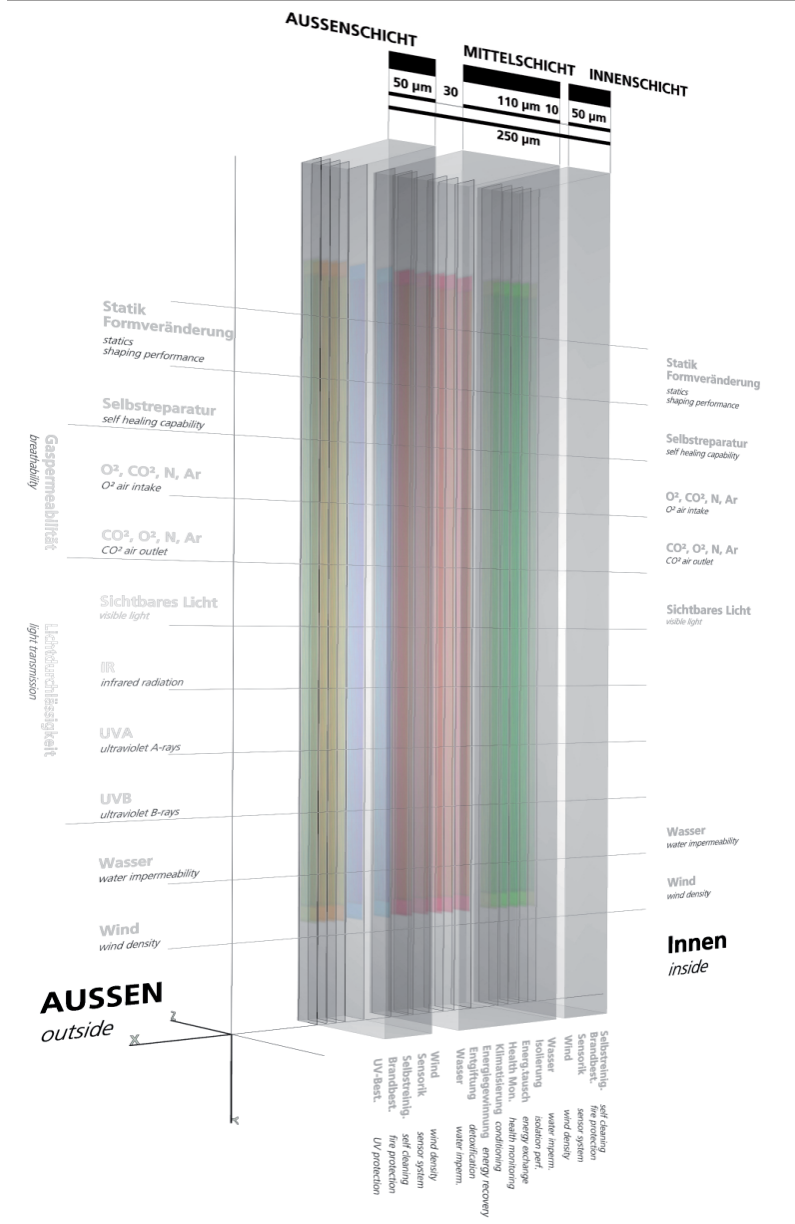
Damit in der Darstellung der in den folgenden Kapiteln aufgezeigten Szenarien deutlicher wird, dass sich Spezialisten oder auch „Funktionslayer“ nicht per se über ihre ganze x-Achse erstrecken müssen, sondern auch lokal und selektiv arbeiten können sollen, ist in den Abb. 4.4.1 bis 4.4.4 nun auch zu sehen, dass sich die einzelnen Funktionslayer unterschiedlich stark in der x-Richtung ausweiten oder zusammenziehen können und dabei an der Stelle aktiviert werden, an der die Anforderung auftaucht. Dies ist dann von besonderer Bedeutung, wenn sich durch äußere oder innere Einwirkungen, wie z.B. durch Wolkenbildung, Schattenwurf oder Lichtüberlagerungen, innerhalb eines Bereiches unterschiedliche Ausprägungen einer Einwirkung ergeben. Dabei wird auch deutlich, dass unterschiedliche Funktionen oder Eigenschaften, wie z.B. die Sensorik oder die Fähigkeit zur Selbstreparatur, sich

über nahezu alle auftretenden Einwirkungen erstrecken und andere nur gezielter lokaler Natur sind. Dennoch sind auch die übergreifenden Spezialisten nicht zu jeder Zeit vollausgelegt, sondern möglichst immer nur so stark aktiviert, wie es die äußeren und inneren Bedingungen einfordern. Herrschen z.B. aufgrund der durch die Sensorik (analog zum Brandkäfer) gemessenen hohen Konzentration von Infrarotstrahlungen erhöhte Anforderungen nach Brandbeständigkeit, zudem aber auch eine hohe isolierende Leistung nebst der Aktivierung der Selbstreinigende Funktion, ergibt sich ein anderes Layout der Hüllstruktur, als wenn z.B. geringe oder keine Dämmanforderungen und ein zugleich ein hohes Maß an Witterungsschutz erforderlich sind. Dies z.B. um eine verlängerte Energieaustauschflächen zu generieren oder auf Grund der Maximierung des Flächenträgheitsmomentes eine höhere statische Leistungsfähigkeit zu erzeugen.

Dabei spielt eine wesentliche Rolle, daß sich die Funktionslayer vorrangig innerhalb ihrer Achsebene, also in x- und y- Richtung verändern können und sich dabei graduell zu ihren Anhangstrukturen verhalten, d.h. die Veränderungen erfolgen immer mit einem weichen stufenlosen Übergang zu den benachbarten Bereichen.

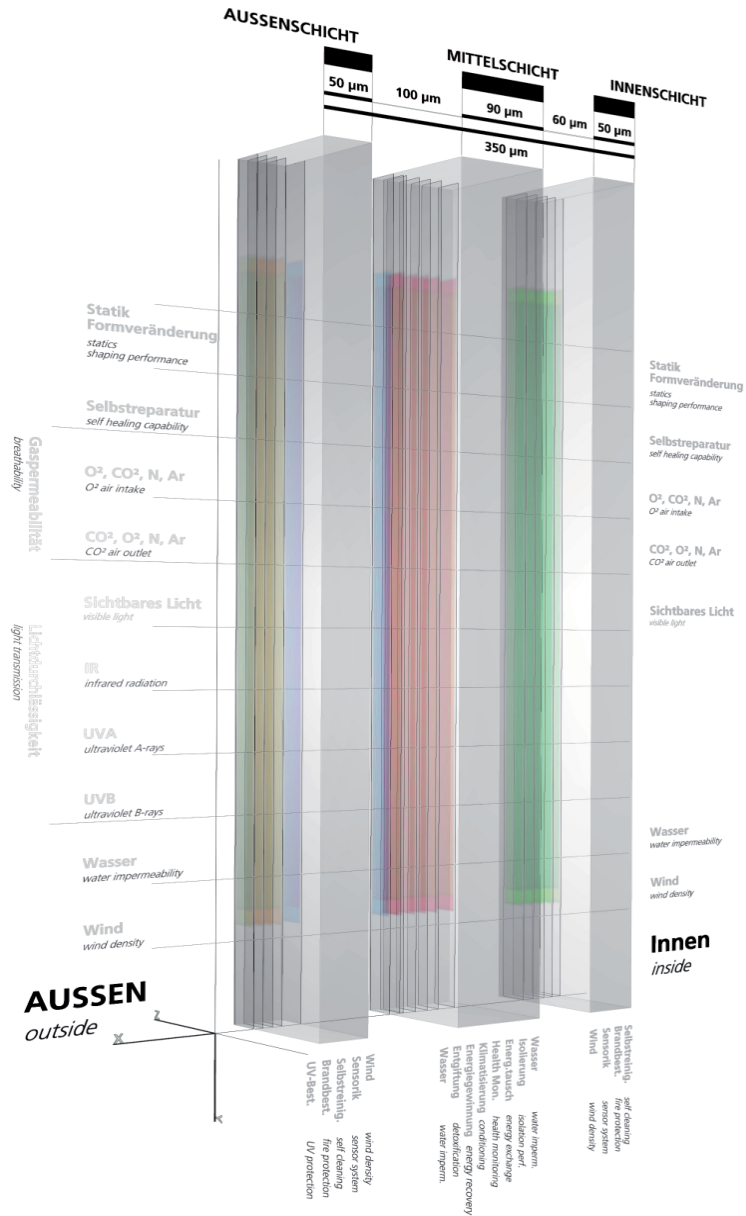
4.1 Adaptivität der Schichtenbereiche in x-Richtung

In der Abb. 4.1.1 ist eine schichtenartige Struktur dargestellt, mit einem Außenbereich links, einem Mittelbereich und einem Innenbereich rechts. Die Basis dieser Darstellung ist dabei eine räumliche Matrix, die je nach Einwirkung von außen eine Reaktion erkennen läßt. Die Abb. 4.1.1 bis Abb. 4.1.4 stellen im Wesentlichen die Veränderlichkeit der konzeptionellen Hüllstruktur dar, deren drei Zonen (Außen/Mitte/Innen) sich anabhängig voneinander verdicken oder verjüngen können. Dies soll dazu führen, dass sich die Hüllstruktur unterschiedlichen Anforderungen gegenüber einstellen kann, dies z.B. zur Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten. In Abb. 4.1.1 erkennt man eine relativ dünne Außenschicht mit ca. 30 µm Dicke (die Größenangabe basiert auf der Schichtengröße der Hornissenhaut, die zwischen 30-45 µm aufweist), eine 60 µm starke Konvektions- oder Transportschicht, eine 210 µm dimensionierte Mittelschicht, wieder eine Transportschicht mit 20 µm und eine Innenschicht mit ca. 30 µm Dicke. In summa ergibt sich so eine Schichtendimension von ca. 350 µm Stärke.



Beide Schichten außen wie innen sind stark verdickt, die Transportschichten minimal, die Mittelschicht ist auf ca. 110 µm minimiert. Diese Darstellung zeigt insgesamt einen sehr dünnen Gesamtaufbau.

Abb. 4.1.3: Perspektivische Darstellung eines Schaltzustandes der Schichtenbereiche



Die äußeren und die inneren Schichtenbereiche sind auf 50 µm erweitert, beide Transportschichten sind erweitert, die Mittelschicht ist auf minimale 50 µm reduziert.

Abb. 4.1.4: Perspektivische Darstellung eines Schaltzustandes der Schichtenbereiche

Anm. Autor: Dabei muss allerdings festgehalten werden, dass diese Größenangaben auf den natürlichen Phänomenen basieren und bei einer anthropogenen Übertragung über diese konzeptionelle Darstellung hinweg auf ihre tatsächliche Wirkungsweise hin überprüft werden müssen.

In der Abb. 4.1.2 verändern sich bei gleicher Gesamtabmessung lediglich die inneren Zonen zueinander, d.h. die Mittelzone vergrößert sich in diesem Beispiel auf 270 μm Dicke, wobei die Transportzonen sich stark verjüngen. Diese z.B. zur Reduktion von störenden Konvektionen innerhalb des Systems. Die Außen- und Innenbereiche bleiben nahezu gleich und verringern sich unwesentlich. In der Abb. 4.1.3 ist ein ähnlicher Zustand wie in Abb. 4.1.2 dargestellt, wobei hier nun die Zwischenzonen deutlich vergrößert sind und vor allem die Mittelschicht eine starke Verjüngung aufweist. Hintergrund dabei kann ein vergrößerter Bedarf an Zu- und Abführung kühlender oder wärmender Luftmoleküle sein, der z.B. (analog zur Thermoelektrischen Beschichtung der Hornissenhaut) zur Leistungssteigerung der Energiegewinnenden Schicht im Inneren des Systems dienen soll. In der Abb. 4.1.4 dagegen erkennt man, daß auch angedacht ist, die Gesamtdimension der Hüllstruktur veränderlich auszuführen, d.h. eine Verjüngung des Systems auf z.B. 250 μm Dicke.

4.2 Adaptivität der Schichten in x-Richtung

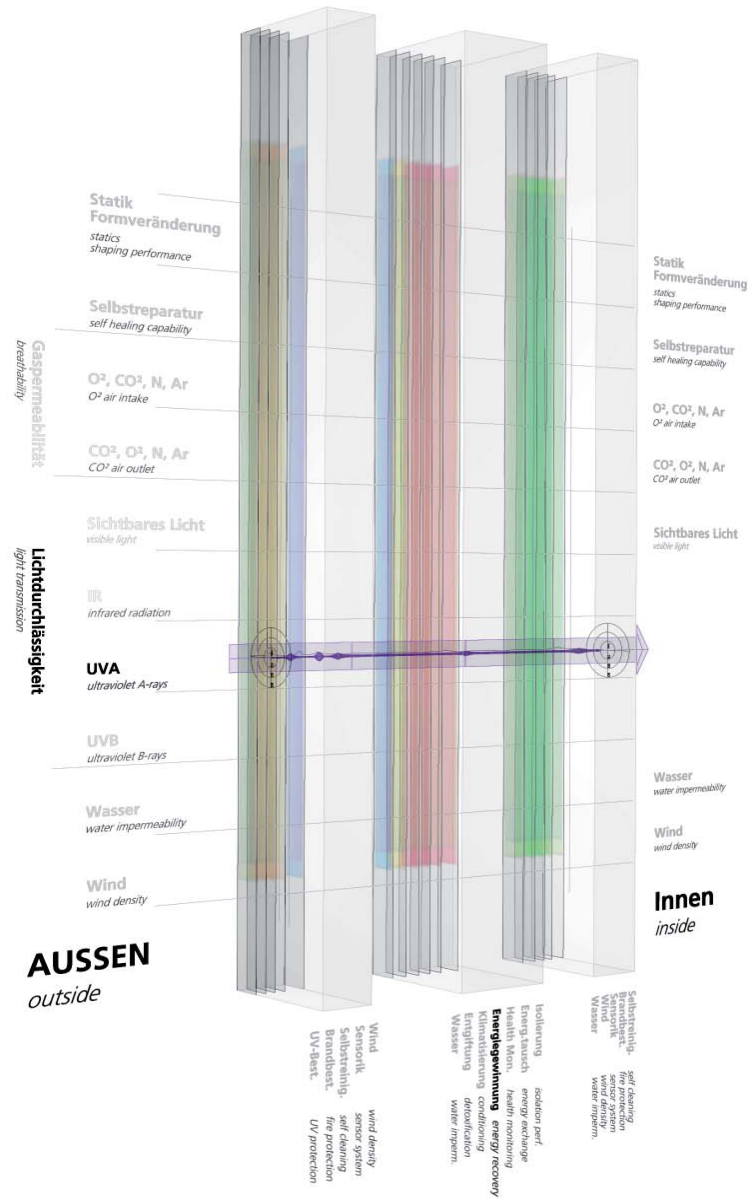
Anhand des Beispiels der „Isolierenden Speziellschicht“ (analog zur veränderlichen Wärmedämmfähigkeit des Robbenfelles) wird in den Abb. 4.2.1 bis 4.2.2 eine Veränderlichkeit einzelner Funktionslayer in der x-Richtung dargestellt. Dabei ist in der Abb. 4.2.2 zu erkennen, dass sich die Struktur in der Mitte, also den Funktionsbereichen der Entgiftung bis hin zur Isolierung um ein Vielfaches ihrer Ursprungsdimension verdicken können soll. Gerade bei den mittelschichtigen Fähigkeiten der Schichtenkomponenten, die zusammen mit Eigenschaften wie der Isolierung, der Entgiftung, dem Energieaustausch, der Konditionierung oder dem Health Monitoring gruppiert sind, muss bei einer weiteren Untersuchung erarbeitet werden, bei welchen Gesamtabmessungen die Wirkungsweisen der natürlichen Hüllstrukturen, die hier konzeptionelles Vorbild sind, eigentlich ihre optimale Wirkungsweise entfalten.

ten können. Ziel ist es hier auch durch die Darstellungsart die aktivierten Bereiche qualitativ in in Ihrer Beziehung zueinander darzustellen.

4.3 Adaptivität der Schichten in z-Richtung

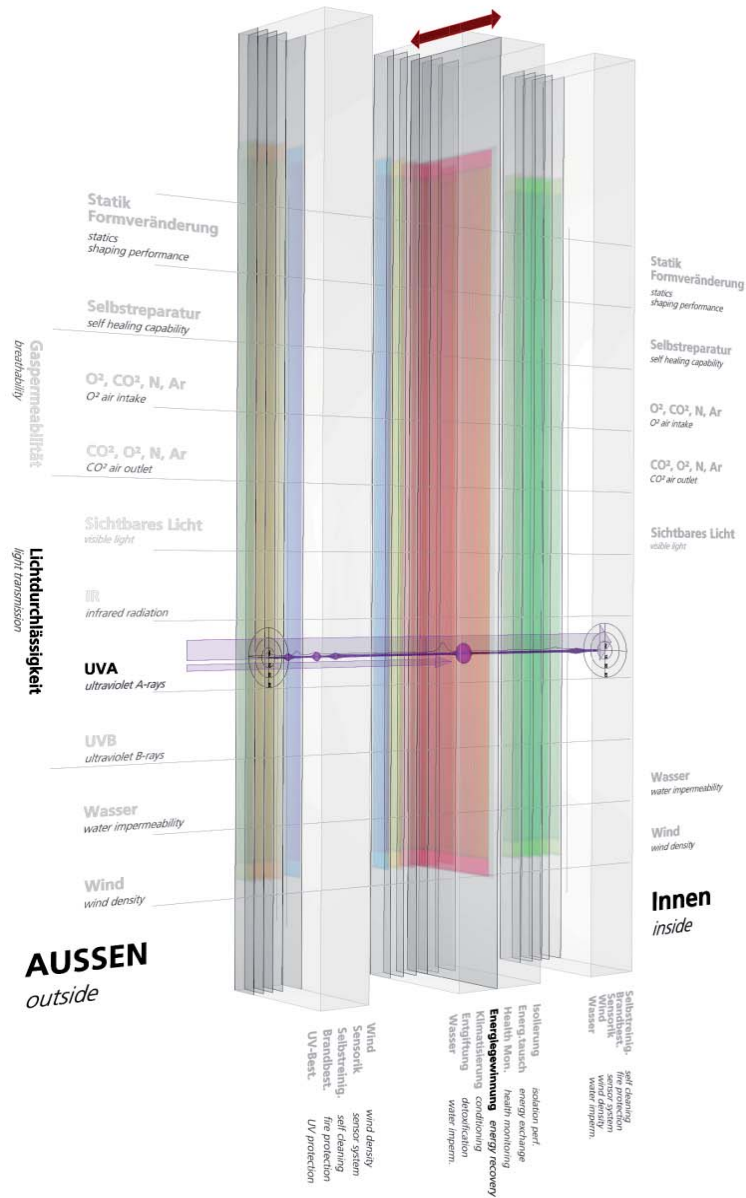
Dazuhin wird es auch notwendig sein, einzelne Stränge der räumlichen x-, y-, und z-Matrix zu aktivieren und deaktivieren, während andere „Spezialisten“ u.U. permanent aktiviert bleiben oder häufiger parallel zum Einsatz kommen. Wie schon im Kapitel 5.1 und 5.2 im Teil 2 angedeutet, führt diese Überlegung zu einer Überlagerung von Basis- und Spezialeigenschaften der jeweiligen Schichtenkomponenten, die in der Darstellungen dieses Kapitels jeweils unten aufgetragen sind. Die aktivierten Funktionslayer sind dabei immer dunkler als die inaktivierten gekennzeichnet. Dazu wird es notwendig, daß sich die Geometrien respektive Aktivierungen der unterschiedlichen Schichtbereiche unabhängig voneinander erweitern oder zurückziehen können. Dies erfolgt in dieser konzeptionellen Darstellung primär in der z-Achse. Durch diese Justierbarkeit wird versucht der konzeptionellen Hüllstruktur ein Maximum an Adaptivität für unterschiedliche Schaltzustände zu ermöglichen, die Hülle „atmet“ sozusagen, je nach umgebenden Umwelt- und Nutzungseinflüssen.

Zum besseren Verständnis ist dies in den folgenden vier Zuständen anhand der Abb. 4.3.1 bis 4.3.4 und in Form von außen eintreffender UV A-Strahlungen und ihres zuständigen Schichtenspezialisten oder Funktionslayers dargestellt. Dabei ist zu erkennen, welche geometrischen Veränderungen zur Aktivierung vorgenommen werden könnten. Die Abb. 4.3.1 zeigt dabei exemplarisch wie ein, mittels einem violetten Pfeil dargestellten, UV A-Eintrag durch die Schichtenabfolge hinweg bis ins Innere vorarbeiten kann. Die einzelnen Schichten sind dabei im Hintergrund in einem deaktivierten Zustand dargestellt. In der Abb. 4.3.2 ist dann ein aktivierten Schichtenbereich zu erkennen, der für die eintreffenden Strahlung einen Widerstand darstellen soll. Beachtet man nun die Abb. 4.3.2 und dort den „Spezialisten Energiegewinnung“, erkennt man, dass sich diese Schicht nach innen hin vergrößert hat, dabei jedoch noch sehr durchlässig erscheint. Der violette Pfeil hat dazu an durchdringender Stärke verloren, ein kleinerer Pfeil darunter zeigt erste absorbierende Leistungen. In den Abb. 4.3.3 bis 4.3.4 wird dieser Prozess immer deut-



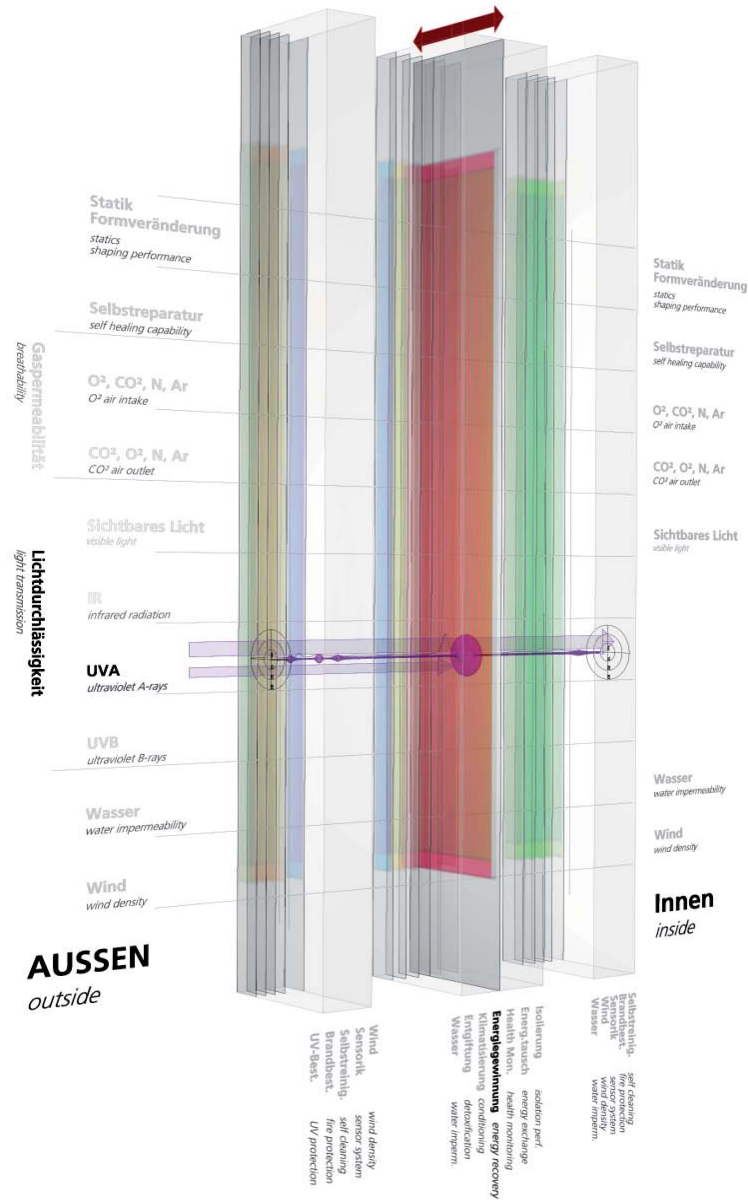
Die UV-A Schicht ist deaktiviert. Man erkennt, dass alle Funktionslayer noch in ihren Ausbreitungstaschen „parken“ und die Strahlung ungehindert oder ungefiltert bis ins Innere durchdringen kann. Der violette Pfeil zeigt in der Ausdehnung in der y-Richtung seine Dimension.

Abb. 4.3.1: Perspektivische Darstellung der deaktivierten Schichten



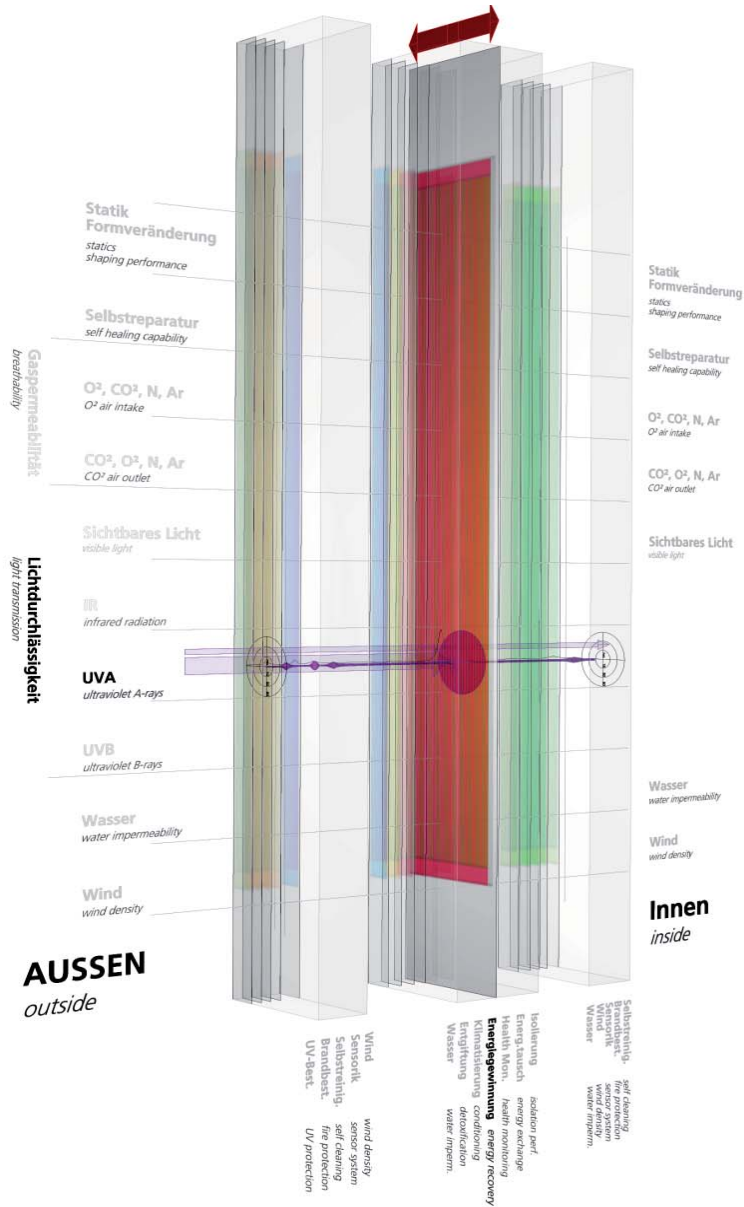
Die UV-A Schicht ist aktiviert, ihre graduelle absorbierende Leistungsfähigkeit liegt bei ca. 30%. Stellvertretend dafür steht die Transparenz der Darstellung, je opaker desto leistungsfähiger. Dieser Teil der Strahlung wird dann je nach eingebundenem Phänomen in Energie gewandelt. Der rote Pfeil oben stellt die Bewegungsrichtung dar.

Abb. 4.3.2: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 01 -



Die UV-A Schicht hat nun eine Leistungsfähigkeit von ca. 60%, was man an der Färbung der Schicht erkennen soll. Die beiden violetten Pfeile zeigen das Maß der Durchdringung und das Maß der Absorption.

Abb. 4.3.3: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 02 -



Die UV-A Schicht hat nun eine Leistungsfähigkeit von ca. 90%, was man an der Färbung der Schicht erkennen soll. Die beiden violetten Pfeile zeigen das Maß der Durchdringung und das Maß der Absorption.

Abb. 4.3.4: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 03 -

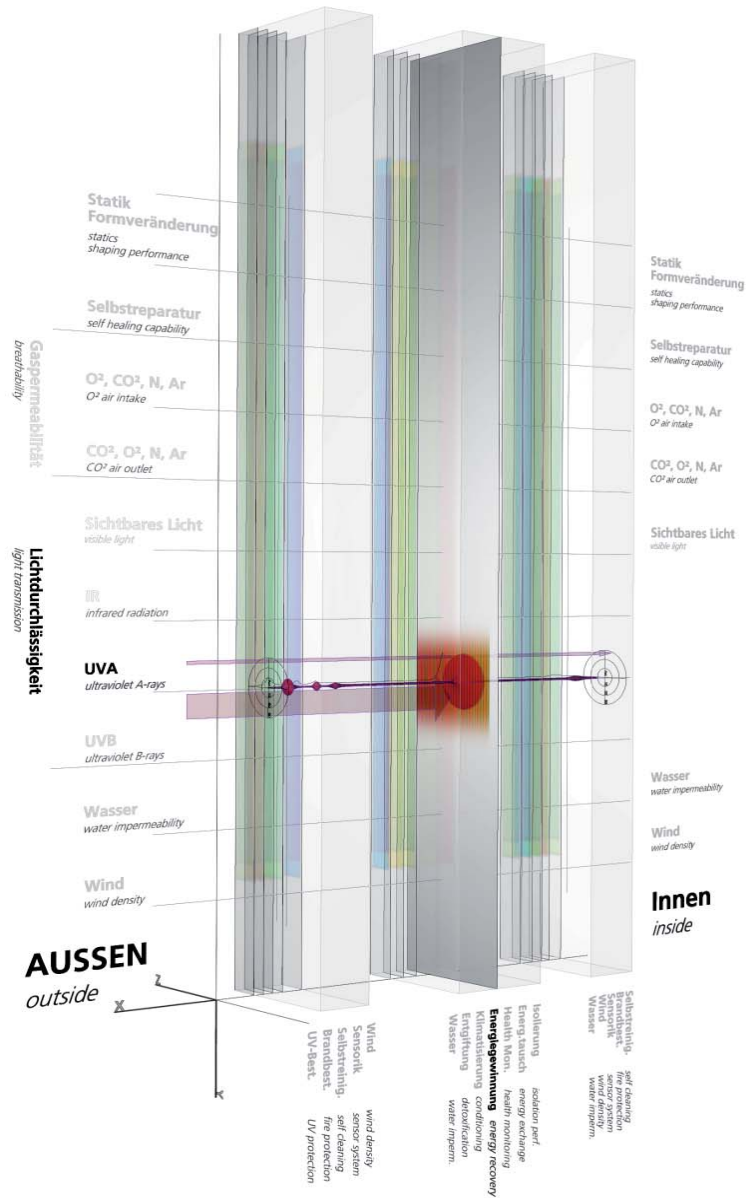
licher und führt schlussendlich zu einer maximalen Reflexion oder Absorption (je nach Anforderung, siehe dazu auch die Szenarien). Dargestellt wird diese ansteigende Leistungsfähigkeit durch eine zunehmend kräftigere und nachlassend transparente Fläche, die hier leicht gelb-grünlich ausgewählt wurde, analog der Färbung verschiedener Amphibienarten.

4.4 Adaptivität der Schichten in y-Richtung

Die selektive Adaptivität in y-Richtung wird in den folgenden Abb. 4.4.1 bis 4.4.4 näher beschrieben und dargestellt. Auf Grundlage des aktivierten Funktionslayers „Energiegewinnung“ soll verdeutlicht werden, dass die Intensität der erforderlichen Absorption in diesem Beispiel nicht über den Layer hinweg homogen erfolgt, sondern nur dort auftritt, wo es die Anforderung erfordert. Dies soll dazu führen, dass einzelne Schichtenkomponenten an unterschiedlichen und auch wechselnden Positionen aktiviert, intensiviert oder deaktiviert werden können sollen.

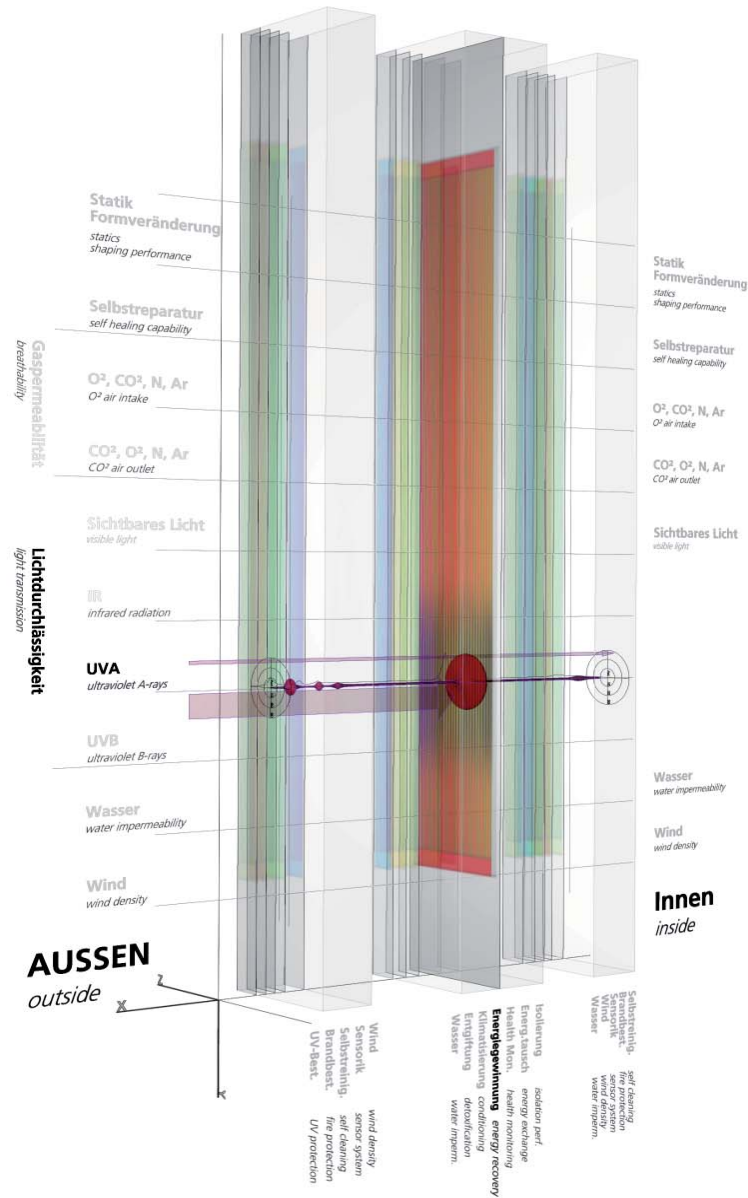
Dies ist auch ein Ansatz für die nächsten Schritte einer weiteren Bearbeitung und Entwicklung einer solchen Hüllstruktur, denn die selektive Adaptivität ist nur aufgrund der Darstellungsart sichtbar. Durch das matrixartige Aufteilen der Anforderungen und gekreuzten und überlagerten Funktionslayer in x-, y- und z-Richtung kann eine solche Wirkungsweise erst dargestellt werden, da sie bei einer gänzlich überlagerten Mehrschichtfunktion wesentlich indirekter und undeutlicher erkennbar wäre. Wichtig ist hier diese Wirkungsweise einer lokalen selektiven Maßnahme festzuhalten, damit klar wird, dass sich die Leistungsfähigkeit analog zu den natürlichen Systemen nicht per se über einen ganzen Funktionslayer gleichmäßig verteilen muss, sondern gezielt und lokal auf Einwirkungen reagieren können soll.

In den Abb. 4.4.2 und 4.4.3 sind daher verschiedene Überlagerung im Vorfeld der Szenarien unter 4.5 bis 4.8 gezeigt, die erste graduelle und selektive Wirkungsweisen darstellen sollen.



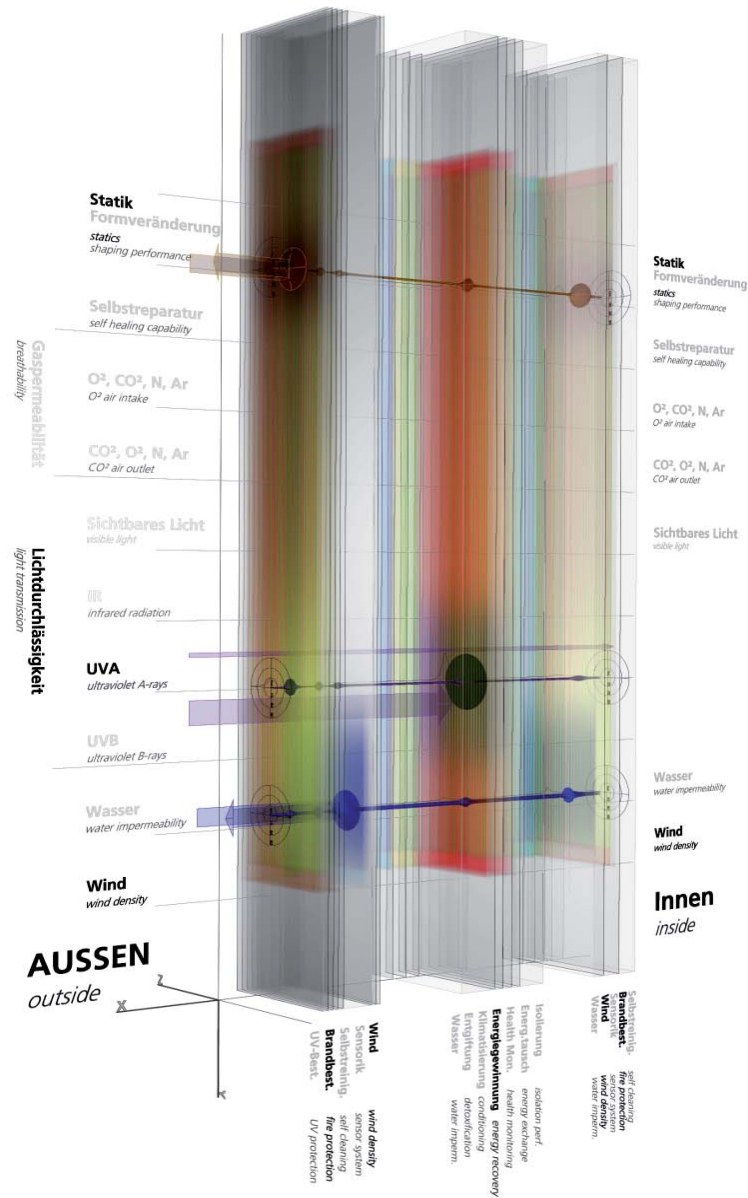
Die UV-A Schicht zeigt hier nur eine lokale Reaktion auf eintreffende Strahlungen, was man an der punktuellen Färbung der Schicht erkennen soll. Die beiden violetten Pfeile zeigen das Maß der Durchdringung und das Maß der Absorption.

Abb. 4.4.1: Perspektivische Darstellung der selektiv aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand 01 -



Die UV-A Schicht ist hier flächiger aktiviert, bietet also eine Grundeistung gegenüber der Strahlung. Dennoch sollen sich einzelne lokale Bereiche zusätzlich intensivieren können, was man an der lokal dunkleren Färbung der Schicht erkennen soll. Die beiden violetten Pfeile zeigen das Maß der Durchdringung und das Maß der Absorption.

Abb. 4.4.2: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 02 -



Hier wirken nun drei unterschiedliche Kräfte auf die Layer. Die UV-A Strahlung, eine mögliche Erwärmung durch z.B. Brandgefahr und zusätzlich eine Belastung durch Wind. Demzufolge reagiert die Hüllstruktur mit zumeist lokalen Reaktionen, was man an der punktuellen Färbung der Schicht erkennen soll. Die Pfeile zeigen jeweils das Maß der Durchdringung und das Maß der Reflexion.

Abb. 4.4.4: Perspektivische Darstellung mehrerer selektiv aktivierten Schichten

In der Abb. 4.4.3 sind folgende Einflüsse und Gegenreaktionen dargestellt:

- Die UV-A Strahlung und eine mögliche Erwärmung durch z.B. Brandgefahr oder auch erhöhte IR-Werte in der näheren Umgebung. Demzufolge reagiert die Hüllstruktur mit lokalen und leicht homogenen Reaktionen jeweils auf den dafür vorgesehen Funktionslayern, die schwarz im unteren und linken Bereich dargestellt sind. Dies erkennt man an der punktuellen Färbung der Schicht, wobei die Pfeile jeweils das Maß der Durchdringung und das Maß der Reflexion darstellen sollen.

In der Abb. 4.4.4 sind folgende Einflüsse und Gegenreaktionen dargestellt:

- Hier wirken nun drei unterschiedliche Kräfte auf die Layer. Die UV-A Strahlung, eine mögliche Erwärmung und zusätzlich eine Belastung durch Windkräfte, die negativ für das konvektive Verhalten der Struktur sein können. Demzufolge reagiert die Hüllstruktur mit zumeist lokalen Reaktionen, was man an der punktuellen Färbung der Schicht erkennen soll. Die Pfeile zeigen jeweils das Maß der Durchdringung und das Maß der Reflexion.

Die übergreifenden Spezialisten sind jedoch nicht zu jeder Zeit vollausgelegt, sondern möglichst immer nur so stark aktiviert, wie es die äußeren und inneren Bedingungen einfordern. Herrschen z.B. aufgrund der durch die Sensorik (analog zum Brandkäfer) gemessenen hohen Konzentration von Infrarotstrahlungen erhöhte Anforderungen nach Brandbeständigkeit, zudem aber auch eine hohe isolierende Leistung nebst der Aktivierung der Selbstreinigende Funktion, ergibt sich ein anderes Layout der Hüllstruktur, als wenn z.B. geringe oder keine Dämmanforderungen und ein zugleich ein hohes Maß an Witterungsschutz erforderlich sind. Dies z.B. um eine verlängerte Energieaustauschflächen zu generieren oder auf Grund der Maximierung des Flächenträgheitsmomentes eine höhere statische Leistungsfähigkeit zu erzeugen.

In den nächsten Abbildungen des Kapitels 4.6 werden verschiedene Szenarien vorgestellt, denen sich die konzeptionelle Bionisch inspirierte Hüllstruktur anpassen können soll. Dabei ist zu beachten dass diese Zustände jeweils nur Momentaufnahmen sein können, da es eigentlich angedacht ist, daß sich die Hüllstruktur permanent einstellt, nachjustiert und verändert. Diese graduellen Veränderbarkeiten können aus darstellungstechnischen Gründen im Folgenden nicht gezeigt werden.

Der Schwerpunkt der vier vorgeschlagenen Szenarien basiert auf wesentlichen Zuständen, die sich dann in die eine oder andere Richtung hin weiterentwickeln. Die ausgewählten Zustände sind thematisch an bekannte Witterungssituationen angelehnt und sollen so zu einer Einschätzbarkeit einer möglichen Leistungsfähigkeit der entworfenen Hüllstruktur führen. Dabei werden die im Vorfeld erarbeiteten Komponenteneigenschaften jeweils in unterschiedlicher Gewichtung innerhalb des dargestellten Szenarios gekennzeichnet.

Wichtig ist dabei, dass deutlich wird, welche „aktive“ Rolle die Hüllstruktur dabei übernehmen muss, um auf kleinstem Raum permanent justabel den idealen Balancezustand ihrer optimalen Leistungsfähigkeit zu finden. Besonders spannend ist hier für den Architekten natürlich auch, welche gestalterischen Konsequenzen diese atmende, lebendige oder auch belebte Hüllstruktur innerhalb einer Fassadengestaltung einnehmen könnte.

Einschränkend muss jedoch auch gesagt werden, dass die gewählten Farbe hier eher der Darstellung als der Funktionalität dienen.

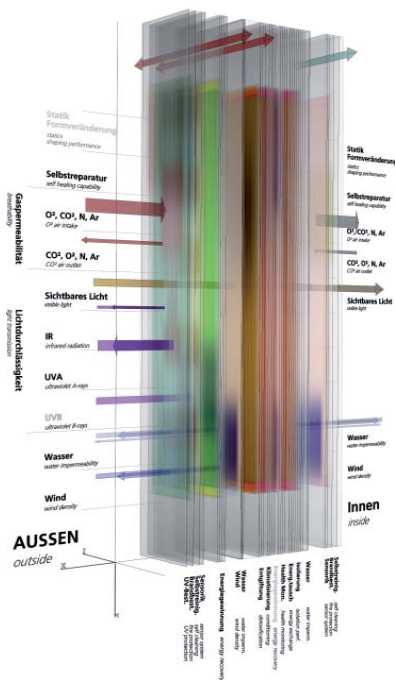


Abb. 4.6.1: Diagrammatische Darstellung (Szenario 1)

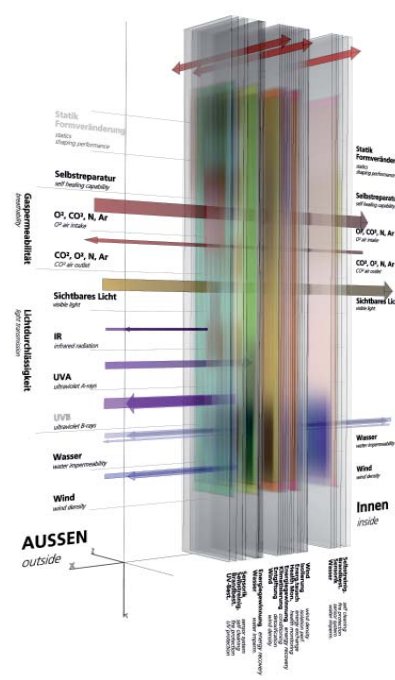


Abb. 4.6.2: Diagrammatische Darstellung (Szenario 2)

4.6 Szenarien I-IV

In den folgenden vier Szenarien werden typische Wetter- und Witterungsbedingungen dargestellt, denen sich die Bionisch inspirierte Gebäudehülle anpassen soll. Es handelt sich dabei um die weiter unten beschriebenen Anforderungsszenarien:

- Schaltzustand während eines sonnigen Hochsommertages mit Außenlufttemperaturen um die 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 50%.

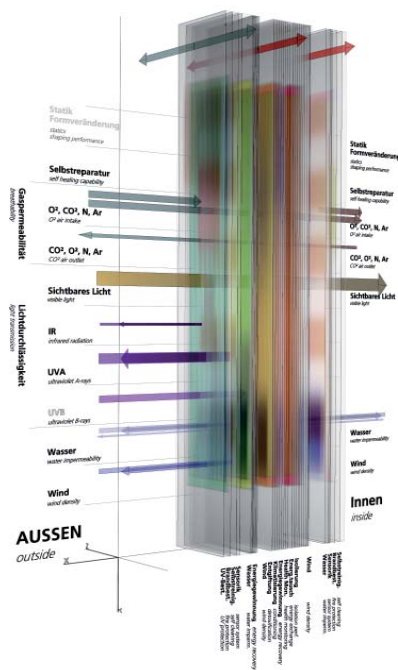


Abb. 4.6.3: Diagrammatische Darstellung (Szenario 3)

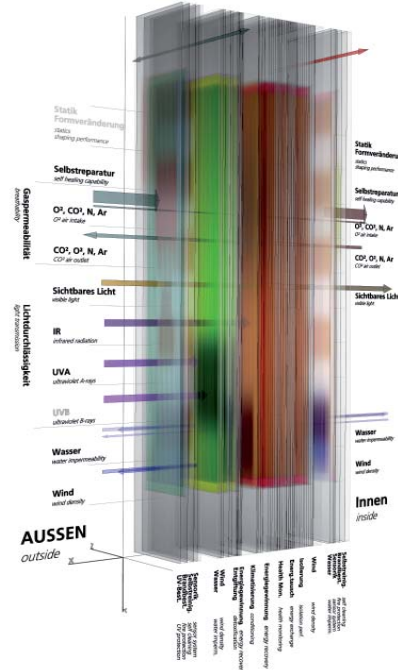


Abb. 4.6.4: Diagrammatische Darstellung (Szenario 4)

- Schaltzustand während eines trüben, diesigen Sommertages mit Außenlufttemperaturen um die 20 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 70%.
- Schaltzustand während eines sonniger Wintertages mit Außenlufttemperaturen um die 10 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 40%.
- Schaltzustand während eines trüben und sonnenlosen Wintertages mit Außenlufttemperaturen um die -5 °C und einer Luftfeuchtigkeit um die ca. 30%.

4.6.1 Szenario I

Dargestellt ist der Schaltzustand während eines sonnigen Hochsommertages mit Außenlufttemperaturen um die 25-30 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 50%. Wichtig ist hier eine hohe Dämmleistung, kein direkter Austausch von energie- oder wärme geladenen Gasen und eine möglichst hohe Energiegewinnung durch photovoltaische Wandlung und nicht durch Absorption. Der Gasaustausch erfolgt über alveolenartige Mikroporen, die den Sauerstoff und das Kohlendioxid mittels eines Trägermediums zwischen Innen und Außen austauschen. Der Energieaustausch im Bereich der Mittelzone könnte affin zum *Rete mirabile* erfolgen, wobei die Energieaustauschfläche wie auch die Dämmleistung in die Länge entwickelt sind und sich damit erhöhen sollen. Die UVA Strahlungen werden von der UV-Schicht reflektiert und es entstehen außen zwei und innen eine Transportzone, die z.B. eine konvektive Kühlung unterstützen könnte. Zu den einzelnen Funktionslayern:

- **Gasaustausch:** Der außen anstehende Sauerstoff soll mittels mikroporöser Poren, inspiriert durch die Funktionsweise amphibischer Hautatmungen, in ein Trägermedium (=Blut) aufgenommen und gelöst werden und dann im Mittelbereich durch eine Entgiftungsschicht diffundieren (affine Wirkungsweise des Retikulum). Durch die isolierenden Bereiche hindurch, in denen dem Trägermedium Energie und Wärme entzogen oder zugegeben werden kann (inspiriert durch das *Rete mirabile*), soll der konditionierte Sauerstoff an den Innenraum abgegeben werden. Die Schichtendimension in x-Richtung ist dabei variabel. Die Aufnahme des verbrauchten Kohlendioxides der Innenraumluft soll analog in ein Trägermedium gelöst werden, das im Mittelbereich in fast direktem Kontakt zum einströmenden Medium steht, wodurch ein optimaler Energieaustausch erreicht werden soll. Dahinter steht die Idee, die relativ warme Außenluft und die kühlere Innenraumluft (ca. 24 °C), inspiriert durch die Hautatmung verschiedener Amphibien, auf affine Weise in ein Medium zu lösen, so daß kein direkter Kontakt der unterschiedlich konditionierten Bereiche erfolgen kann. Dies ist natürlich auch im Umkehrschluss denkbar, wenn außen Minusgrade und innen Plusgrade herrschen.
- **IR-Strahlung:** Die von außen eintreffende IR-Strahlung im Bereich von 750-2500 nm wird in der UV-Funktionsschicht des äußeren Schichtenbereiches

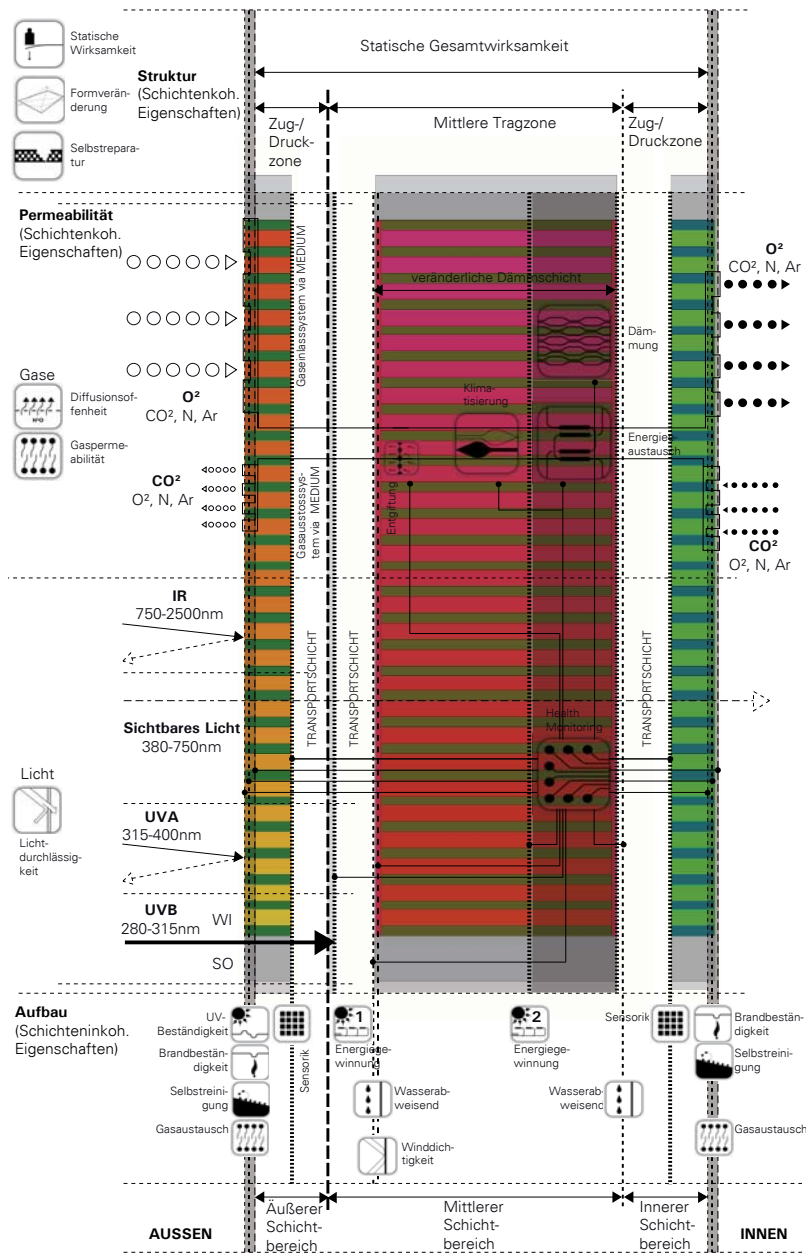
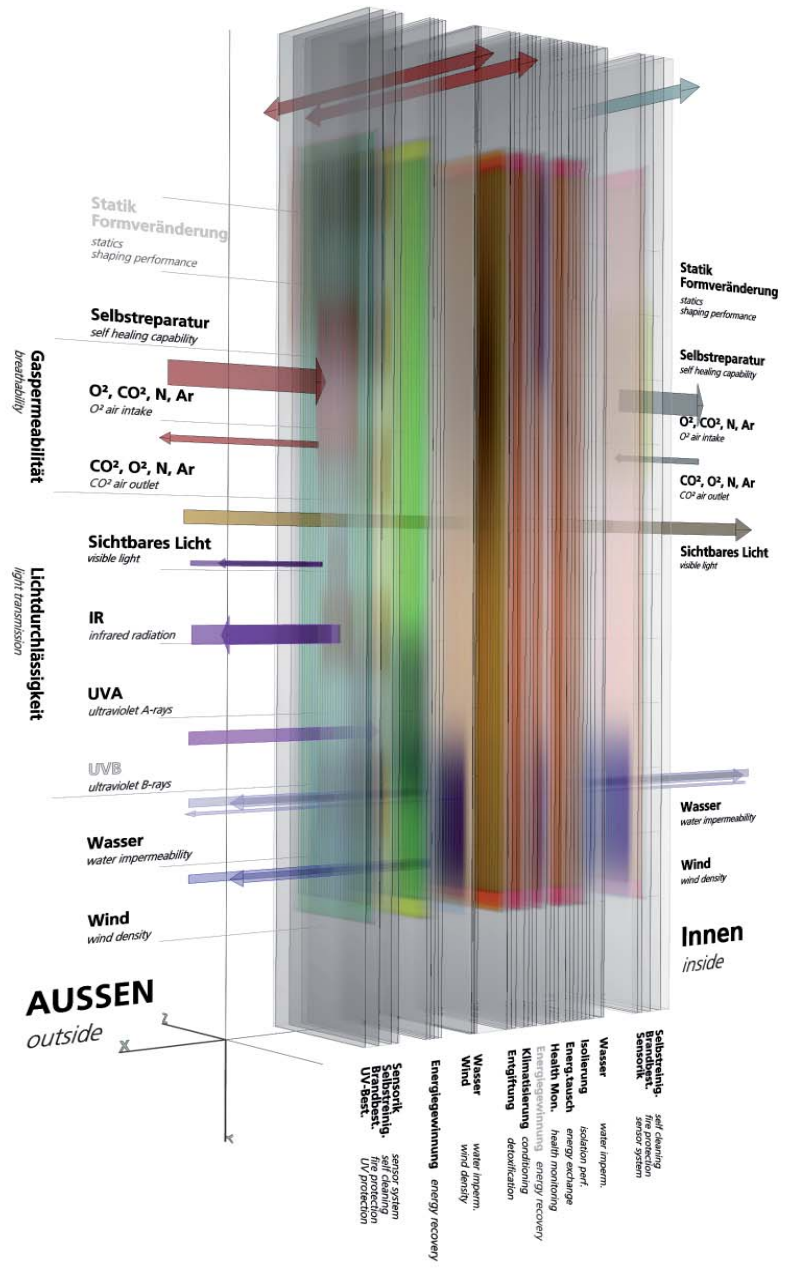


Abb. 4.6.1.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 1)



Schaltzustand während eines sonnigen Hochsommertages mit Außenlufttemperaturen um die 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 50%.

Abb. 4.6.1.2: Perspektivische Visualisierung (Szenario 1)

maximal reflektiert, damit keine Wärmeeinträge der inneren Schichten möglich werden können, die über einen längeren Zeitraum hinweg zu Erwärmung der Hüllstruktur führen könnten.

- **Sichtbares Licht:** Das von außen eintreffende sichtbare Lichtspektrum im Bereich von 380-750 nm soll möglichst frei durch alle Schichten diffundieren können, sowohl von innen nach außen wie vice versa. Wie weit dies beim angedachten Schichtenaufbau möglich ist, muss erst überprüft werden, denkbar ist jedoch eine Transparenz affin zum chitinösen Schichtenaufbau von Insektenflügeln wie z.B. beim Rosenkäfer, die ähnlich dimensionierte Schichtdicken aufweisen. Welche Einwirkungen die anderen Funktionslayer auf diese Transparenz haben, kann an dieser Stelle noch nicht festgestellt werden, da hier weiterführende Umsetzungsversuche von Nöten sind.
- **UV A-Strahlung:** Die von außen eintreffende UV A-Strahlung im Bereich von 315-400 nm wird in der UV-Funktionsschicht des äußeren Schichtenbereiches reflektiert.
- **UV B-Strahlung:** Die eintreffende UV B-Strahlung im Bereich von 280-315 nm wird, inspiriert durch die thermoelektrischen Beschichtung der Hornissenhaut, im äußeren Schichtenbereich absorbiert und dort in photovoltaische Energie gewandelt. Wichtig ist hierbei, dass außerhalb und innerhalb dieser photovoltaischen Schicht eine konvektive Transportschicht zur Verfügung steht, die zur Kühlung oder Erwärmung des energiegewinnenden Funktionslayers eingesetzt wird. Die zu- oder abgeführten Luftmolekülen könnten wiederum in einen kybernetischen Kreislauf eingebunden sein, der u.U. mit dem Kreislauf des Trägermediums des Gasaustausches gekoppelt ist.
- **UV-Strahlungsbeständigkeit:** Aufgabe dieser Funktionsschicht ist das gezielte Durchführen oder das koordinierte Reflektieren der eintreffenden Strahlungen in Abstimmung mit den darunterliegenden Funktionslayern je nach Szenario und Aufgabe. Vorbild dieser Funktionsweise könnten spezielle, in eine Schicht eingelagerte, Melaninproteine sein, die verschiedene Quallenarten zum Schutz vor zu hohem UV-Eintrag auf der Meeresoberfläche benutzen.

- **Brandbeständigkeit außen:** Aufgabe dieser Funktionsschicht ist der Schutz der darunterliegenden Funktionslayer vor Brand und erhöhten Infrarotwerten. Inspiriert durch die Funktionsweise des Brandkäfers könnte diese Schicht aus chitinösen Sensoren bestehen, die auf spezielle Wellenlängen des infraroten Bereiches reagieren und sich dann als nichtbrennbares Material ausdehnen, um einen Brandeintritt in die Hüllstruktur zu verhindern.
- **Selbstreinigung innen:** Aufgabe dieser vordersten Funktionsschicht ist der Schutz der Hüllstruktur vor Verunreinigung und daraus resultierenden Funktionsdefiziten. Inspiriert durch die Funktionsweise der Rosenkäferhaut könnte diese Schicht aus kleinsten chitinösen Elementen bestehen, die aufgrund unterschiedlicher Größen in der Lage ist das Anschmutzverhalten der Hüllstruktur zu verbessern. Zu beachten ist hierbei, dass teilweise ein Eintritt der Wassermoleküle bis zur Entgiftungsschicht gewünscht ist und daher eine Interaktion dieser beiden Schichten notwendig wird.
- **Sensorik außen:** Bei diesem Szenario stehen folgende sensorischen Leistungen im äußeren Schichtenbereich im Vordergrund:
 - IR- UV A- und UV B Strahlungsgehalt, Photonenenergie
 - Lichtintensität/Lichthelligkeit
 - Luftfeuchtigkeit
 - Außentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Windgeschwindigkeit
 - Geruchsimmissionen
- **Energiegewinnung 1:** Die Aufgabe dieses Funktionslayers steht im Zusammenhang mit dem UV B-Strahlungseintrag, der schon weiter vorne erläutert wurde.
- **Wasserdichtigkeit außen:** Die von außen auftretenden Einwirkungen durch Wassermoleküle werden gezielt vor und hinter der Mittelschicht mittels einer

porösen Schicht am Durchgang gehindert. Dies stellt eine Konsequenz aus den untersuchten Phänomenen dar, bei denen die isolierenden Bereiche zu meist sehr wassermolekülarm sind. Dennoch kann eine intelligente Wasserschichtführung von großen Nutzen sein, wenn sie z.B. zum Abtransport der durch die Entgiftung ausgeschiedenen Substanzen vor der Mittelschicht dient. Daher ist zumindest ein einhüftiger Anschluss an eine der Transportschichten sinnvoll.

- **Winddichtigkeit:** In Kombination mit der Wasserdichtigkeit könnte die winddichte Schicht, die aus heckenähnlichen Strukturen, inspiriert durch das Fellhaar des Robbenfells, bestehen könnte, ähnlich „tief“ angeordnet sein, um bei denen im Vorfeld angesprochenen Witterungsbedingungen für eine zusätzliche konvektive Leistung vor und hinter der energiegewinnenden Schicht zu sorgen. Dabei muss die jeweilige Temperatur der anströmenden Luftmoleküle jedoch sensitiv beachtet werden, damit sich die Hüllstruktur nicht wärmetechnisch auflädt.
- **Energiegewinnung 2:** Dieser Funktionslayers ist in diesem Szenario deaktiviert.
- **Wasserdichtigkeit innen:** Die Aufgabe dieser Schicht liegt darin, von innen auftretenden Wassereintritt zu unterbinden, wobei Wasserdampfmoleküle frei durch die Hüllstruktur diffundieren können und vor dem Mittelbereich in der Transportschicht mittels Konvektion angeführt werden können sollen. Die dort enthaltene Energie und Feuchte wird dabei der einströmenden Luft zugegeben. Eventuell anfallendes Kondensat möglicher themischer Extremsituationen soll in der inneren Transportschicht quasi als „2. Entwässerungsebene“ abgeführt werden können, wobei dabei der Durchmesser dieser Schicht zu überprüfen ist.
- **Sensorik innen:** Bei diesem Szenario stehen folgende sensorischen Leistungen im äußeren Schichtenbereich im Vordergrund:
 - Lichtintensität/Lichthelligkeit

- Luftfeuchtigkeit
 - Innentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Geruchsimmissionen
- **Brandbeständigkeit innen:** siehe auch Anforderung von außen.
 - **Selbstreinigung innen:** siehe auch Anforderung von außen.

4.6.2 Szenario II

Schaltzustand während eines trüben, diesigen Sommertages mit Außenlufttemperaturen um die 20 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 70%. Die Dämmleistung ist hier eher untergeordnet, da sich die Innen- und die Außentemperatur angleichen. Da keine Transmissionsverluste zu erwarten sind, erfolgt ein direkter gefilterter Austausch von energie- oder wärme geladenen Gasen und eine möglichst hohe Energiegewinnung durch Absorption des diffusen indirekten Lichtes. Der Gasaustausch erfolgt inspiriert durch die Struktur des Fliegeeneies über basenartige Poren, die den Sauerstoff und das Kohlendioxid direkt zwischen Innen und Außen austauschen und dabei minimale Temperaturschwankungen aufnehmen und speichern können. Die Dämmleistung ist verkürzt und damit transparenter, die UV-B Strahlungen werden von der UV-Schicht reflektiert und es entstehen zwei größere Hinterlüftungszwischenräume, die eine puffernde Wirkung in den Morgen- und Abendstunden unterstützen können. Zu den einzelnen Funktionslayern:

- **Gasaustausch:** Da sich Innen- und Außentemperatur nahezu gleichen, kann der außen anstehende Sauerstoff tagsüber frei durch den äußeren Schichtenbereich diffundieren bevor er dann im Mittelbereich dann durch eine Entgiftungsschicht gefiltert wird (analog dem Retikulum). Durch den hier verkürzt ausgelegten isolierenden Bereiche hindurch, in denen dem vorbeiströmenden Molekülen dann Energie und Wärme entzogen oder zugegeben werden können, soll der konditionierte Sauerstoff dann wiederum frei an den Innenraum abgegeben werden. Die Schichtendimension in x-Richtung ist dabei gegenü-

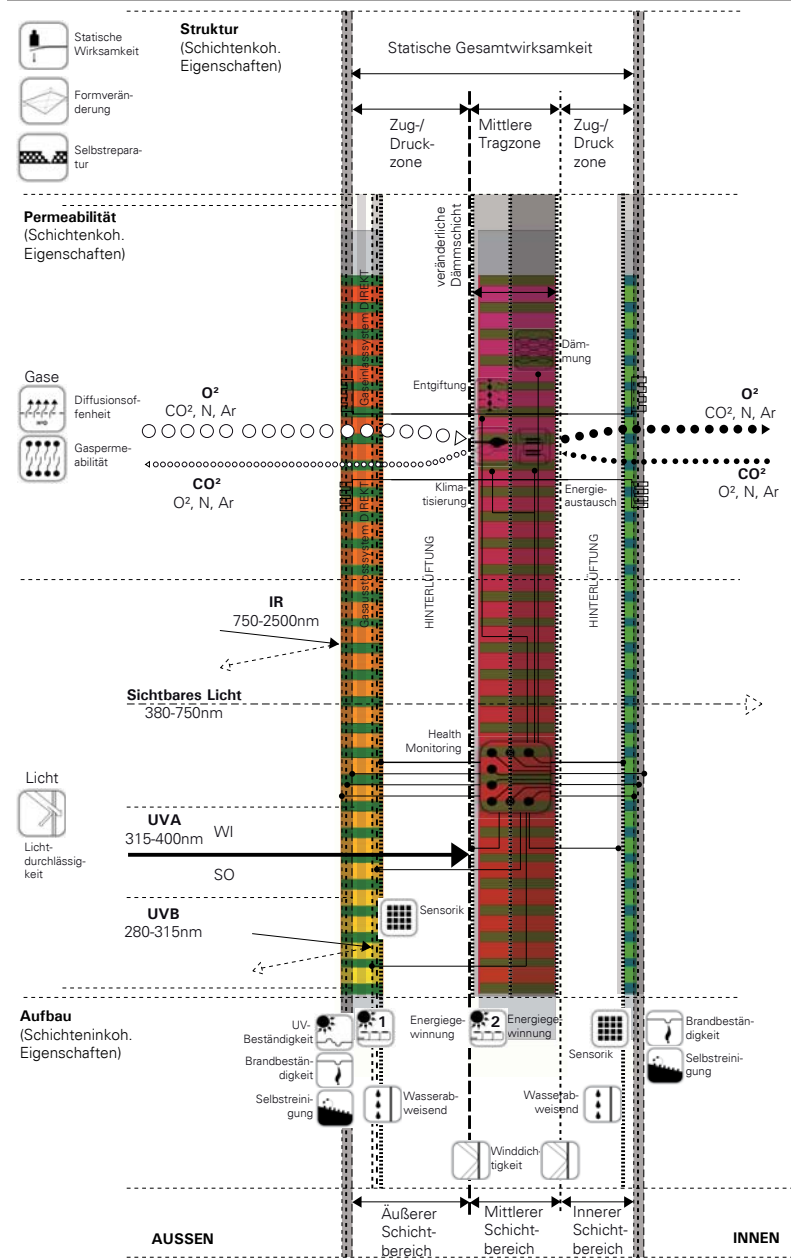


Abb. 4.6.2.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 2)

ber dem Szenario I stark verjüngt, da die isolierende Leistung hier nicht im Vordergrund steht. Die Aufnahme des verbrauchten Kohlendioxids der Innenraumluft soll analog erfolgen, wobei auch hier ein fast direkter Kontakt zum einströmenden Sauerstoff besteht, wodurch ein optimaler Energieaustausch erreicht werden soll.

- **IR-Strahlung:** Die von außen eintreffende IR-Strahlung im Bereich von 750-2500 nm wird in der UV-Funktionsschicht des äußeren Schichtenbereiches maximal reflektiert, damit keine Wärmeeinträge der inneren Schichten möglich werden können, die über einen längeren Zeitraum hinweg zu Erwärmung der Hüllstruktur führen könnten. In den Morgen- oder Abendstunden könnte dies jedoch in affiner Funktionsweise zur Dunkelfärbung verschiedener Amphibienhäute ein zusätzlicher Wärmeeintrag sein.
- **Sichtbares Licht:** Das von außen eintreffende sichtbare Lichtspektrum im Bereich von 380-750 nm soll möglichst frei durch alle Schichten diffundieren können, sowohl von innen nach außen wie vice versa.
- **UV A-Strahlung:** Die von außen eintreffende UV A-Strahlung im Bereich von 315-400 nm wird durch die äußeren Schichtenbereiche hindurchgelassen und erst vor der Mittelschicht absorbiert. Dies soll, in Anlehnung an die Fähigkeit zur Farbanpassung des Leguans z.B., dazu führen, dass die isolierende Schicht tagsüber mit Wärmeeinträgen „aufgeladen“ werden kann, um in den Abendstunden zeitverzögert nach und nach noch Wärmeenergie an den Innenraum abgeben zu können.
- **UV B-Strahlung:** Die eintreffende UV B-Strahlung im Bereich von 280-315 nm wird analog der thermoelektrischen Beschichtung der Hornissenhaut im äußeren Schichtenbereich absorbiert und dort in photovoltaische Energie gewandelt. Eine innengeführte konvektive Transportschicht sorgt zusätzlich zur Kühlung oder Erwärmung des energiegewinnenden Funktionslayers.
- **UV-Strahlungsbeständigkeit:** Aufgabe dieser Funktionsschicht ist das gezielte Durchführen oder das koordinierte Reflektieren der eintreffenden Strahlungen

in Abstimmung mit den darunterliegenden Funktionslayern je nach Szenario und Aufgabe.

- **Brandbeständigkeit außen:** Aufgabe dieser Funktionsschicht ist der Schutz der darunterliegenden Funktionslayer vor Brand und erhöhten Infrarotwerten. Analog der Funktionsweise des Brandkäfers könnte diese Schicht aus chitinösen Sensoren bestehen, die auf spezielle Wellenlängen des infraroten Bereiches reagieren und sich dann als nichtbrennbares Material ausdehnen, um einen Brandeintritt in die Hüllstruktur zu verhindern.
- **Selbstreinigung innen:** Aufgabe dieser vordersten Funktionsschicht ist der Schutz der Hüllstruktur vor Verunreinigung und daraus resultierenden Funktionsdefiziten. Analog der Funktionsweise der Rosenkäferhaut könnte diese Schicht aus kleinsten chitinösen Elementen bestehen, die aufgrund unterschiedlicher Größen in der Lage ist das Anschmutzverhalten der Hüllstruktur zu verbessern. Zu beachten ist hierbei, dass teilweise ein Eintritt der Wassermoleküle bis zur Entgiftungsschicht gewünscht ist und daher eine Interaktion dieser beiden Schichten notwendig wird.
- **Sensorik außen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt:
 - IR- UV A- und UV B Strahlungsgehalt, Photonenenergie
 - Lichtintensität/Lichthelligkeit
 - Luftfeuchtigkeit
 - Außentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Windgeschwindigkeit
 - Geruchsimmissionen
- **Energiegewinnung 1:** Die Aufgabe dieses Funktionslayers steht im Zusammenhang mit dem UV B-Strahlungseintrag, der schon weiter vorne erläutert wurde.

- **Wasserdichtigkeit außen:** Die von außen auftretenden Einwirkungen durch Wassermoleküle werden gezielt vor und hinter der Mittelschicht mittels einer porösen Schicht am Durchgang gehindert. Dies stellt eine Konsequenz aus den untersuchten Phänomenen dar, bei denen die isolierenden Bereiche zu meist sehr wassermolekülarm sind. Dennoch kann eine intelligente Wasserschichtführung von großen Nutzen sein, wenn sie z.B. zum Abtransport der durch die Entgiftung ausgeschiedenen Substanzen vor der Mittelschicht dient. Daher ist zumindest ein einhüftiger Anschluss an eine der Transportschichten sinnvoll.
- **Winddichtigkeit:** In Kombination mit der Wasserdichtigkeit könnte die winddichte Schicht, die aus heckenähnlichen Strukturen analog dem Fellhaar des Robbenfells bestehen könnte, ähnlich „tief“ angeordnet sein, um bei denen im Vorfeld angesprochenen Witterungsbedingungen für eine zusätzliche konvektive Leistung vor und hinter der energiegewinnenden Schicht zu sorgen.
- **Energiegewinnung 2:** Dieser Funktionslayers übernimmt in diesem Szenario die Aufgabe die eintreffende UV A-Strahlung mittels Dunkelfärbung in den Morgenstunden und mittels Hellfärbung in den Abendstunden zu absorbieren. Dies sorgt innerhalb des Hüllsystems für eine zusätzliche Energiequelle, die in der Nähe des isolierenden Kerns direkt zur Entfaltung kommt.
- **Wasserdichtigkeit innen:** Die Aufgabe dieser Schicht liegt darin, von innen auftretenden Wassereintritt zu unterbinden, wobei Wasserdampfmoleküle frei durch die Hüllstruktur diffundieren können und vor dem Mittelbereich in der Transportschicht mittels Konvektion angeführt werden können sollen. Die dort enthaltene Energie und Feuchte wird dabei der einströmenden Luft zugegeben. Eventuell anfallendes Kondensat möglicher themischer Extremsituationen soll in der inneren Transportschicht quasi als „2. Entwässerungsebene“ abgeführt werden können, wobei dabei der Durchmesser dieser Schicht zu überprüfen ist.
- **Sensorik innen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt:

- Lichtintensität/Lichthelligkeit
 - Luftfeuchtigkeit
 - Innentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Geruchsimmissionen
- **Brandbeständigkeit innen:** siehe auch Anforderung von außen.
 - **Selbstreinigung innen:** siehe auch Anforderung von außen.

4.6.3 Szenario III

Dargestellt ist hier ein dritter Schaltzustand während eines sonniger Wintertages mit Außenlufttemperaturen um die 10 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 40%. Die Dämmleistung ist nun etwas gestreckt und soll das Temperaturdelta von ca. 10° zwischen Innen- und die Außenbereich ausgleichen. Die zu erwarteten Transmissionsverluste sind noch eher gering und sollen durch die Hindurchführung der energie- oder wärmegeladenen Gasen durch die isolierende Schicht abgedeckt werden. Unterstützt wird dies durch eine möglichst hohe Energiegewinnung durch Absorption des diffusen indirekten Lichtes in der Energieebene 2, die, inspiriert durch den Farbwechsel verschiedener Amphibienarten, direkt auf der Isolierung angedacht ist. Der Gasaustausch erfolgt wie in Szenario II über basenartige Poren und eine direkten Austausch wie in Szenario I, die Dämmleistung ist leicht erhöht, die UV A-Strahlungen werden von der UV-Schicht reflektiert und es entstehen zwei Hinterlüftungszwischenräume. Zu den einzelnen Funktionslayern:

- **Gasaustausch:** Der außen anstehende Sauerstoff soll sowohl mittels mikro-poröser Poren als auch mittels direktem Austausch aufgenommen und gelöst werden und dann im Mittelbereich durch eine Entgiftungsschicht diffundieren (analog dem Retikulum). Vorbild sind hier die Wechselzeiten zwischen dem Land- und dem Wasseraufenthalt verschiedener Amphibien, die zeitgleich zwei unterschiedliche Systeme zum Gasaustausch anwenden können. Durch

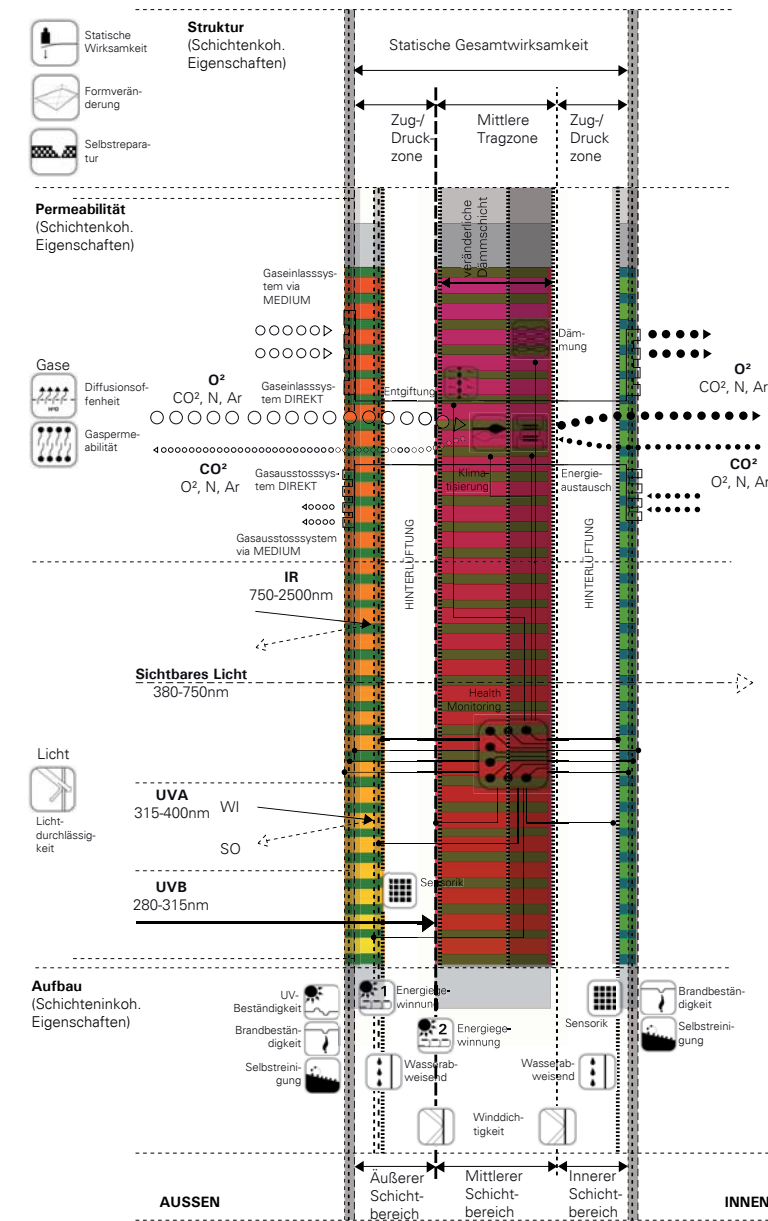
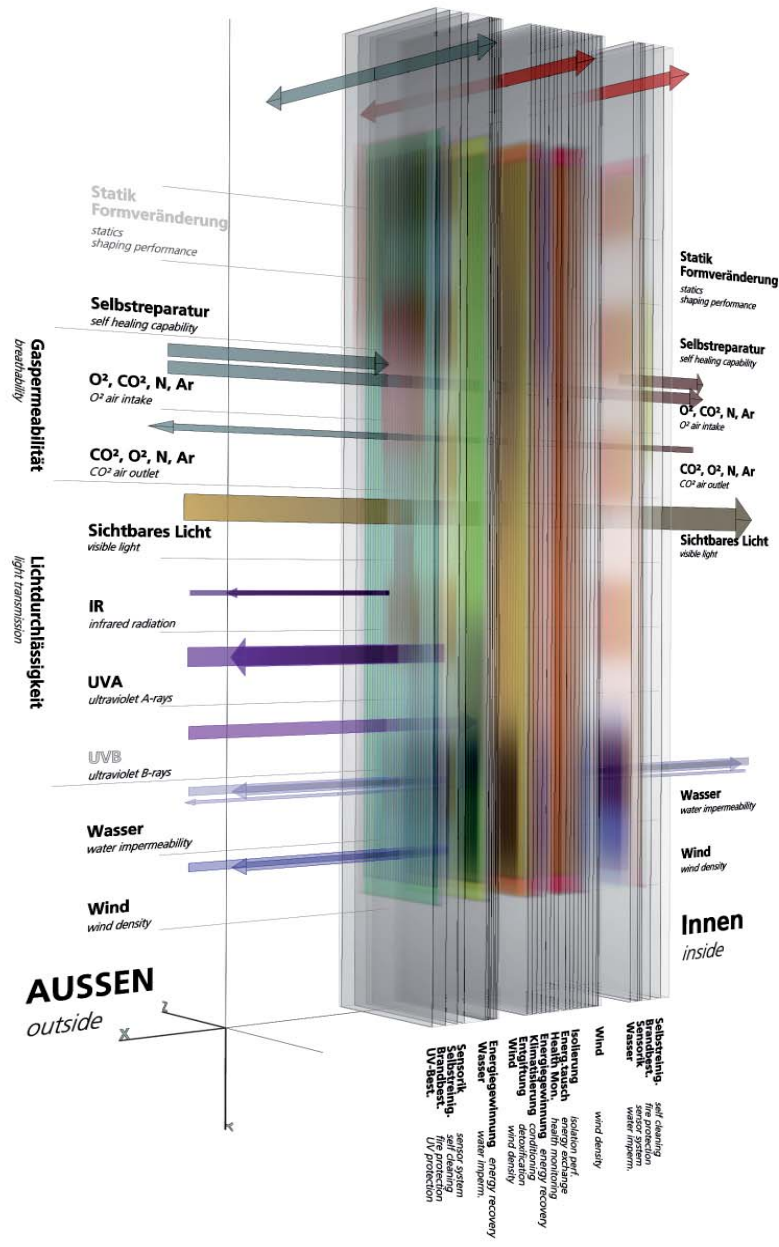


Abb. 4.6.3.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 3)



Schaltzustand während eines sonniger Wintertages mit Außenlufttemperaturen um die 10 °C und einer Luftfeuchtigkeit um ca. 40%.

Abb. 4.6.3.2: Perspektivische Visualisierung (Szenario 3)

die isolierenden Bereiche hindurch, in denen dem Trägermedium Energie und Wärme entzogen oder zugegeben werden kann (analog dem *Rete mirabile*), soll der konditionierte Sauerstoff an den Innenraum abgegeben werden. Die Schichtendimension in x-Richtung ist dabei variabel. Die Aufnahme des verbrauchten Kohlendioxides der Innenraumluft soll analog diesem Vorgang in ein Trägermedium gelöst werden, das im Mittelbereich in fast direktem Kontakt zum einströmenden Medium steht, wodurch ein optimaler Energieaustausch erreicht werden soll. Dahinter steht die Idee, die relativ kalte Außenluft und die wärmere Innenraumluft (ca. 20 °C) analog der Hautatmung verschiedener Amphibien so in ein Medium zu lösen, daß kein direkter Kontakt der unterschiedlich konditionierten Bereiche erfolgen kann.

- **IR-Strahlung:** Die von außen eintreffende IR-Strahlung im Bereich von 750-2500 nm wird bis auf die Energieebene 1 durchgelassen und soll die, in der Transportschicht vorbeigeführten Luftmoleküle, zusätzlich erwärmen, um die Dämmleistung der Gesamtstruktur auf kleinstem Raum zu erhöhen.
- **Sichtbares Licht:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Das von außen eintreffende sichtbare Lichtspektrum im Bereich von 380-750 nm soll möglichst frei durch alle Schichten diffundieren können, sowohl von innen nach außen wie vice versa. Wie weit dies beim angedachten Schichtenaufbau möglich ist, muss erst überprüft werden, denkbar ist jedoch eine Transparenz analog dem chitinösen Schichtenaufbau von Insektenflügeln wie z.B. beim Rosenkäfer, die ähnlich dimensionierte Schichtdicken aufweisen. Welche Einwirkungen die anderen Funktionslayer auf diese Transparenz haben, kann an dieser Stelle noch nicht festgestellt werden, da hier weiterführende Umsetzungsversuche von Nöten sind.
- **UV A-Strahlung:** Die von außen eintreffende UV A-Strahlung im Bereich von 315-400 nm wird in Anlehnung an die Wirkungsweise der IR-Strahlung weiter oben ebenso zur Erwärmung der Pufferschichten herangezogen.
- **UV B-Strahlung:** Die eintreffende UV B-Strahlung im Bereich von 280-315 nm wird, in Anlehnung an die Fähigkeit zur Farbanpassung des *Iguana Iguana* z.B.,

benutzt, um die isolierende Schicht tagsüber mit Wärmeeinträgen „aufzutanken“, um in den Abendstunden zeitverzögert nach und nach noch Wärmeenergie an den Innenraum abgeben zu können.

- **UV-Strahlungsbeständigkeit:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Aufgabe dieser Funktionsschicht ist das gezielte Durchführen oder das koordinierte Reflektieren der eintreffenden Strahlungen in Abstimmung mit den darunterliegenden Funktionslayern je nach Szenario und Aufgabe. Vorbild dieser Funktionsweise könnten spezielle, in eine Schicht eingelagerte, Melaninproteine sein, die verschiedene Quallenarten zum Schutz vor zu hohem UV-Eintrag auf der Meeresoberfläche benutzen.
- **Brandbeständigkeit außen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Aufgabe dieser Funktionsschicht ist der Schutz der darunterliegenden Funktionslayer vor Brand und erhöhten Infrarotwerten. Analog der Funktionsweise des Brandkäfers könnte diese Schicht aus chitinösen Sensoren bestehen, die auf spezielle Wellenlängen des infraroten Bereiches reagieren und sich dann als nichtbrennbares Material ausdehnen, um einen Brandeintritt in die Hüllstruktur zu verhindern.
- **Selbstreinigung innen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Aufgabe dieser vordersten Funktionsschicht ist der Schutz der Hüllstruktur vor Verunreinigung und daraus resultierenden Funktionsdefiziten. Analog der Funktionsweise der Rosenkäferhaut könnte diese Schicht aus kleinsten chitinösen Elementen bestehen, die aufgrund unterschiedlicher Größen in der Lage ist das Anschmutzverhalten der Hüllstruktur zu verbessern. Zu beachten ist hierbei, dass teilweise ein Eintritt der Wassermoleküle bis zur Entgiftungsschicht gewünscht ist und daher eine Interaktion dieser beiden Schichten notwendig wird.
- **Sensorik außen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt:

- IR- UV A- und UV B Strahlungsgehalt, Photonenergie
 - Lichtintensität/Lichthelligkeit
 - Luftfeuchtigkeit
 - Außentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Windgeschwindigkeit
 - Geruchsimmissionen
- **Energiegewinnung 1:** Die Aufgabe dieses Funktionslayers steht im Zusammenhang mit dem UV B-Strahlungseintrag, der schon weiter vorne erläutert wurde.
 - **Wasserdichtigkeit außen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Die von außen auftretenden Einwirkungen durch Wassermoleküle werden gezielt vor und hinter der Mittelschicht mittels einer porösen Schicht am Durchgang gehindert. Dies stellt eine Konsequenz aus den untersuchten Phänomenen dar, bei denen die isolierenden Bereiche zumeist sehr wassermolekülararm sind. Dennoch kann eine intelligente Wasserschichtführung von großen Nutzen sein, wenn sie z.B. zum Abtransport der durch die Entgiftung ausgeschiedenen Substanzen vor der Mittelschicht dient. Daher ist zumindest ein einhüftiger Anschluss an eine der Transportschichten sinnvoll.
 - **Winddichtigkeit:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: In Kombination mit der Wasserdichtigkeit könnte die winddichte Schicht, die aus heckenähnlichen Strukturen analog dem Fellhaar des Robbentells bestehen könnte, ähnlich „tief“ angeordnet sein, um bei denen im Vorfeld angesprochenen Witterungsbedingungen für eine zusätzliche konvektive Leistung vor und hinter der energiegewinnenden Schicht zu sorgen. Dabei muss die jeweilige Temperatur der anströmenden Luftmoleküle jedoch sensitiv beachtet werden, damit sich die Hüllstruktur nicht wärmetechnisch auflädt.
 - **Energiegewinnung 2:** Dieser Funktionslayers ist in diesem Szenario zur Aufnahme der unterschiedlichen Strahlungsarten aktiviert und im wesentlichen

für zusätzliche Energieeinträge in der Nähe der isolierenden Schicht gefordert.

- **Wasserdichtigkeit innen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Die Aufgabe dieser Schicht liegt darin, von innen auftretenden Wassereintritt zu unterbinden, wobei Wasserdampfmoleküle frei durch die Hüllstruktur diffundieren können und vor dem Mittelbereich in der Transportschicht mittels Konvektion angeführt werden können sollen. Die dort enthaltene Energie und Feuchte wird dabei der einströmenden Luft zugegeben. Eventuell anfallendes Kondensat möglicher thermischer Extremsituationen soll in der inneren Transportschicht quasi als „2. Entwässerungsebene“ abgeführt werden können, wobei dabei der Durchmesser dieser Schicht zu überprüfen ist.

- **Sensorik innen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt:
 - Lichtintensität/Lichthelligkeit
 - Luftfeuchtigkeit
 - Innentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Geruchsimmissionen

- **Brandbeständigkeit innen:** siehe auch Anforderung von außen.

- **Selbstreinigung innen:** siehe auch Anforderung von außen.

4.6.4 Szenario IV

Im vierten Szenario geht es um einen Schaltzustand während eines trüben und sonnenlosen Wintertages mit Außenlufttemperaturen um die -5 °C und einer Luftfeuchtigkeit um die ca. 30%. Hier spielt die Dämmfähigkeit eine wesentliche Rolle sowie ein Minimum an Transmissionswärmeverlusten. Dazu sollten sämtliche

Energieressourcen aus dem diffusen indirekten Licht genutzt werden. Der Gasaustausch erfolgt affin zum *Rete mirabile* über alveolenartige Mikroporen, die den Sauerstoff und das Kohlendioxid mittels eines Trägermediums zwischen Innen und Außen austauschen. Die Dämmleistung ist maximal in die Länge entwickelt, die UV A- und die UV B, sowie die IR-Strahlungen werden bis zur Isolierung durchgeführt und es entstehen keinerlei Hinterlüftungszwischenräume, die eine Konvektion ermöglichen könnten. Zu den einzelnen Funktionslayern:

- **Gasaustausch:** Der außen anstehende Sauerstoff wird hier nur mittels mikroporöser Poren aufgenommen und gelöst und diffundiert dann im Mittelbereich durch eine Entgiftungsschicht. Durch die isolierenden Bereiche hindurch, in denen dem Trägermedium Energie und Wärme entzogen oder zugegeben werden kann (analog dem *Rete mirabile*), soll der konditionierte Sauerstoff an den Innenraum abgegeben werden. Die Schichtendimension in x-Richtung ist dabei variabel. Die Aufnahme des verbrauchten Kohlendioxides der Innenraumluft soll analog diesem Vorgang in ein Trägermedium gelöst werden, das im Mittelbereich in fast direktem Kontakt zum einströmenden Medium steht, wodurch ein optimaler Energieaustausch erreicht werden soll. Dahinter steht die Idee, die relativ warme Außenluft und die kühlere Innenraumluft (ca. 24 °C) analog der Hautatmung verschiedener Amphibien so in ein Medium zu lösen, daß kein direkter Kontakt der unterschiedlich konditionierten Bereiche erfolgen kann. Dies ist natürlich auch im Umkehrschluss denkbar, wenn außen Minusgrade und innen Plusgrade herrschen.
- **IR-Strahlung:** Die von außen eintreffende IR-Strahlung im Bereich von 750-2500 nm wird durch die UV-Funktionsschicht des äußeren Schichtenbereiches durchgelassen, damit maximale Wärmeeinträge der inneren Schichten möglich werden, die über einen längeren Zeitraum hinweg zu Erwärmung der Hüllstruktur führen sollen. Gerade sonnenreiche Wintertage mit hohen Strahlungswerten spielen dabei eine besonders energiereiche Rolle.
- **Sichtbares Licht:** Das von außen eintreffende sichtbare Lichtspektrum im Bereich von 380-750 nm soll möglichst frei durch alle Schichten diffundieren können, sowohl von innen nach außen wie vice versa.

Teil 4 - Konzeption

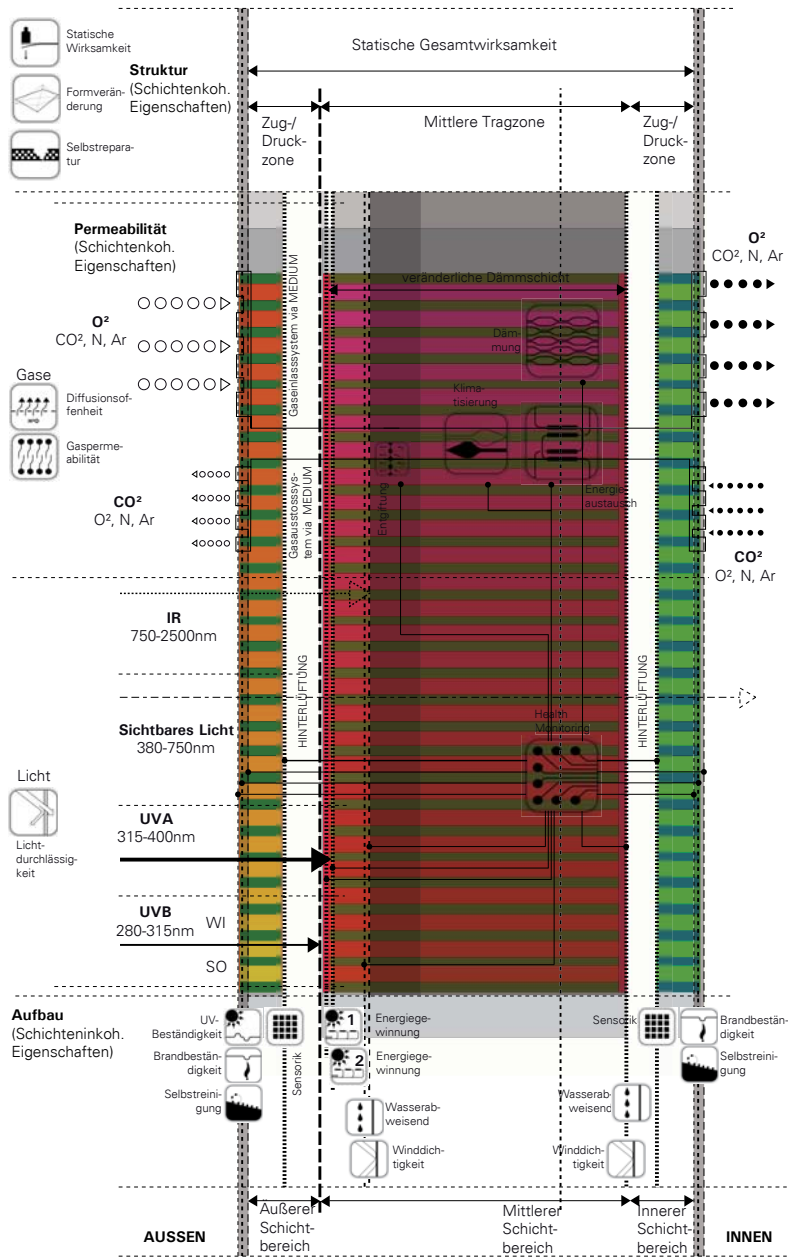
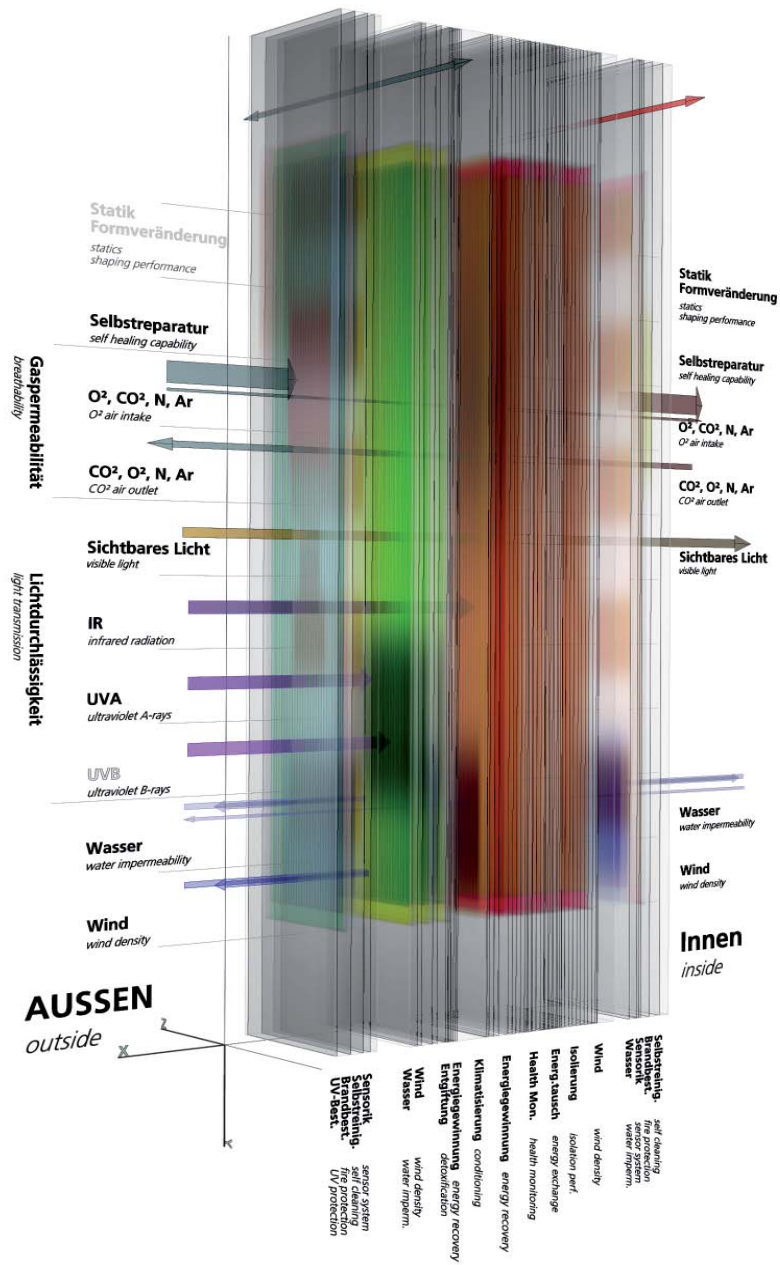


Abb. 4.6.4.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 4)

KONZ.384



Schaltzustand während eines trüben und sonnenlosen Wintertages mit Außenlufttemperaturen um die -5 °C und einer Luftfeuchtigkeit um die ca. 30%.

Abb. 4.6.4.2: Perspektivische Visualisierung (Szenario 4)

- **UV A-Strahlung:** Die von außen eintreffende UV A-Strahlung im Bereich von 315-400 nm wird an der Energieebene 1 kurz vor dem Mittelbereich absorbiert und in Wärmeenergie gewandelt.
- **UV B-Strahlung:** Die eintreffende UV B-Strahlung im Bereich von 280-315 nm wird analog der thermoelektrischen Beschichtung der Hornissenhaut im mittleren Schichtenbereich absorbiert und dort in photovoltaische Energie gewandelt. Wichtig ist hierbei, dass außerhalb und innerhalb dieser photovoltaischen Schicht eine konvektive Transportschicht zur Verfügung steht, die zur Kühlung oder Erwärmung des energiegewinnenden Funktionslayers eingesetzt wird. Die zu- oder abgeführte Luftmoleküle könnten wiederum in einen kybernetischen Kreislauf eingebunden sein, der u.U. Mit dem Kreislauf des Trägermediums des Gasaustausches gekoppelt ist.
- **UV-Strahlungsbeständigkeit:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Aufgabe dieser Funktionsschicht ist das gezielte Durchführen oder das koordinierte Reflektieren der eintreffenden Strahlungen in Abstimmung mit den darunterliegenden Funktionslayern je nach Szenario und Aufgabe. Vorbild dieser Funktionsweise könnten spezielle, in eine Schicht eingelagerte, Melaninproteine sein, die verschiedene Quallenarten zum Schutz vor zu hohem UV-Eintrag auf der Meeresoberfläche benutzen.
- **Brandbeständigkeit außen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Aufgabe dieser Funktionsschicht ist der Schutz der darunterliegenden Funktionslayer vor Brand und erhöhten Infrarotwerten. Analog der Funktionsweise des Brandkäfers könnte diese Schicht aus chitinösen Sensoren bestehen, die auf spezielle Wellenlängen des infraroten Bereiches reagieren und sich dann als nichtbrennbares Material ausdehnen, um einen Brandeintritt in die Hüllstruktur zu verhindern.
- **Selbstreinigung innen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Aufgabe dieser vordersten Funktionsschicht ist der Schutz der Hüllstruktur vor Verunreinigung und daraus resultierenden Funktionsdefiziten. Analog der Funktionsweise der Rosenkäferhaut könnte diese Schicht aus

kleinsten chitinösen Elementen bestehen, die aufgrund unterschiedlicher Größen in der Lage ist das Anschmutzverhalten der Hüllstruktur zu verbessern. Zu beachten ist hierbei, dass teilweise ein Eintritt der Wassermoleküle bis zur Entgiftungsschicht gewünscht ist und daher eine Interaktion dieser beiden Schichten notwendig wird.

- **Sensorik außen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt:
 - IR- UV A- und UV B Strahlungsgehalt, Photonenenergie
 - Lichtintensität/Lichthelligkeit
 - Luftfeuchtigkeit
 - Außentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Windgeschwindigkeit
 - Geruchsimmissionen

- **Energiegewinnung 1:** Die Aufgabe dieses Funktionslayers steht im Zusammenhang mit dem UV A-Strahlungseintrag, der schon weiter vorne erläutert wurde.

- **Wasserdichtigkeit außen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Die von außen auftretenden Einwirkungen durch Wassermoleküle werden gezielt vor und hinter der Mittelschicht mittels einer porösen Schicht am Durchgang gehindert. Dies stellt eine Konsequenz aus den untersuchten Phänomenen dar, bei denen die isolierenden Bereiche zumeist sehr wassermolekülarm sind. Dennoch kann eine intelligente Wasserschichtführung von großen Nutzen sein, wenn sie z.B. zum Abtransport der durch die Entgiftung ausgeschiedenen Substanzen vor der Mittelschicht dient. Daher ist zumindest ein einhüftiger Anschluss an eine der Transportschichten sinnvoll.

- **Winddichtigkeit:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: In Kombination mit der Wasserdichtigkeit könnte die winddichte Schicht, die aus heckenähnlichen Strukturen analog dem Fellhaar des Robben-

fells bestehen könnte, ähnlich „tief“ angeordnet sein, um bei denen im Vorfeld angesprochenen Witterungsbedingungen für eine zusätzliche konvektive Leistung vor und hinter der energiegewinnenden Schicht zu sorgen. Dabei muss die jeweilige Temperatur der anströmenden Luftmoleküle jedoch sensitiv beachtet werden, damit sich die Hüllstruktur nicht wärmetechnisch auflädt.

- **Energiegewinnung 2:** Dieser Funktionslayers ist in diesem Szenario zur Umsetzung des UV B-Strahlungsanteils aktiviert.

- **Wasserdichtigkeit innen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt: Die Aufgabe dieser Schicht liegt darin, von innen auftretenden Wassereintritt zu unterbinden, wobei Wasserdampfmoleküle frei durch die Hüllstruktur diffundieren können und vor dem Mittelbereich in der Transportschicht mittels Konvektion angeführt werden können sollen. Die dort enthaltene Energie und Feuchte wird dabei der einströmenden Luft zugegeben. Eventuell anfallendes Kondensat möglicher themischer Extremsituationen soll in der inneren Transportschicht quasi als „2. Entwässerungsebene“ abgeführt werden können, wobei dabei der Durchmesser dieser Schicht zu überprüfen ist.

- **Sensorik innen:** analog zu Szenario I, der Übersicht halber hier nochmals aufgeführt:
 - Lichtintensität/Lichthelligkeit
 - Luftfeuchtigkeit
 - Innentemperatur
 - Zusammensetzung der Luft, Volumenprozent CO₂, O₂, N etc.
 - Geruchsimmissionen

- **Brandbeständigkeit innen:** siehe auch Anforderung von außen.

- **Selbstreinigung innen:** siehe auch Anforderung von außen.

5.0 Fazit der Untersuchungen

Die Beschäftigung mit natürlichen Hüllen und Häuten im Kontext moderner Gebäudehüllen hat im Verlauf der vorliegenden Arbeit zu einer Fülle von Ansätzen neuartiger Fassadenideen, Fassadenapplikationen oder Fassadenkonzepten geführt. Es ist also ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit einen möglichen Weg aufzuzeigen, auf dem sich Architekten und Ingenieure bei der Beschäftigung mit evolutionierten Lösungsansätzen aus der Natur bewegen können. Dazu wurde nach einem einleitenden Teil 1 und einem Teil mit den geforderten Eigenschaften (Teil 2) im dritten Teil eine Bearbeitungsstruktur vorgestellt, die insgesamt 19 mögliche Ansätze untersuchend darstellt und jeweils zum Ende eines Kapitels eine denkbare Umsetzung skizziert. Im vierten Teil werden dann diese Ansätze in ein Schichtenmodell integriert, das in vier Szenarien unterschiedliche Wirkungsweisen einer konzeptionellen Bionisch inspirierten Gebäudehülle aufzeigt. Die erarbeiteten Anforderungen als Gemengelage aus anthropogenen Anforderungen und natürlichen Lösungsansätzen sind dabei sicherlich ein besonders wichtiges Ergebnis der vorliegenden Arbeit. Wie man in Zukunft an Gebäudehüllen arbeiten kann, über diese nachdenken sollte und welche konzeptionelle und gestalterische Möglichkeiten dort zu finden sind, stellen sicherlich die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit dar.

5.1 Architektur - Natur

Basierend auf einem wachsenden Verständnis für ökologische Zusammenhänge und der Wahrnehmung der Konsequenzen durch Eingriffe des Menschen in natürliche Ökosysteme, ist der Bionische Gedanke zu einem populären Schlagwort geworden. Ob Strom aus Wind- oder Wasserkraft, Photovoltaikmodulen oder Warmwasser aus Solarthermieanlagen, die Grundbegriffe und Termini Regenerativer Energiegewinnung haben Einzug in das gesellschaftliche Bewusstsein und den alltäglichen Sprachgebrauch gefunden. Nicht zuletzt die progressive Subventionspolitik der Rot/Grünen Bundesregierung für Regenerative Energiesysteme, die weit über die Parteiengrenzen hinweg getragen wird, hat dazu geführt, daß der Umgang mit dem Energiethema, z.B. in der Architektur, zum Entwurfsrelevanten Argument werden kann und daher in Fachkreisen auch permanent diskutiert wird.

Konsens dieser Diskussion ist eindeutig: Durch drastische Energiesparmaßnahmen den CO²-Ausstoß heutiger Energiebereitstellungssysteme zu minimieren. Dies kann auch bedeuten zu alternativen Energieformen zu gelangen oder alternative Erzeugungsmethoden zu finden. Dass die Natur beim Thema Energie eine besondere „Erfahrung“ aufweist, liegt auf der Hand und ist Ansporn diese Systeme näher zu analysieren und zu untersuchen. Diese Phänomene in technische Systeme umzuwandeln oder der Versuch natürliche Funktionsweisen mit unseren Möglichkeiten abzugleichen, zu überlagern und unter Umständen zu beantworten, ist Kern der vorliegenden Arbeit.

Bei Gebäuden und architektonisch relevanten Bauteilen spielt die Fassade/Gebäudehülle als Schnittstelle zwischen thermisch kontrollierten und thermisch unkontrollierten Bereichen eine, energetisch gesehen, entscheidende Rolle. Sei es nun eine Gebäudehülle oder die Haut eines Warmblüters. Auf den ersten Blick erfüllen beide Hüllen die Anforderung das „Innere“, seien es jetzt Personen oder lebenswichtige Organe, komfortabel und mit minimal schwankenden Amplituden behaglich zu beherbergen. Auf den zweiten Blick jedoch fällt schnell auf, daß beide Systeme in unserem Beispiel dies auf völlig unterschiedliche Weise bewerkstelligen und dabei auch gänzlich unterschiedliche Energiestrategien verfolgen. Die konventionelle Gebäudehülle ist dabei meist statisch eingestellt und damit für Spitzenlasten dimensioniert um die Erfüllung aller Anforderung ganzjährig zu gewährleisten. Ergo ist sie überdimensioniert, da die Spitzenlasten ja nur Teilbereiche des Jahres abdecken.

Natürliche Hüllen sind dagegen nie statisch, sondern immer „richtig“ zur Erfüllung aller Anforderungen eingestellt oder dimensioniert. Dies führt zwangsläufig zur Frage: Wie erreichen wir den o.a. behaglichen Zustand, sei es für Gebäudenutzer oder lebensnotwendige Funktionssysteme. Auch wenn diese Frage nur sehr komplex beantwortbar ist, läßt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit an der bereits erwähnten Schnittstelle, der Hülle zwischen Innen und Außen, sehr viel Energiesparpotential verwirklichen.

Betrachtet man nun die Wirkungsweisen natürlicher Hüllen und Häute eingehender, so fallen bei genauerer Betrachtung vor allem die im Vorfeld angesprochenen kohärenten Eigenschaften auf, die mehr oder weniger alle Exponate aufweisen, die im

Teil 3 der vorliegenden Forschungsarbeit untersucht wurden. Keine der Hüllen ist statisch eingestellt und besitzt gleichförmige Kennwerte, seien es U-Werte, E-Module oder Dichtewerte. Keine der Hüllen oder Häute ist nur für einen Zweck entwickelt, sei es Schutz vor Wärme/Kälte, Schutz vor Feuchte/Trockenheit oder Schutz/Gravidität vor Feinden/Artgenossen. Unter Berücksichtigung der 25 untersuchten Hüllen und Häute, kann man daher sagen, daß alle Exponate adaptiv und zumindest bifunktional und manche sogar multifunktional sind. Folgt man diesem Gedanken weiter, kann man bei manchen Systemen sogar von rückkoppelnder Adaptivität sprechen, denkt man z.B. an die Anpassungsfähigkeit amphibischer Häute auf Sonneneinstrahlung.

5.2 Zusammenfassung

Zusammenfassend spricht man bei Bionisch inspirierten Gebäudehüllen aus der Natur von Systemen, die aufgrund ihrer sensorischen und aktuatorischen Eigenschaften in der Lage sind, sich den äußeren und inneren Anforderungen selbstständig anzupassen. Dies kann durch unterschiedliche technische Verfahrensweisen erfolgen oder/ und durch natürliche Phänomene inspiriert sein. Dabei sollte jedoch im Vordergrund stehen, daß die Natur per se mit Energie weit effizienter umgeht und wir von diesen Strategien profitieren sollten. Daher liegt der Schwerpunkt von Fassaden der Zukunft in der Beschäftigung mit solchen und anderen Phänomenen aus der Natur, die sich häufig funktional oder zumindest systematisch nicht stark von Anforderungen aus uns bekannten Problemstellungen in der Architektur unterscheiden.

5.3 Ausblick auf mögliche Entwicklungen

Sieht man in die Zukunft, ist für Architekten und Ingenieure dabei besonders spannend, dass alle diese Phänomene aus der Natur per se veränderlich, adaptiv und bifunktional sind, was eine besondere Herausforderung für die Architektur ist und in den nächsten Jahren zunehmend sein wird. Auch die formalgestalterische Befreiung solcher Ansätze ist nicht zu unterschätzen, liefert sie doch aufgrund der Ver-

änderbarkeit (im Sinne von Erscheinung und nicht Bewegung) ganz neue Einheiten für das architektonische Mosaik. Man könnte sich Fassadensysteme vorstellen, die sich von Materialien wie Perlmutter oder Chitin inspirieren lassen und sich nach Beendigung ihres Lebenszyklus von allein rezyklieren. Oder würde man die hocheffizienten Strukturen der Flügelschuppen eines Schmetterlings oder des Knochens eines Seesternes richtig verstehen, könnte man Lichtlenksysteme oder strukturelle Farboberflächen entwickeln, die perfekte Reflexionen liefern oder Farben, die nie verblassen. Oder was wäre, wenn wir genau verstehen könnten, wie adaptiv sich Robbenfellen verhalten, wenn sie ihre Dämmstärken variieren. Dies könnte neuartige Wärmedämmsysteme inspirieren, die je nach Anforderung ihre Dämmeigenschaften erhöhen oder verringern können.

Wenn wir all diese Ideenskizzen neugierig und mit offenen Augen verfolgen und uns durch Leistungen aus der Natur inspirieren lassen, ist der Weg von konventionellen technischen Systemen zu völlig neuartigen Bionisch inspirierten Konzeptionen für Gebäudehüllen nicht mehr weit. Denn adaptive Systeme und Materialien, werden in wenigen Jahren als fester Bestandteil unseres Alltages wahrgenommen werden und atmende Gebäudehäute, veränderliche Wärmedämmhüllen oder autoadaptive Verschattungssysteme gehören vielleicht bald zu Werkzeugen, die Architekten und Ingenieure für Gebäudekonzepte der Zukunft benutzen werden.

Schon heute unterstützen selbstanpassende Materialien den Heilungsprozess bei Knochenbrüchen, schon morgen werden Autos bei zu geringem Abstand zum Vordermann selbstständig bremsen und in nicht allzu ferner Zukunft wird es Gebäudehüllen geben, die nicht nur atmen, sondern zugleich Energie speichern und mühelos ihre Transparenz den Bedürfnissen des Nutzers anpassen können.

Geschichte der Bionik

Seit jeher war der Mensch von dem Gedanken begeistert selbst zu fliegen. Der älteste bekannte Versuch des Menschen selbst zu fliegen ist der Flug des Ikarus, der wohl am deutlichsten zeigt, dass sich die Menschen damals schon an Beispielen der Natur orientiert haben. Hätte Ikarus, der „fliegende Mensch“ der griechischen Mythologie, die wichtigsten Prinzipien der heutigen Bionik gekannt, wäre er vielleicht nicht abgestürzt. Der Sage nach schmolzen seine, nach dem Vorbild des Vogelflügels konstruierten Flügel, aus Federn und Wachs, weil er der Sonne zu nahe kam. Auch in der Realität waren viele Jahrhunderte hindurch die Versuche des Menschen, die Natur zu kopieren, meist zum Scheitern verurteilt.

- **1505:** schrieb Leonardo da Vinci (1452-1519) sein Werk „sul volo degli uccelli“ (über den Vogelflug) und konstruierte nach Beobachtungen in der Natur seine Flugmaschinen. Auf Grund der damaligen Möglichkeiten war jedoch ein Gelingen nicht zu erwarten.
- **1590:** lässt sich der Engländer Matthew Baker im Schiffbau vom Vorbild eines Dorsch inspirieren. Praktische Naturbeobachtungen bewogen ihn zur Konstruktion von Schiffsrümpfen nach dem Vorbild von Dorschkopf und Makrelenschwanz. Dies brachte der nach ihm benannten Baker-Galeone eine Verbesserung der Manövrierfähigkeit und eine Reduktion des Wasserwiderstandes. Zu dieser Zeit ein kriegsentscheidender Vorteil für die Seemacht Britanniens.
- **1638:** inspiriert von Leonardo da Vinci entwickelte der türkische Gelehrte, Hezarfen Ahmed Celebi (1609–1649) ein Fluggerät nach dem Studium des Vogel fluges, mit dem er vom Galata Turm in Istanbul über den Bosphorus nach Uskudar flog.
- **1685:** schreibt Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), Professor in Florenz und Pisa, ein zweibändiges Werk „de motu animalium“ (über die Fortbewegung der Tiere). Als einer der ersten hatte Borelli Modellbeobachtungen über den Vogelflug angestellt.

- **1811:** konstruierte Albrecht Ludwig Berblinger (1770-1829) auch genannt „Der Schneider von Ulm“, einen Apparat, der ihm die Möglichkeit geben sollte, wie ein Vogel durch die Luft zu gleiten. Am 31. Mai 1811 versuchte Berblinger - in Anwesenheit des Königs - von der Adlerbastei aus über die Donau zu fliegen. Es misslang, da über der kalten Donau die Thermik fehlt. 1986 wurde es dann mit einem dem Original nachgebauten Flugapparat bewiesen: Berblingers Fluggerät konnte fliegen.
- **1829:** Der englische Landedelmann Sir George Cayley (1773–1857), der sich dem Studium der Flugphysik verschrieben hatte, studierte 1829 die Frucht des Wiesenbocksbarts. Daraus entwickelte er das erste autostabile Flugmodell und den ersten praktikablen Fallschirm. Der Schwerpunkt dieser Früchte liegt weit unten und die tragende Fläche ist nicht eben, sondern nach außen hochgezogen. Auch bei Cayley's Fallschirm liegt der Schwerpunkt weit unten und die Tuchflächen werden an den Außenrändern nach oben hochgezogen.
- **1850:** Die schwimmenden Blätter der *victoria amazonica* erreichen bis zu zwei Metern im Durchmesser. Durch ein Netz von strahlenförmigen und konzentrischen Rippen ist das Schwimmblatt so stabil, dass es auch bei großem Gewicht weder verbiegt noch untergeht. Dieses System regte Sir Paxton zu einer neuartigen Gewächshaus-Konstruktion an, die er im Jahr 1850 zum Patent anmeldete. Ein ziehharmonikaförmig gefaltetes Glasdach entsprach dabei der Blattmembran, die Rolle der Verstärkungsrippen übernahmen bei Paxtons Erfindung Querstege aus Holz. Die Ausstellungshalle der ersten internationalen Weltausstellung im Londoner Hyde-Park wurde nach Paxtons Leichtbauweise errichtet und ging als „crystal palace“ in die Architekturgeschichte ein.
- **1856:** erhob sich der Franzose Jean-Marie le Bris mit einer Flugmaschine, die auf das Studium des Albatrosfluges zurückgeht, in die Lüfte. Er ist damit der erste Mensch, der mit einer Maschine flog, die schwerer als Luft ist. Die Flugmaschine sah aus wie eine Art Boot mit zwei langgestreckten Flügeln. Mit Hilfe von Hebeln und Tauen ließ sich schon bei diesem ersten Modell der Anstellwinkel der Flügel verändern.

- **1857:** konstruiert der Franzose Félix du Temple das erste motorisierte Flugzeugmodell der Welt und meldete den „Apparat für die Fortbewegung in der Luft durch Nachahmung des Vogelfluges“ 1857 als Patent an. Mitte des 19. Jh. bemerkt er, dass Vögel mit großer Flügelspannweite weite Strecken im Gleitflug ohne Flügelschlag segelten, und dass sie dabei den vorderen Flügelrand leicht anhoben. Du Temple schloss daraus, dass nicht der Flügelschlag als solcher, sondern vielmehr die Form der Flügel für das Fliegen entscheidend sein müsse.
- **1858:** besuchte Karl Culmann, ein Ingenieur und Mathematiker, zufällig eine Vorlesung, die sich mit der Struktur des Oberschenkelknochens befasste. Dieser verläuft im Bereich des Hüftgelenks nicht gerade, sondern knickt zur Seite ab, das Hauptgewicht trägt dabei der seitliche Ausleger. das Innere des Knochens ist jedoch nicht massiv, sondern besteht aus einer Unmenge von scheinbar wahllos angeordneten feinsten Knochenbälkchen, der Spongiosa. Dem Ingenieur fiel sofort auf, dass die Ausrichtung der Spongiosa genau den Verlauf der Kräftelinien wiedergab, die auf den Oberschenkel bei Druck und Zug einwirken. Culmann war zu dieser Zeit gerade damit befasst, einen neuartigen, hochbelastbaren aber dabei möglichst leichten Kran zu konstruieren.
- **1868:** reichte Michael Kelly in Texas den „stacheligen Draht“ als Patent ein. Sein Problem war: Eine Viehherde bleibt nicht freiwillig an einem Ort, sie wandert umher. Kelly nahm sich den Osagedorn (*maclura pomifera*) als Vorbild für sein Patent. Dieser mit Dornen versehene Strauch eignete sich hervorragend dafür, Vieh auf vorgegebenen Plätzen zu halten und Kelly bildete das Prinzip aus Draht nach. Die Herstellung war aber sehr teuer und so patentierten die Herren Glidden und Haish im Jahre 1874 eine etwas geänderte, aber billigere Variante von Kelly's Draht und gelten seither auch als die Erfinder des Stacheldrahtes.
- **1889:** schrieb Otto Lilienthal den Klassiker der Bionischen Literatur „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“. Er studierte den Flug der Störche und war Hersteller der ersten Flugapparate mit denen er bereits in den Jahren

1891–1896 erfolgreich Gleitflüge durchführte.

- **1890:** Mitte des 19. Jahrhunderts studierte Clément Ader in Frankreich das Flugverhalten von Fledermäusen. Nach den dabei gewonnenen Erkenntnissen konstruierte er eine Flugmaschine, die er „Eole“ nannte und mit der er am 9. Oktober 1890 erfolgreich über eine Strecke von mehr als 50m flog. Augenzeugen berichteten damals, dass lediglich Bäume am Ende des Flugfeldes verhinderten, dass er noch weiter flog. Ader prägte auch den Begriff „avion“ (appareil volant imitant les oiseaux naturels).
- **1904:** konstruierte der österreichische Ingenieur I. Etrich einen Nurflügelgleiter, dessen Vorbild der Samen von *zannonia metacarpata* – einem Kürbisgewächs aus Südostasien – war. Aus diesem Gleiter entwickelte er zusammen mit einem dt. Ingenieur Rumpler die Rumpler-Etrich-Taube, die ab 1911 als Kriegsflugzeug der dt. Luftwaffe eingesetzt wurde.
- **1920:** stand R. Francé vor der Aufgabe, Böden gleichmäßig mit Kleinstlebewesen zu impfen. Er versuchte dies mit verschiedensten Streuern und Zerstäubern, landete dann aber bei der Mohnkapsel als Vorbild. Er ließ sich nach dieser Erkenntnis einen „neuen Streuer“ patentieren. Somit handelt es sich bei diesem Beispiel um das erste, Bionische Patent in Deutschland.
- **1948:** entdeckte der Schweizer Wissenschaftler de Mestral das Prinzip des Klettverschlusses. Er kam mit seinem Hund von der Jagd zurück und beide waren voller Kletten. De Mestral untersuchte den Halte-Mechanismus der Klettfrucht unter dem Mikroskop und baute ihn nach. Patentiert wurde diese „Erfindung der Natur“ unter dem Namen VELCRO.
- **1954:** ließ sich Richard Buckminster Fuller (1895-1983) sein Konstruktionsprinzip der geodätischen Kuppel patentieren. Seine Dome gleichen in ihrer Wabenstruktur dem Skelett von Radiolarien. Buckminster halte als einer der Ersten das Wirken der Natur als durchgängiges systemisches Wirken unter ökonomischen Prinzipien (Material- und Energie-Effizienz) gesehen.

- **1960:** wurde der Begriff „bionics“ auf einem Militärkongress in Dayton von einem Luftwaffenmajor J. E. Steel geprägt. Ziel dieses Kongresses war es, vom „biologischen Sonar“ der Fledermäuse etwas zur Verbesserung des technischen Radars zu lernen. Die Erklärung, dass sich der Begriff Bionik aus den Begriffen Biologie und Technik zusammensetzt, ist historisch und sprachlich nicht ganz richtig oder zumindest unklar. In der englischen Sprache funktioniert allerdings die Wortbildung nicht: Technik heißt technical science und nicht technics. Eine andere Deutung geht davon aus, dass sich der Begriff bionics zuerst nur auf die Elektronik = electronics bezog. In der deutschen Übersetzung ist jedenfalls die Wortschöpfung Biologietechnik einleuchtend. Man erkennt jedoch, dass Bionik eine fächerübergreifende Disziplin ist und der „Bioniker“ niemals nur Biologe, nur Mediziner, nur Ingenieur, nur Mathematiker ist. Bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts gab es Bemühungen einzelner Forscher und Tüftler natürliche Formen und Prinzipien für die Technik nutzbar zu machen. Eine Wissenschaft mit Universitätsrang wurde daraus aber erst Anfangs der sechziger Jahre.
- **1965:** In den 70er Jahren untersuchte der Paläontologe Prof. W. Reif in Tübingen die Schuppen von Haien. Er stellte dabei fest, dass schnell schwimmende Haie eine besondere Strukturierung auf der Schuppenoberfläche besitzen. Da sich keiner seiner Kollegen dafür interessierte, wandte er sich an den Strömungsmechaniker Dr. W. Bechert bei der DLR in Berlin. W. Bechert baute diese Hautstrukturen künstlich nach und untersuchte sie zunächst im Wind- und Wasserkanal, später dann in einem mit Babyöl gefüllten Kanal. Das Ergebnis dieser Forschung ist heute als Ribletfolie, hergestellt von der Firma 3M zur Verminderung des cw-Wertes auf Flugzeugen im Einsatz. Die Spriterparnis bei Langstreckenflügen liegt bei bis zu 8 %.
- **1972:** wurde das Dach des Münchener Olympiastadions von Frei Otto und Günther Behnisch erbaut. Die Stahlkonstruktion des Daches ist frei an Masten aufgehängt, die unterschiedliche Krümmung der Dachfläche verleiht ihm trotz der leicht und luftig wirkenden Form große Festigkeit. Erst später stellten die Ingenieure fest, dass die Natur bereits eine ganz ähnliche Konstruktion hervorgebracht hatte - das zwischen Gräsern aufgehängte Netz der Zitterspinnen.

Wie beim Dach des Stadions müssen die dünnen Fäden des Netzes nur Zugbelastungen standhalten, die Druckbelastungen übernehmen die „Masten“ der Grashalme.

- **1977:** entdeckten Prof. W. Barthlott und Nesta Ehler, Botaniker der Universität Bonn den Lotuseffekt. W. Barthlott stellte schon vor 20 Jahren fest, dass die Oberflächen von Lotusblumen immer sauber waren und untersuchte daraufhin diese Oberfläche mit dem Rasterelektronenmikroskop. Entgegen der landläufigen Meinung der Physiker: „glatt ist gleich sauber“ fanden W. Barthlott und sein Mitarbeiter C. Neinhuis, dass auf der Blattoberfläche noppenförmige Strukturen vorhanden sind, aufgrund derer Tropfen abperlen. Zusammen mit der Firma Ispo entwickelte und patentierte W. Barthlott einen Fassadenlack, der unter dem Namen Ispolotusan seit April 1999 auf dem Markt ist.
- **1992:** So richtig boomte die Bionik allerdings erst seit Ende der Achtzigerjahre, als sich die Industrie verstärkt dafür zu interessieren begann und entsprechende Forschungsprojekte förderte. Das wichtige Ziel heißt Energie- und Werkstoffersparnis. 1992 wurde in Wiesbaden ein erster Bionik-Kongress ins Leben gerufen, der inzwischen zur Tradition geworden ist.
- **1993:** fand auf betreiben der Abteilung „neue Technologien“ des VDI ein Bionik Symposium statt. Dabei wurde Bionik wie folgt definiert: „Bionik ist eine wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme befasst.“ Demnach ist die Bionik eine klar formulierbare Disziplin und Vorgehensweise. Sie führt die durch die Vorgehensweise der „technischen Biologie“ entdeckten und erforschten Aspekte der Biologie einer technischen Umsetzung und Anwendung zu.
- **2000:** Seit Februar 2000 ist ein Bionischer Chip auf dem Markt, mit dem es erstmals möglich ist, eine menschliche Zelle an einen Computer anzubinden (Rubinsky, Berkeley). Auf der Expo 2000 in Hannover wird der Pavillon Venezuelas gebaut. Er besitzt ein segmentiertes Dach und kann sich öffnen wie eine. Bei Regen formt das Dach eine dicht schließende Hülle nach dem

Vorbild bestimmter Blüten. Die Biomedizintechnik ist ein großes Thema für die Bioniker, denken wir an Cochlea-Implantate oder an bionische Endoprothesen, wie sie Prof. Copf aus Stuttgart zusammen mit der Firma Chendo entwickelt hat. Bei Flugzeugen kommt es bei zu geringen Fluggeschwindigkeiten zu einem Strömungsabriss und zu einem Rückstrom der Grenzschicht auf der Flügeloberseite. Vögel lösen dieses Problem dadurch, dass sich bei ihnen die hochelastischen Deckfedern der Schwingen selbsttätig aufrichten und dadurch gefährliche Rückströmungen unterbinden. Neue Experimente haben gezeigt, dass der Einsatz dieser sich selbst auslösenden Rückstrombremsen die Sicherheit von Verkehrsflugzeugen kolossal erhöhen kann.

- **2006:** Auch in der kosmetischen Industrie hat die Bionik Einzug gehalten. So produziert und vertreibt die Bayersdorf AG ein Produkt (Alpha-Flavon von Nivea Visage), das die menschliche Haut bis zu zehnmals langsamer altern lässt. Inspiriert wurden die Forscher dabei von dem japanischen Pagoda-Baum *sophora japonica*, der seine Blätter mittels Alpha-Flavon - einem natürlichen Flavonoid - vor dem Austrocknen schützt. In Australien ist es gelungen, die natürlichen Abwehrstoffe von Korallen gegen UV-Strahlung zu kopieren und zu modifizieren und damit eine Korallen-Sonnencreme zu schaffen, die geruchlos, wasserfest und lichtunempfindlich ist. Israelische Forscher haben eine Hautcreme produziert, um Schwimmer vor Hautkontakt mit Quallen zu schützen. Dr. Amit Lotan und seine Frau haben sich ihre Entdeckung von Clownfischen abgeschaut, die zwischen Seeanemonen, Verwandten der Quallen, leben.

Heute forschen Arbeitsgruppen an Grashalmen, die enormen Winddruck standhalten können und gleichzeitig biegeelastisch bleiben. Sie erhoffen sich diese Erkenntnisse auch im Hochbau einsetzen zu können. Eine dieser Arbeitsgruppen beschäftigt sich mit windadaptiven Fassaden extremer Vertikalstrukturen. Der Autor der vorliegenden Arbeit leitet diese Arbeitsgruppen gemeinsam mit Dr. Patrick Teuffel. Beim Pfeifengras *molinia coerulea* reicht die Palette von einer Doppelringwand aus Außen- und Innenhaut mit eingezogenen Stützelementen bis zu hydraulische Einheiten. Im weichen Zellgewebe zwischen den beiden Ringwänden ist Wasser eingelagert. Das Gewebe lässt sich deshalb kaum zusammendrücken und stabilisiert so die feste

Trägerkonstruktion der Wand zusätzlich. Die Pflanze kann sogar den Wassergehalt dieses Gewebes und damit auch die Biegesteifigkeit aktiv verändern. Alle großen Automobilhersteller beschäftigen sich nach anfänglicher Skepsis mit Bionik. Opel optimiert beispielsweise Motoraufhängungen nach Bionischen Prinzipien mit Programmen, die Prof. C. Mattheck am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte. Es gibt eine solchermaßen optimierte Felge bei Opel, das Inlet der Türverkleidung des Opel Astra zeigt bionische Ansätze – hier haben Forscher der Universität Freiburg wesentlich mitgearbeitet. Opel arbeitet derzeit an dem bionischen Auto G90. Mercedes entwickelte das bionic car, eine Fahrzeugstudie mit den Strömungsgünstigen Konturen des Kofferfisches..

Ein weiterer Schwerpunkt der weltweiten Bionikforschung ist die Robotik. Hier werden z.B. Humanoide wie jener der Firma Honda oder der von Prof. Pfeiffer aus München oder Roboterarme für den Industrieinsatz geschaffen. Aber auch künstliche Fliegen oder Libellen. Forscher bauen intelligente Roboter, die lernfähig sind und selbstständig handeln. Sogar am Sozialverhalten wird gearbeitet: In den USA entwickelt man Roboter, die Emotionen auszudrücken können.

Die Continental AG hat zwei „Bionische“ Autoreifen auf dem Markt, zum einen den Contipremiumcontact nach dem Vorbild einer Katzenpfote und zum Zweiten den Contiwintercontact ts 780 nach dem Bienenwabenprinzip. Der von Continental entwickelte Pneu hat ein so genanntes hochlamelliertes Profil in dem die Gummiblöcke zwischen den Profiltrillen ein feines, sechseckiges Muster aufweisen. Feine Lamellen im Gummi sind seit langem typisch für Winterreifen, weil sich beim Beschleunigen oder Bremsen ihre Kanten aufstellen und etwa auf Schnee einen gewissen Widerstand bieten. Das hier angewendete Bienenwaben-Prinzip ermöglicht erstmals auch Kanten, die quer zur Laufrichtung verlaufen, was die Kurvenfahrt deutlich sicherer macht. Dunlop arbeitet mit dem Biologen J. Barnes von der University of Glasgow seit 1998 an der Neuentwicklung von Reifen. Vorbild sind die Fußsohlen von Baumfröschen, die selbst an glatten Wänden haften, sich aber zum Absprung mühelos wieder lösen. Das verdanken die Tiere dem Aufbau ihrer Fußsohlen: Unter jeder Zehe befindet sich ein kompliziertes Muster von winzigen Hügeln und Rillen, die schmalen Kanäle dazwischen füllt eine Drüse mit Sekret. In diesem

Zusammenhang sind auch Untersuchungen an Gekko's von großem Interesse für die Bionik. Es gibt bereits den Prototyp eines sog. „Gekkomat“, der es einem Menschen ermöglichen wird, wie der Gekko an Wänden hochzuklettern. US-Forscher haben im Auftrag der Nasa im Frühjahr 2002 synthetische Hafthaare hergestellt. Diese Haare eignen sich z.B. für Roboter, als Torwarthandschuhe oder als Klebstoffe in der Chirurgie.

Trendwellen der Bionik

im Folgenden werden zwei unterschiedliche Entwicklungsstränge der Bionik dargestellt, die man als Trendwellen bezeichnen kann. Dabei wird unterschieden, ob es sich um formale oder strukturelle Ergebnisse handelt.

Formale Betrachtung

Die Natur mit ihrem Formenreichtum und ihrem verblüffenden Zusammenspiel von Zweckmäßigkeit und Schönheit weckt seit jeher die Bewunderung und das Interesse der Menschen. So wird verständlich, dass der Mensch dort, wo er selbst als gestaltender Schöpfer tätig wird, immer wieder Bezüge auf die Gestaltung und Strategien der Natur herstellt. Seine Auseinandersetzungen mit der Natur bewegen sich in einem Feld zwischen abbildlicher Wiedergabe von äußerer Erscheinung und dem wissenschaftlichen Erforschen ihrer verborgenen Geheimnisse von Konstruktion, Funktion und Ästhetik. Je nach Interessenlage unterscheiden sich die Fragestellungen, Ziele, Untersuchungsmethoden, technische Umsetzung und praktische Nutzungsanwendung.

Mit Begriffen und Ordnungsbezügen wie zum Beispiel Proportion (Ebenmaß, Gleichmaß, Größenverhältnis), Harmonie (der Goldene Schnitt) oder Rhythmus (Gliederung eines zeitlichen Vorgangs oder einer räumlichen Ausdehnung in sinnlich wahrnehmbare Einheiten) versucht man der Natur innewohnenden Schönheit näher zu kommen.

Verschiedene Techniken ermöglichten im Laufe der Zeit eine Analyse der Naturformen. Ernst Haeckel prägte zum Beispiel das Naturbild seiner Zeit durch seine Lithografien von aussergewöhnlichen Objekten. Karl Blossfeld hingegen bediente sich der Fotografie und schärfte den Blick auf die alltägliche Natur. Heutzutage ermöglichen die Aufnahmen von Elektronenmikroskopen, wie die von France Bourély, Einblick in ganz neue Dimensionen. Die maßgebenden Protagonisten ihrer Zeit werden im weiteren Verlauf kurz skizziert.

- **Ernst Haeckel** (1834-1919): Der Zoologe Ernst Haeckel untersuchte im Jahre 1900 in seinem opulent bebildertem Band „Kunstformen der Natur“ die bizarre, filigrane Vielfalt mariner Kleinstlebewesen. 100 beeindruckende Lithografien geben Einblicke in die Natur, wie sie den meisten Zeitgenossen verwehrt war. Seine Bildtafeln prägten die Vorstellung seiner Zeit, und seine Erkenntnisse und Symmetrielehren inspirierten viele Zeitgenossen bei ihren Arbeiten.
- **Karl Blossfeld** (1865-1932): Der Kunstprofessor Karl Blossfeld war aus didaktischen Gründen an der Form der Pflanzen interessiert und versuchte mittels der Photographie seinen Studenten die Formenvielfalt der Natur nahezubringen. Seine akribische Bilderordnung zeigte die Strukturen der Pflanzen, ihre organische Gestalt und ihre kunstvollen Formen auf. Die Photos hatten einen Detailreichtum, wie er für diese Zeit ungewöhnlich war. Sein Bildband „Urformen der Kunst“ machte ihn über Nacht weltweit berühmt und diente vielen Künstlergenerationen als Inspirationsquell.
- **France Bourély**: Mit einem Elektronenmikroskop erkundet die Biologin France Bourély die Welt des Winzigkleinen. In ihrem Bildband „Unsichtbare Welten“ zeigt sie die verwunschenen Täler auf Blütenblättern, erklimmt Fruchtknoten, klettert über Blütenstaubberge und erkundet Schluchten auf den Rücken von Insekten. Neugierig untersucht sie fein ziselierter Pollen, die zarten Schutzhäutchen einer Efeuknospe, die Scheren eines Skorpions, den Kopf eines Maikäfers oder das Auge einer Fliege.

Die nächsten Zeilen beschäftigen sich mit der formalen Betrachtung von Naturformen in der Architektur. Dabei steht die Auseinandersetzung mit verschiedenen Stilrichtungen im Vordergrund.

- **Gotik (1130-1500):** In der Gotik nutzte man die Formen der Natur besonders als Dekor. Im Laufe der Entwicklung der klassischen Kathedralgotik wurden die Naturzitate immer kleinteiliger, differenzierter und schienen das gesamte Gebäude zu überwuchern. Man zeigte damit das handwerkliche Können. Die florale Ausgestaltung der Kathedrale sollte nicht nur ein Sinnbild eines paradiesischen Zusammenlebens aller Wesen sein, sondern auch die besondere theologische-, politische- und wirtschaftliche Bedeutung dieser Bauwerke untermalen.
- **Jugendstil ab 1896:** Die Zeit des Jugendstils wurde geprägt durch Erfindungen wie die Eisenbahn, das Automobil, das Flugzeug und das Kino. Sie alle weckten den Wunsch nach Linearität und Dynamik. Man versuchte in der Architektur besonders materialgerecht zu arbeiten und die damaligen räumlichen und konstruktiven Möglichkeiten der Glas- und Eisen/Stahltechnologie voll auszuschöpfen. Viele Künstler und Architekten wollten auch, als Reaktion auf die unmenschlichen Lebensbedingungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts, wieder „zurück zur Natur“. Dabei bedienten sie sich besonders einer naturnahen Ornamentik. Protagonisten dieser Stilrichtungen waren zum Beispiel Hermann Finsterlin (1887–1973), der nach den Erschütterungen des Ersten Weltkrieges auf der Suche nach den Wurzeln des Daseins, einer „Ur“-Gestalt war. Formale Anregungen und praktische Vorbilder suchte er in Urformen der Natur, die wiederum dem Urzustand der menschlichen Seele am nächsten zu sein schienen. Er schafft naturnahe Baukörper, deren physische Präsenz fehlt. Oder Erich Mendelsohn (1887-1953), der mit dem Einsteinturm eine wichtige Vorreiterrolle im Bereich der „freien skulpturalen Form“ einnahm. Das stromlinienförmige, und wie aus einem Guss wirkende Bauwerk ließ sich technisch aber nicht als reiner Betonbau realisieren. In diesem Bauprojekt formulierte Mendelsohn seine architektonische Vision einer dynamischen Form. Heute ist das Gebäude eines der wichtigsten expressionistischen Bauwerke seiner Zeit.

- **Naturformen in der heutigen Architektur:** Die Wiederkehr des Ornaments, des Gestus und genetisch generierte Formen. Allmann Sattler Wappner Architekten aus München zeigen mit dem Verwaltungsgebäude in Reutlingen nicht nur eine ungewöhnliche Hüllengestaltung, sondern auch eine Oberfläche, die sich jeglicher gewohnter Haptik und Betrachtungsweise entzieht. Ein weiteres Highlight des Gebäudes ist die Verwendung eines abstrahierten Blattmusters, als Kontrast zum kaum fassbaren Metallkörper. Dadurch scheint sich der umgebende Boden mit der Sockelzone zu verbinden. Der Architekt und Ingenieur Santiago Calatrava beeindruckt heute durch seine Naturalanalogien und Gestaltungsideen. Ihm gelingt es zwei komplementäre Denkweisen – analogische Traumarbeit und analytische Machbarkeitsforschung – auf erstaunlichste Weise miteinander zu verbinden. Seine Kreativität wird ergänzt durch profunde Kenntnisse auf den Gebieten der Physik und des Bauingenieurwesens, die er auch schon mit seiner Doktorarbeit zum Thema „Faltbarkeit von Fachwerken“ unter Beweis gestellt hat. Im Bereich der genetisch generierten Formen ist Greg Lynn der führende Vertreter der biomorphen Computer-Architektur. Seine Blob-Häuser (Binary Large Objects) werden im Zeitalter der Gen-Technologie nicht mehr entworfen, sondern von Computern gezüchtet. Kein Projekt versinnlicht diese Zukunftsvision besser, als Lynns Kunststoffmodell des Embryological House. Jeder der erzeugten Rohlinge dieser „Ei-Häuser“ ist einmalig. Die sich verändernde Form folgt dabei der digitalen Logik von Software-Programmen aus der Schiffs- und Raumfahrtindustrie.

Strukturelle Betrachtung

Wissenschaftler vereinfachen die Naturformen mittels der Mathematik und der Geometrie zu einer Idealstruktur und schaffen so die Grundlage für konstruktive Experimente. Man erkennt den energetisch-synergetischen Zusammenhang von Präformation und äußerer Einwirkung. Dabei stellt sich heraus, dass die Wirkungsprinzipien der Natur neuartigen Leichtbaukonstruktionen als Vorbild dienen können.

- **D´Arcy Thompson** (1860-1948): Der große englische Naturforscher und Humanist D´Arcy Thompson analysiert in seinem Werk „On Growth and Form“ biologische Erscheinungen und Vorgänge unter mathematischen und physikalischen Gesichtspunkten. Seine Texte geben Einblick über Größe und Formen von Zellen, Formen von Geweben oder Zellverbänden. Außerdem beschreibt er die Struktur von Spicularskeletten, gleichwinkligen Spiralen, die Gestalt von Hörnern und Zähnen. Es wird der Zusammenhang von Form und mechanischer Leistung gezeigt, und über die Theorie der Transformation ein Vergleich zu verwandten Formen aufgestellt.
- **Karl Culmann** (1821-1881): Der Mathematiker und Bauingenieur Karl Culmann, dem wir die Methode der „grafischen Statik“ verdanken, erkannte in den Knochenschnitten des Professors Julius Wolff die typischen Fließfiguren der Zug- und Druckrichtungen. Die durch das System von Drucklinien gewonnenen Erkenntnisse brachte er bei der Planung eines Krans zum Einsatz und beeinflusste damit Generationen von Ingenieuren. Der mit dem Bau des Eiffelturms beauftragte Statiker, Maurice Koechlin, wandte die neuen Erkenntnisse direkt an. Dieses Beispiel zeigt die transdisziplinäre Zusammenarbeit, die für die Bionik so wichtig ist.
- **Buckminster Fuller** (1895-1983): Buckminster Fuller war Architekt, Ingenieur, Designphilosoph und Poet. Doch besonders war er ein umfassender Denker, der sich mit den Problemen des Alltags auseinandersetzte und nach deren Lösungen suchte. Seine Theorien und Überlegungen bezogen sich unter anderem auf neue Wohnformen, Kraftfahrzeugbau und Kartografie. Der Entwurf geodätischer Kuppeln machte Buckminster Fuller berühmt – vor allem der Ausstellungspavillon der USA zur Expo 1967 setzte Zeichen.
- **Frei Otto (*1925)** Der Pionier des Leichtbaus Frei Otto schuf Bahnbrechendes auf dem Gebiet der Grundlagenforschung. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Natürliche Konstruktionen“ an der Universität Stuttgart forschte und entwickelte er zahlreiche Zeltkonstruktionen für die Expo 1967 in Montreal, bei dem er sich von Spinnennetzen und den Minimalflächen von

Seifenblasen inspirieren ließ.

- **Bodo Rasch (*1943)** hatte bei Frei Otto gelernt und realisiert seine Lehre nun schwerpunktmäßig in anderen Kulturen. Seine auf dem Prinzip der Minimalfläche basierenden Schirme stattet er mit einer ausgetüftelten Kinetik aus und schafft wie in der Moschee in Medina einen wandelbaren Innenhof. Die Schirme übernehmen dabei sehr wichtige Funktionen. Sie spenden den Betenden nicht nur den dringend benötigten Schatten, sondern regulieren auch die Klimatisierung und Luftzirkulation des zum Raum wandelbaren Innenhofs.
- **Claus Mattheck:** Unter der Leitung von Claus Mattheck entwickelte die Abteilung für Biomechanik des Forschungszentrums Karlsruhe, die Methode der Computer Aided Optimization (CAO). Adaptives Wachstum wird durch spannungsgesteuerte, thermische Ausdehnung simuliert. Eine weitere Methode, die Soft Kill Option (SKO) ermöglicht die Materialrückbildung von unbelasteten Zonen, ähnlich den Vorgängen in Knochen. Auf diese Weise erhält man einen Leichtbau-Designvorschlag mit sehr geringer Kerbspannung, der schon sehr nahe am wirklichen Optimum liegt.

Werkzeuge der Bionik

Die Werkzeuge, mit denen sich biologische Strategien auf kurzem, direktem Weg in technische System übertragen lassen, sind überschaubar und nur auf bestimmte Bereiche der im Vorfeld angesprochenen Kategorien anwendbar. Es handelt sich dabei zum einen um Formfindungsmethoden, die auf der Übertragung evolutionärer Prozesse basieren und zum anderen auf Strukturoptimierungsmethoden, die auf Kraftflussrichtungen und Materialeinsatz basieren. Diese wenigen werden im Folgenden kurz erläutert.

- **Evolutionstrategie:** Die Strategie der Evolution wird hierbei technisiert um komplexe Probleme mit Hilfe der Versuch-Irrtum-Methode zu lösen. D.h. das besser Angepasste überlebt, der Rest wird verworfen. Dazu wurden Evolu-

tionsstrategien aus der Natur entlehnt, die nun dazu dienen technische Probleme optimal zu lösen. Da die Problemstellungen mathematisch so komplex sind, dass sie rechnerisch nicht oder nur mit großem Aufwand zu lösen sind, greift man hier auf die Evolutionstechnik zurück. Die klassischen Evolutionsmechanismen, wie Mutation (Erbänderung), Selektion (Auslese) und Rekombination (Durchmischung) werden in der Evolutionsstrategie simuliert.

- **sko-Methode:** In einem Designraum, der gerade die Grenzabmessungen einhält, werden die Spannungen berechnet, die aufgrund der Betriebsbelastung auftreten. Entsprechend dieser berechneten Spannungsverteilung wird dann der Elastizitätsmodul (E-Modul) verändert. Das bedeutet, er wird in höher belasteten Bereichen erhöht, in gering belasteten Bereichen dagegen verringert. Das führt zu einer Aussteifung der tragenden Bereiche und zur Erweichung und damit weiteren Entlastung der minder belasteten Strukturelemente. Nach einigen Iterationsschritten werden die „Faulpelze“ zunehmend deutlicher von den „Arbeitswilligen“ getrennt und schließlich im letzten Schritt entfernt. Daher der Name sko (soft kill option). Am Beispiel eines Fachwerkträgers, der an einer Seite vertikal eingespannt ist, kann diese numerische Iteration nachgestellt werden. Je nach gewünschter Betriebsspannung ergibt sich ein unterschiedlich filigraner Aufbau. Offensichtlich führt die Wahl einer höheren Referenzspannung, gleichbedeutend mit der Verwendung von höherfestem Material, zu einem geringeren Materialverbrauch, d.h. es werden mehr Bereiche aus dem Bauteil entfernt. Das nur mit einem einzigen Finite-Elemente-Netz gewonnene Leichtbau-Design ist allerdings noch nicht in allen Details festigkeitsoptimiert. Es stellt vielmehr einen Leichtbau-Designvorschlag dar, der schon sehr nahe an dem wirklichen Optimum liegt. Eine nachfolgende CAO-Optimierung glättet schließlich die noch verbliebenen Kerbspannungen. Die sukzessive Anwendung von SKO und CAO liefert damit ein „ökologisches“ Design, das leicht und zugleich dauerhaft ist.
- **CAO (computer aided optimization):** In einfachen Worten ausgedrückt, simuliert die CAO-Methode adaptives Wachstum durch spannungsgesteuerte thermische Ausdehnung. Das einzige, was dazu benötigt wird, ist ein beliebiges kommerzielles Finite-Elemente-Programm, mit dem sich Thermospan-

nungen berechnen lassen. Ziel dabei ist eine Selbststeuerung des Wachstums. Das bei den Knochen beschriebene Prinzip der Selbststeuerung des Wachstums, aufgrund der auftretenden Belastungskräfte und Spannungen, kann auch bei einem Baumstamm beobachtet werden, der bei einem Erdbeben umgelegt wurde und sich selbst wieder aufrichtet. Das Auf-und-Abbau-Prinzip der Knochen wird heute bei der Entwicklung von Bauteilen, mittels Computersimulation, der sogenannten „Computer Aided Optimization“ eingesetzt. Knochenschrauben werden zum Beispiel in ihrer Form durch CAO derart optimiert, dass sie den extremen Belastungen gewachsen sind und weder brechen noch ausbrechen. In der Autoindustrie werden mit CAO Bauteile in Bezug auf Gewicht und Festigkeit optimiert.

- **CAIO (Computer-Aided-Internal-Optimization):** Diese Methode basiert auf der plausiblen Annahme, daß es vorteilhaft ist, Fasern eines Bauwerkesso anzuordnen, daß sie in Richtung des vom Bauteil zu übertragenden Kraftflusses liegen. Denn die Linien des Kraftflußverlaufes (die sogenannten Hauptnormalspannungstrajektorien) sind zugleich Linien, frei von Schubspannungen. Bei dem zu berechnenden Bauteil wird der Faserverlauf in iterativer Weise gefunden. Am Beispiel einer Astanbindung an einen Baumstamm kann man die Ausrichtung der Holzfasern leicht verifizieren. Die Fasern umgehen kunstvoll das Astloch, das damit viel von seiner gefährlichen Kerbwirkung verliert. Auch die radialen Holzstrahlen erfahren diese Faserumlenkung. Man erwartet, daß technische Probleme bei hochbelasteten Leichtbauteilen, wie das kerbspannungsfreie Einweben von Sensoren in Flugzeugteile aus Faserverbundwerkstoffen oder das lastgerechte Verbinden von Composite-Teilen mit dieser Methode optimiert werden können.
- **Fuzzy-Logik:** Fuzzy-Logik (eng.: fuzzy=ungenau, verschwommen, unscharf) ist eine Verallgemeinerung der zweiwertigen booleschen Logik. Sie lässt auch Wahrheitswerte zwischen „wahr“ und „falsch“ zu, sodass damit auch unscharfe Mengenabgrenzungen mathematisch behandelt werden können. Die Fuzzy-Set-Theorie, die unscharfe Mengenlehre, wurde bereits 1965 von L. A. Zadeh, Professor für Computerwissenschaften an der Universität von Berkeley, USA, entwickelt. Die Grundlagen dazu wurden jedoch schon früher vom

polnischen Logiker Jan Lukasiewicz entwickelt, der zur Beschreibung des Wahrheitswertes einer logischen Aussage Zahlen aus dem reellen Einheitsintervall $<0,1>$ (die reellen Zahlen zwischen 0 und 1 einschliesslich der Ränder) verwendete. Heute wird die Fuzzy-Logik bzw. Fuzzy-Control vorwiegend bei der Steuerung von Maschinen und Robotern oder auch handelsüblichen Haushaltsgeräten verwendet. Sie arbeitet nicht mathematisch exakt, sondern nach Regeln, die menschlichen Erfahrungen und Denkweisen entsprechen.

Forschungsstand der Bionik/Hochschulen

Beginnend mit der näheren regionalen Umgebung wird im folgenden Kapitel ein Überblick der aktuell geleisteten Forschungsvorhaben im Bereich der Bionik gegeben. Über die nationalen Grenzen hinweg ins Europäische Nachbarland und die ganze Welt wird abschliessend ein globaler Überblick gegeben.

Nationale Bionikforschung

Die Universität Freiburg, das Forschungszentrum Karlsruhe, das ITV Denkdorf, die TU Darmstadt, sowie die Universität München, sind regionale Hochschulen, die in unmittelbarer Umgebung an bionisch relevanten Forschungsbereichen arbeiten. In ganz Deutschland verteilt arbeiten die RWTH Aachen, die TU Berlin, die Hochschule Bremen, die TU Dresden, die TU Ilmenau, die UNI Münster, die Uni Jena sowie die Uni Bonn an bionisch relevanten Arbeitsgebieten. Die nachfolgend angegebenen Hochschulen und Forschungseinrichtungen stellen augenblicklich die Kernkompetenz bionischer Forschung in Deutschland dar. Darüberhinaus existieren mannigfaltige Kooperationen zur Industrie. Auch in mittelständischen Unternehmen ist das Thema Bionik mittlerweile vorgedrungen, da immer häufiger konkrete Fragestellungen aus diesem Bereich an die Hochschulen gestellt werden.

- **Universität Freiburg: Bionik und Leichtbaustrukturen, Neue Materialien**

Institut/ Institutsleiter: Fakultät für Biologie II, Prof. Dr. Wolfgang Haehnel, Botanischer Garten, Plant Biomechanics Group, Prof. Dr. Thomas Speck, Dr. Olga Speck und Prof. Dr. Hanns Christoff Spatz
Projektleitung: Prof. Dr. Thomas Speck, Dr. Olga Speck und Prof. Dr. Hanns Christoff Spatz
Projektteam: Dr. Friederike Gallenmüller, Dr. Deane Harder, Tom Masselter, Markus Rüggeberg, Sebastian Busch, Martina Goldmann, Roland Schlecker, Karin Martin
Anschrift: Fakultät für Biologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Schänzlestr. 1, D-79104 Freiburg / Botanischer Garten, Albert-Ludwigs-Universität, Schänzlestr. 1, D-79104 Freiburg i. Br.
Webseite: www.biologie.uni-freiburg.de

Inspiziert durch natürliche Faserverbundstrukturen werden an der Universität Freiburg und dort in der Plant Biomechanics Group unter der Leitung von Prof. Dr. Thomas Speck, Dr. Olga Speck und Prof. Dr. Hanns Christoff Spatz natürliche Gradientenmaterialien untersucht. Ebenso beteiligt an diesem Forschungsprojekt sind die Universität Tübingen, Institut für Geologie und das ITV in Denkendorf. Von Seiten der Industrie kooperieren diese Hochschulen mit Evologics GmbH Berlin, dem F&E Labor Bionik und der Pultrusion Dynamics Inc., einer Firma für Pultrusionstechnik aus den USA. Weitere Themenschwerpunkte sind Textilien für den effizienten Wassertransport, adaptive und selbst reparierende Materialien. Das Pfahlrohr *arundo donax* weist eine Materialstruktur mit variabler Dichte und Stabilität auf (Makrograduierung). Vor allem die Existenz kontinuierlicher Übergänge zwischen den verschiedenen Geweben sowie zwischen den Verstärkungselementen (verholzte Leitbündel) und der zellulären Matrix (Grundgewebe) ist für die mechanischen Eigenschaften des Materials verantwortlich. Zusätzlich baut das Pfahlrohr die bei Windbewegungen oft auftretenden hohen Scherspannungen zwischen den verschieden steifen Pflanzenkomponenten durch einen graduellen Steifigkeitsübergang zwischen Fasern und Matrix ab. So vermeidet die Pflanze das bei Faserverbundmaterialien oftmals auftretende Strukturversagen, indem sich bei dynamischer Belastung durch die Scherbelastung die steifen Fasern von der weicheren Matrix ablösen (Mikrograduierung). Gefördert wird das Projekt vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung). Angewendet werden diese Gradientenstrukturen mittels Pultrusionstechnik zur Herstellung gewichtsoptimierter und dauerbelastbarer Materialien. In Zusam-

menarbeit mit dem Institute Textil de France wurde eine neuartige 3D-Einzelbewegungsflechttechnik entwickelt. Mithilfe dieser Technik können Fasern in Lastrichtung in das Faserverbundmaterial eingebracht und mit einer Polyesterharzmatrix überzogen werden. Qualitätsmerkmale für die Pultrusion sind der Faser/Matrix-Gehalt, die Anzahl und Größe der Lufteinschlüsse und das Ausmaß von unerwünschten Faserverschiebungen. Diese Technik soll z.B. für die Herstellung von Leichtbaumaterialien in Luft- und Raumfahrt, zur Panzerung von Fahrzeugen oder in der medizinischen Prothetik angewandt werden.

- **FZ Karlsruhe: Formoptimierung bei Pflanzen**

Institut/ Institutsleiter: Institut für Materialforschung II, Abteilung Biomechanik, Prof. Dr. Claus Mattheck

Projektleitung: Prof. Dr. Claus Mattheck

Projektteam: Dr. Klaus Bethge, DI Roland Kappel, DI Alexander Sauer, Jürgen Schäfer, DI Jörg Sörensen, Dr. Iwiza Tesari, Dr. Karlheinz Weber, DI Christian Wissner

Anschrift: Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II, Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe

Webseite: www.imf.fzk.de

An der Universität Karlsruhe und dort am Institut für Materialforschung II bearbeiten Prof. Dr. Mattheck mit Dr. Bethge, Dr. Weber und Dr. Tesari schwerpunktmäßig die Dauerfestigkeit von Bauteilen und deren Anwendung. Die von Professor Dr. Mattheck entwickelte CAO-Methode simuliert adaptives Wachstums durch spannungsgesteuerte thermische Ausdehnung. In einem Designvorschlag werden für die später gewünschten Last- und Lagerungsbedingungen die mechanischen Spannungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet. Die so ermittelte Spannungsverteilung wird dann einer fiktiven Temperaturverteilung gleichgesetzt und diese in einem nachfolgenden Rechenschritt als alleinige Belastung aufgebracht. So kann in mehreren Durchläufen Material dort angelagert werden wo die Spannungsspitzen auftreten. Zusätzlich kann dieses Verfahren durch die sogenannte SKO-Methode erweitert werden. Diese Methode simuliert die Mineralisationsvorgänge im Knochen. Höher belastete Bereiche werden ausgesteift, minder belastete Bereiche dagegen erweicht und schließlich ausgemerzt. Entsprechend der berechneten Spannungsverteilung wird dann das Elastizitätsmodul (E-Modul)

dul) verändert. Das bedeutet, es wird in höher belasteten Bereichen erhöht, in gering belasteten Bereichen dagegen verringert. Das Projekt wird gefördert vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) und von der Helmholtz-Gemeinschaft (Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren). Angewendet wird dieses Verfahren im Maschinenbau vor allem bei der Herstellung dauerfester Bauteile. Es wurde schon zur Optimierung orthopädischer Schrauben und tragender Fahrzeugteile erfolgreich angewandt. Auch Leichtbaulösungen mit aufgelösten Tragwerken in der Architektur sind denkbar.

- **ITV Denkendorf: Textile Materialien**

Institut/ Institutsleiter: Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, Direktor: Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck
Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck, Dr.-Ing. Thomas Stegmaier
Projektteam: Dr.-Ing. Markus Milwich, Dipl.-Ing. Andreas Scherrieble, Dipl.-Ing. Melanie Geuer
Anschrift: Institut für Textil- und Verfahrenstechnik, Körschtalstraße 26, D - 73770 Denkendorf
Webseite: www.itv-denkendorf.de

Das ITV Denkendorf arbeitet innerhalb eines breiten Netzwerkes mit erfahrenen Botanikern, Chemiefirmen, Textilherstellern und Endnutzern zusammen. Ziel ist es dabei Pflanzen als Ideengeber für die Entwicklung biomimetischer Materialien und Technologien zu nutzen. Derzeit werden erste Textilien mit selbstreinigender Oberflächen entwickelt. Weitere Forschungsbereiche sind die Prinzipien der transparenten thermischen Isolation, das Analysieren von Wassertransport bei Pflanzen und dessen Umsetzung in energieautarken Wassertransport ohne mechanische Pumpen, sogenannte „smart materials“ mit adaptiven Eigenschaften und die Entwicklung extrem leichter Fasern und Materialien für die Textilindustrie.

- **TU Darmstadt: Bioanaloge Software, Neurobiologie, Robotik und Biosensorik, Simulation und Modellierung, Biomechanik und Strukturoptimierung, Biomedizintechnik und Biomaterialien, Adaptive Systeme und Strukturforschung, Wissenschaftstheorie und Technikfolgenabschätzung, Betriebs- und volkswirtschaftliche Forschung**

Institut/ Institutsleiter: Biotechnik-Zentrum TU Darmstadt (BitZ), Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea
Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea

Projektteam: Dr. Hendrik Bargel, Martin Zeuch, Sigrid Belzer, Aida Šaric, Dr. Torsten Rossman, Bernhard Köhler
Anschrift: Biotechnik-Zentrum TU Darmstadt (BitZ), Petersenstraße 20, L02/04, Raum 325, D-64287 Darmstadt
Webseite: www.tu-darmstadt.de/bitZ

Am Biotechnik-Zentrum der TU Darmstadt gibt es mittlerweile eine große Bandbreite von Forschungsthemen im Bereich Biotechnik. Ein Forschungsschwerpunkt ist dabei die Funktionsweise der instationären Aerodynamik des Schlagfluges. Strömungsvisualisierende Maßnahmen haben hierbei gezeigt, dass sich hinter fliegenden Insekten und Vögel ring- oder leiterwirbelartige Strömungen ausbilden. Nachlaufmessungen im Windkanal an einem vogelähnlichen flügelschlagenden Modell sollen nun eine genauere Untersuchung der Auftriebs- und Vortriebserzeugung am schlagenden Flügel ermöglichen. Die Übertragung der Funktionsprinzipien eines biologischen Armmodells auf das ingenieurmäßige Konzept eines „bionischen Roboters“ ist nur eines der weiteren Forschungsprojekte. Derzeit gibt es mehrere Ansätze die sich mit dem Thema Computersimulation und deren Umsetzung in bioanaloge Software und Robotik auseinander setzen. Ziele sind dabei unter anderem Bewegungsabläufe zu studieren, abzuleiten, zu optimieren und auf Lern- und Ausbildungsgebiete (Sport- und Bewegungswissenschaft), Biodynamische Modellierungen, Design von Strukturen des Bewegungsapparates und ähnliches zu übertragen.

Das Thema „Adaptronik als Bestandteil Bionischer Forschung“ ist ein weiteres Untersuchungsfeld am Institut von Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea. Adaptronische Systeme sind Systeme, die sich veränderten äußeren Bedingungen selbsttätig anpassen. Wesentlich ist hierbei, dass die Struktur nicht wie bisher im Maschinenbau üblich passiv ist, sondern aktiv in ihre Funktionalität eingreift und diese ständig nachreguliert und optimiert. Optimiert wird hierbei die Struktur hinsichtlich Effizienz, Funktion, Langzeitstabilität und Systemzuverlässigkeit bei möglichst geringem Energieverbrauch und möglichst wenig einzusetzendem Material. Diese Anforderungen werden durch Integration von aktiven und sensorischen Komponenten in die Struktur erreicht. Die hohe Integrationsdichte adaptronischer Systeme wird im wesentlichen durch multifunktionale Werkstoffe umgesetzt. Werkstoffe, die sowohl mechanische lasttragende Funktionen als auch aktorische bzw. sensorische Funktion über-

nehmen können. Solche Werkstoffe bilden die Grundlage adaptronischer Komponenten, und ihre Eigenschaften prägen maßgeblich die Eigenschaften der Systeme. Bauteile in allen Bereichen des Maschinenbaus werden zunehmend mit elektronischen Komponenten ausgestattet und durch aktorische und sensorische Funktionselemente im Sinne der Adapttronik ergänzt. Projekte die aus dieser Thematik hervorgegangen sind sind die Entwicklung von Adaptiven Beinprothesen, Fassaden zur Reduzierung von Schallimmissionen in Gebäuden, Periodische Trennflächen und Systemintegrationen im Bereich der Mikrochipstechnik.

- **Universität München: Technologisch erzeugte Spinnenseide, Muschel-Kollagen, Proteinnanofibrillen und Biomaterialien**

Institut/ Institutsleiter: Lehrstuhl für Biotechnologie, Dr. Thomas Scheibel

Projektleitung: Dr. Thomas Scheibel

Projektteam: Dr. Charlotte Vendrely, Dr. Lin Römer, Simone Hess, Christian Ackerschott, Ute Slotta, Anja Hagenau, Kristina Spiels, David Keerl, Markus Heim, Andreas Lammel, Michael Suhre

Anschrift: Technische Universität München, Department Chemie, Lehrstuhl für Biotechnologie, Lichtenbergstr. 4, 85747 Garching

Webseite: www.ch.tum.de/biotech/biochem

An der Technischen Universität München und dort am Institut für Biochemie arbeitet Dr. Thomas Scheibel mit seinem Team an technologisch erzeugter Spinnenseide. Spinnenseide ist eines der stabilsten Materialien überhaupt. Die Widerstandsfähigkeit der Spinnenseide übertrifft Kevlar um das doppelte und Stahl um das siebenfache. Sie ist dehnbar um die 1,5-fache Länge bei einer Tragfähigkeit von 2 t/inch². Jede Spinne kann viele unterschiedliche Fäden für verschiedene Einsatzbereiche spinnen, die stabilste ist die sogenannte „Draglinesilk“, die verwendet wird um die Grundstruktur des Netzes zu erstellen. Harte Bereiche der Seide für Stabilität ergänzen weiche für Flexibilität. Ein Faden der Spinne besteht aus einem Hauptstrang, der von unterschiedlich vielen dünneren Fäden, die der Seide die gewünschten Eigenschaften verleihen, umspunnen wird. Die Grundbausteine des Materials sind lange Eiweiß-Proteinketten die durch evolutionäre Prozesse optimiert wurden. Das Projekt wird unterstützt durch die Hochschulpatentinitiative Bayern und wurde mit dem Junior Scientist Award der Werkstoffwoche 2004 ausgezeichnet. Frühere Ver-

suche, die Spinnenseide künstlich zu erzeugen beruhten auf Genmanipulation von Ziegen durch die Firma Nexia Biotech in Kanada. Hierzu wurde das verantwortliche Spinnengen in die Erbinformation von Ziegen eingeschleust, die dann in ihrer Milch das gewünschte Protein produzierten. Dieses Verfahren erzeugt jedoch nur geringe Mengen des Proteins. Das Verfahren der TU München vereinfacht das Spinnengen für die Produktion der Seide durch Klonverfahren, so dass es in Bakterien eingeschleust werden kann. Diese Methode produziert ein vielfaches der Menge an Proteinen im Vergleich zu anderen Verfahren. In der Proteinlösung kann zudem jede gewünschte Form des Fadens durch Zugabe einer entsprechenden Chemikalie „gesponnen“ werden. Anwendbar ist die künstliche Seide für extrem belastbare Seile und Textilien und im Medizinischen Bereich. Überzüge aus künstlicher Spinnenseide für Implantate können das Anwachsen des Implantats fördern und sind für den menschlichen Körper gut verträglich.

- **RWTH Aachen: Informations- und Neurobionik, Verfahrensbionik, Bewegungs- und Sensorbionik, Strukturbionik, Organisations- und Optimierungsbionik, Konstruktionsbionik**

Institut/ Institutsleiter: Institut für Biologie II, Professor Dr. Hermann Wagner

Projektleitung: Professor Dr. Hermann Wagner

Projektteam: Professor Dr. Hermann Wagner, PD Dr. Harald Luksch, Dr. Marcus Wirth

Anschrift: Institut für Biologie II, Kopernikusstr. 16, D-52056 Aachen

Webseite: www.bio2.rwth-aachen.de/bionik

Das Zentrum Bionik an der Hochschule Aachen wurde gegründet, um die große Kompetenz im Fach Bionik an der RWTH zu bündeln. An der RWTH Aachen existieren an verschiedenen Fakultäten vielfältige Aktivitäten im Bereich der Bionik. Eine zentrale Rolle spielen dabei auf der einen Seite naturgemäß Aktivitäten in den Lebenswissenschaften Fachgruppe Biologie, Medizin sowie die Forschungsaktivitäten im Maschinenbau und der Informations- und Elektrotechnik. Im Folgenden werden diese Aktivitäten beispielhaft an Hand der verschiedenen Unterbereiche der Bionik dargestellt. Konkret wird in der Arbeitsgruppe Informations- und Neurobionik langfristig angestrebt, einen definierten neuronalen Schaltkreis aus dem Hörsystem von Wirbeltieren

in Biohybridtechnik nachzubauen. Biohybridtechnik bietet die faszinierende Möglichkeit, Schaltkreise aufzubauen, in denen technische und biologische informationsverarbeitende Systeme direkt gekoppelt werden. In den letzten Jahren wurden in diesem Bereich große Fortschritte erzielt. So ist es heute möglich, explantierte Neuronen auf Siliziumchips zu kultivieren, zur Netzwerkbildung zu veranlassen und eine bidirektionale Interaktion zwischen biologischem und technischem Substrat zu erhalten. Das Forschungsprojekt selbst bietet dabei mehrere zukunftsweisende Perspektiven. Bei Erfolg könnten erstmals grundlegende und bisher nur unbefriedigend gelöste Fragen der Neurobiologie *in vitro* untersucht werden. Wie Nervensysteme einfache Grundoperationen durchführen, die unseren Grundrechenarten entsprechen, könnte ebenso studiert werden wie Grundlagen für das Lernen und das Gedächtnis. Schaltkreise, die *in vivo* nicht zugänglich sind, könnten gezielt nachgebaut und *in vitro* analysiert werden. Neben diesen Grundlagenaspekten könnten auf der Basis solcher biohybrider Schaltkreise jedoch auch neuartige Biosensoren für die Umweltanalytik, ggf. auch für die Medizintechnik entwickelt werden.

Im Bereich der Informationsbionik wird derzeit das Projekt „Schalllokalisationssysteme für mobile Roboter“ intensiviert. Die Verfahrensbionik möchte durch ein tieferes Verständnis der Prozesse (in denen Stoffe umgewandelt werden und sich das Reaktionsprodukt in seinen Eigenschaften grundlegend von den Ausgangssubstanzen unterscheidet) technische Prozesse entwickeln und verbessern. Insbesondere werden die Funktionsweise der Atmungsorgane und des Sauerstoffverbrauchs bei höheren Lebensformen mit denen in technischen Systemen verglichen. Vertieft wird dabei die spezielle Problematik der Sauerstoffspeicherung bzw. Löslichkeit, die bei höheren Organismen durch die Verwendung von Hämoglobinen gelöst wird, in technischen Systemen durch die Verwendung von Luftblasen und künstlichen Sauerstoffvektoren ersetzt wird.

Die Strukturbionik-Gruppe der RWTH Aachen befaßt sich mit der „Analyse und Modellierung funktionsorientierten Verhaltens biologischer Strukturen“. Projekte hierbei sind die Entwicklung und Validierung eines Ganzkörpermodells des Stütz- und Bewegungsapparates des Rückens, die Untersuchung

der Wechselwirkung zwischen interner und externer Kehlkopfmuskulatur bei pathologischer Stimmgebung, Experimentelle Strömungsuntersuchung zum Verständnis der Rauschentstehung im menschlichen Vokaltrakt an einem pulsierend durchströmten Modellkanal mit naturgetreuer Stimmlippenfunktion, Nichtinvasive Bestimmung von Lage und Öffnungsgrad des menschlichen Kehlkopfs mittels EGG-Array- Technik und die Mechanische Modellierung von planspiralen Cephalopodengehäusen. Das Forschungsziel der Organisations- und Optimierungsbionik befasst sich mit Organisationsformen in Natur und Wirtschaft. Hier wird untersucht, ob Organisationsformen in der Natur als Vorbilder für die Organisation von Wirtschaftsunternehmen dienen können.

- **TU Berlin: Evolutionstechnik, Vogelflug und Bionik, Wasserstoffgewinnung mittels artifizierlicher Bakterien-Algen-Symbiose, Wasserstoffgewinnung mittels Purpurbakterien, Reibungsvermindernde Häute zur Reibungs- und Verschleißminderung, Bionische Welt im Jahr 2099, Polarbionik**

Institut/ Institutsleiter: FG Bionik und Evolutionstechnik, Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg

Projektteam: Dr. Rudolf Bannasch, Ulrich Berg, Dipl.-Ing. Peter Bienert, Dipl.-Ing. Ivo Boblan, Simon Gallinger, Dipl.-Ing. Berkant Goeksel, Birgit Habenstein, Dipl.-Ing. Peter Lajos Hartwig, Dipl.-Math. Oleksij Kebkal, Dr. Konstantin Kebkal, Dr. Doris Kiefer Abdullah Regabi El Khyari, Sonja Leberrecht, Dipl.-Ing. Frank Lumpitzsch, Sven Martinek, Dipl.-Math. Ivan Santibanez-Koref, Dipl.-Ing. Michael Schmid, Hartmut Schwenk , Dipl.-Ing. Michael Stache

Anschrift: Technische Universität Berlin, FG Bionik und Evolutionstechnik, Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg, Ackerstrasse 71-76, D-13355 Berlin

Webseite: www.bionik.tu-berlin.de

Nach dem Vorbild der Algensymbiose entwickeln die Wissenschaftler des Fachgebietes Bionik an der Universität Berlin, sowie die Abteilung molekularer Biochemie der Universität Bonn artifizielle Bakterien-Algen-Symbiose-Reaktoren. Geleitet wird dieses Forschungsexperiment durch Prof. Dr. Ingo Rechenberg und Dr. Thomas Happe von der Universität Bonn..Hinter der Bezeichnung „Arbas“ verbirgt sich eine Methode zur Gewinnung von Wasserstoff aus Photosynthese. In einem Bioreaktor gehen photoautotrophe Grünalgen und photoheterotrophe Purpurbakterien eine Symbiose ein. Der Versuchsaufbau bildet den natürlichen Stoffwechsel der Blaualge *nostoc muscorum* nach. Vegeta-

tive Zellen und Heterozysten der Blaualge arbeiten zusammen wie Grünalgen und Purpurbakterien der Bakterien-Algen-Symbiose. Im Reaktor zirkuliert CO₂, welches durch die Grünalgen mit Wasserstoff beladen wird und durch die Purpurbakterien wieder entladen wird. Durch einen Mangel an Stickstoff zur NH₃-Bindung im Kreislauf wird Wasserstoff freigesetzt. Der Bioreaktor wird jährlich in der Sahara-Wüste aufgebaut um unter Extrembedingungen neue Erkenntnisse zu sammeln. Ein weiterer Ansatz zur Gewinnung von Wasserstoff aus Algen wird von Dr. Thomas Happe an der Uni Bonn verfolgt. Cyanobakterien und Grünalgen sind die einzigen Organismen mit oxygener Photosynthese, die Wasserstoff durch eine biologische Umwandlung der Lichtenergie produzieren können. Die Alge gibt den Wasserstoff jedoch nur an ihre Umwelt ab wenn ihr Stoffwechsel durch Entzug von Schwefel gedrosselt wird. Die Photosynthese läuft weiter auf voller Leistung und produziert einen H₂ Überschuss, der aufgefangen werden kann. Die Methode besitzt ein großes Potential zur Effizienzsteigerung durch genetische Manipulation der Ausgangsorganismen. Beide Projekte werden gefördert durch die DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) und durch NEDO (International Joint Research Program). Ein langfristiges Ziel der Entwicklung ist die Herstellung biochemischer Batterien oder die direkte Applikation der Technologie auf Gebäudehüllen, die bei Sonneneinstrahlung selbständig Energie durch Wasserstoff produzieren.

- **TU Berlin: Bionisch inspirierte Oberflächenstrukturen am Beispiel der Haihaut**

Institut/ Institutsleiter: Fachbereich 10 Verkehrswesen und Angewandte Mechanik, Dr.-Ing. Dietrich W. Bechert
Projektleitung: Dr.-Ing. Dietrich W. Bechert
Projektteam: Martin Bruse, Wolfram Hage, Jacobiene van der Hoeven, Gunter Hoppe
Anschrift: Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA), Müller-Breslau-Straße 8, 10623 Berlin-Charlottenburg
Webseite: www-hfi.pi.tu-berlin.de

An der Universität Berlin arbeiten Dr. Dietrich W. Bechert und sein Forschungsteam mit Martin Bruse, Wolfram Hage, Jacobiene van der Hoeven und Gunter Hoppe, an Strömungsoptimierte Oberflächen, die durch die Haifischhaut inspiriert sind. Auch das DLR - Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik und dort die

Abteilung Turbulenzforschung sind mit diesem Forschungsbereich vertraut. Delphine und Haie weisen einen sehr geringen Reibungswiderstand bei der Bewegung im Wasser auf. Die Forscher führen dies auf spezielle Hautstrukturen der Tiere zurück. Die Struktur aus feinsten Rillen und Schuppen verläuft parallel zur Körperachse und ist dafür verantwortlich dass Turbulenzen und Querströmungen auf der Hautoberfläche vermieden werden. Das Projekt wird gefördert vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) und erhielt 1998 den Phillip Morris Forschungspreis. Unter dem Mikroskop wurde die Mikrostruktur der Hautoberfläche mit Hilfe kleinster Nadeln und Mikrometerschrauben vermessen und hundertfach vergrößert und auf Plexiglasmodelle übertragen. Diese sogenannten Riblets lassen sich relativ einfach mit dreidimensionalen Fräsverfahren herstellen und weisen eine Rillenweite von ca. 6,5 mm auf. Strömungstests dieser Prototypen finden in einem Strömungstank gefüllt mit Öl statt, da sich die künstlich vergrößerten Strukturen im Medium Öl ähnlich den Strukturen realer Größe in Luft verhalten. Der Strömungstank misst 10x1,5 m, wobei das synthetische Öl durch zwei Schiffsschrauben mit ca 1,5 m/s durch das Becken geleitet wird. Die Funktion der Haifissschau konnte bereits erfolgreich durch die Firma 3M auf selbstklebende Folien übertragen werden. Diese Folien erreichen bei 75% Bedeckung der Flugzeugoberfläche eine Wandreibungsverminderung von bis zu 10%. Die Firma Speedo International Inc. wendet die Technik auf Schwimmanzüge an, die den Wasserwiderstand beim Schwimmen deutlich reduzieren sollen. Zusätzlich verlaufen die Nähte der Anzüge entlang der aktiven Muskelgruppen um optimale Passform zu gewährleisten.

- **Hochschule Bremen: Adhäsionsvermeidung durch Antifouling, Neue Materialien, Klebfreie Adhäsion, Lokomotion und Transportsysteme, Hydrodynamik, Leichtbau, Optimierungsverfahren, Biosensorik, Robotik, Organisationsbionik**

Institut/ Institutsleiter: Fachrichtung Bionik FB7, Prof. Dr. Antonia B. Kesel

Projektleitung: Prof. Dr. Antonia B. Kesel

Projektteam: Prof. Dr. Susanna Labisch, Dipl.-Biol., BSc. Informatik, Dipl.-Math. Bodo Blume, Dipl.-Ing. (FH) Florian Hoffmann, Dipl.-Biol. Ralph Liedert, Dipl.-Biol. Andrew Martin, Dipl.-Biol. Katrin Mühlenbruch, Dipl.-Physiker Volker Nebe, Dipl.-Biol. Nadia Schulte-Pelkum, Dipl.-Biol. Rene Sonntag, Dipl.-Biol. Doris Zehren

Anschrift: Hochschule Bremen, Internationaler Studiengang Bionik (ISB) , Fachbereich 7, Neustadtwall 30, D-28199 Bremen
Webseite: bionik.fbsm.hs-bremen.de

Der Schwerpunkt der Fachrichtung Bionik an der Hochschule Bremen liegt momentan im Auf- und Ausbau des Internationalen Studiengangs Bionik (ISB), der seit dem Wintersemester 2003/04 an der Hochschule Bremen existiert. Parallel werden mehrere Themenbereiche verfolgt, die in den nächsten Jahren als Forschungsschwerpunkte ausgebaut werden. Dazu gehört unter anderem die Entwicklung einer alternativen Oberflächenbehandlung zur Vermeidung bzw. Reduktion von biogenem Bewuchs (Antifouling), wie auch die Entwicklung von sog. „smart materials“, Werkstoffe die meist multifunktional, adaptiv, selbstheilend und vollständig rezyklierbar sind. Während im Projekt Antifouling Adhäsionsvermeidung Ziel der Forschungsbemühungen ist, wird in weiteren Projekten an Bio-Oberflächen genau das Gegenteil angestrebt. Von Interesse sind Oberflächenstrukturen und Mechanismen, die gerade der Erzeugung von Adhäsion dienen. Ins Zentrum der Bemühungen rücken dabei vor allem Klebstofffreie Haftsysteme (Trocken-Haftungen), die rückstandsfrei und reversibel eingesetzt werden können. Durch Biomechanische Analysen der Fortbewegung von Tieren (Lokomotion) werden derzeit unterschiedlichste Strategien zur Minimierung der energetischen Bilanz bei der Bewegung ermittelt. Die dabei entdeckte Vielzahl alternativer energieeffizienter Antriebsmechanismen und -strukturen könnte dazu dienen die Treibstoffkosten erkennbar zu minimieren. Diese Systeme sind dabei nicht nur auf den Boden beschränkt, sondern analog zu ihren natürlichen Vorbildern, sind auch Anwendungen bzw. Applikationen im aerodynamischen wie im hydrodynamischen Bereich möglich. In Forschungskooperation mit der TU Darmstadt gibt es Anstrengungen die Reichweite von autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs), durch die Minimierung des bewegungsinduzierten Widerstands (Form-, Reibungs- wie induzierter Widerstand) zu erhöhen.

Weitere Themen der Fachrichtung Bionik an der Hochschule Bremen sind neben der Biosensorik auch die Robotik und Organisationsbionik, die Ableitung geeigneter Konstruktionsprinzipien im Leichtbau, Optimierungsverfahren für alle aktuell existenten technischen Verfahren sowie Optimierungsverfahren,

die sowohl als „Evolutionsstrategie“ als auch als „Energie-“ bzw. „Form-Optimierungs“-Prozesse Eingang in die Entwicklung neuer Techniken und Technologien finden.

- **TU Dresden: Funktionen mikrostrukturierter kutikularer Oberflächen mit Schwerpunkt Lotus-Effekt**

Institut/ Institutsleiter: Institut für Botanik, Prof. Dr. rer. nat. habil. Christoph Neinhuis
Projektleitung: Prof. Dr. rer. nat. habil. Christoph Neinhuis
Projektteam: Dr. rer. nat. Frank Müller, Dr. rer. nat. Dietmar Quandt, Dr. rer. nat. Ingo Uhlemann, Dr. rer. nat. Friedrich Ditsch, Dr. rer. nat. Alexandra Stoll, Dipl. Ing. Per Löthman, Dr. rer. nat. Hendrik Bargel, Dipl. Biol. Stefan Wanke, Dipl. Biol. Anna-Magdalena Barniske, Dipl. Biol. Volker Buchbender, Dipl. Forsting. (FH) Bernd Schulz, Markus Günther, Michael Kallmeyer
Anschrift: Institut für Botanik, Zellescher Weg 20b, D-01217 Dresden
Webseite: www.biologie.tu-dresden.de

An der TU Dresden beschäftigt sich Prof. Dr. rer. nat. habil. Christoph Neinhuis vor allem mit den Funktionen mikrostrukturierter kutikularer Oberflächen. In gemeinschaftlicher Arbeit mit Professor Wilhelm Barthlott vom Nees-Institut der Universität Bonn und rund 15 Industriepartnern wird an der Entwicklung technischer mikro- und nanostrukturierter superhydrophober selbstreinigender Oberflächen mit erheblichem wirtschaftlichem Potential gearbeitet.

- **TU Ilmenau: Bionik der Mikrosysteme, Bionik und Mechatronik für das Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik, Bionisch inspirierte Robotik**

Institut/ Institutsleiter: Fakultät für Maschinenbau Fachgebiet Biomechatronik, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.med. (habil.) Hartmut Witte
Projektleitung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.med. (habil.) Hartmut Witte
Projektteam: Dipl.- Ing. Emanuel Andrada, Dipl.- Biol. Kathrin Carl, Dipl.- Ing. Robert Fetter, Dipl.- Ing. Ulrike Fröber, Dipl.-Ing. Irina Gavrilova, Dipl.-Inf. Teodora Kikova, Dipl.- Ing. Stefan Lutherdt, Dipl.- Ing. Jörg Mämpel, Dipl.- Ing. Alexander Müller, Dipl.- Ing. Mike Stubenrauch, ME Claysson Vimeiro, Dipl.- Betriebswirt (FH) Wolfgang Kempf, Dipl.- Biol. Danja Voges
Anschrift: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Biomechatronik, Postfach 10 05 65, D-98684 Ilmenau
Webseite: www.tu-ilmenau.de/site/biomechatronik

Das Bionik-Kompetenz-Netz (BioKoN) mit Standort Ilmenau bietet der Industrie einen effizienten Zugang zu bionischen Problemlösungen, stärkt die Position Deutschlands auf dem Gebiet der systematischen Bionik und trägt zu einer umweltkonformen Technikentwicklung bei. Es sollen dabei biologische und ingenieurstechnische Kompetenzen zusammengeführt werden, indem sowohl Lösungsansätze aus der Natur als auch technische Problemstellungen dargestellt werden. Damit „Technik nach dem Vorbild der Natur“ methodisch von der Industrie verwirklicht werden kann, wurde ein Bionik-Dialog-Center eingerichtet mit fachspezifischen Workshops organisiert. Die bisher weitgestreuten Informationen sollen mittels einer Internetplattform gebündelt präsentiert und der Industrie sowie Aus- und Weiterbildungseinrichtungen zur Verfügung stehen. Diese Bionik-Ideenbank dokumentiert die Mannigfaltigkeit biologischer Lösungen in Bezug auf ihre technische Anwendbarkeit erstmalig umfassend und anwendergerecht.

- **Universität Münster: Angewandte Bionik, Bionik als fächerübergreifender Unterricht**

Institut/ Institutsleiter: Institut für Technik und Didaktik, Prof. Dr. Chr. Hein
Projektleitung: Prof. Dr. Chr. Hein
Projektteam: Prof. Dr. B. Hill, Prof. W. Biester, Prof. Dr. H. Steffen, Prof. Dr. W. E. Traebert, Dr. K. Pichol, Dr. M. Schramm, Dr. P. Linder, T. Riehle
Anschrift: Universität Münster, Fachbereich 11 Physik, Wilhelm-Klemm-Str. 9, 48149 Münster
Webseite: www.uni-muenster.de/physik

Die Universität Münster ist ebenfalls Standort des Bionik-Kompetenz-Netzes Biokon. Im Vordergrund steht in Münster vor allem die Konzipierung, Erprobung und Evaluierung bionischer Projekte für den technisch-naturwissenschaftlichen Unterricht sowie die Einführung der Zukunftstechnologie Bionik in Universitäre Forschung und Lehre. Ein weiteres Ziel ist die Einrichtung des Integrationsfachs „Angewandte Bionik“ im Rahmen der Ingenieurausbildung. Durch Bionisches Denken und Handeln sollen bei den Lernenden Fähigkeiten zu komplexen und vernetzten Denkweisen auf der Basis des „Ineinanderüber-

gehens“ von Technik und Natur herausgebildet werden. Dies soll zur Ausprägung eines fächerübergreifenden Entwicklungsdenkens führen.

- **Universität Jena: Fortbewegung mit hydraulischem Antrieb**

Institut/ Institutsleiter: Institut für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Bewegungswissenschaft, Prof. Dr. Reinhard Blickhan

Projektleitung: Prof. Dr. Reinhard Blickhan

Projektteam: Arthur Teichmann, Dipl. Phys. Michael Ernst, Dipl. Sport. Thomas Ertelt, Sten Grimmer, Roy Müller, Dr. Falk Mürl, Berno Pflanz, Lars Reinhardt, Christian Rode, Dr. Tobias Siebert, Dr. Olaf Till, Tom Wehmann

Anschrift: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Sportwissenschaft, Seidelstraße 20, 07749 Jena

Webseite: www.biomechanik.uni-jena.de

An der Universität Jena und dort am Institut für Biomechanik arbeitet das Forschungsteam von Professor R. Blickhan und Dr. L. Zentner an der Biomechanik des Spinnenbeins. Die Gelenke der Springspinne sind in Serie auf einem röhrenförmigen Extremitäten-Exoskelett angeordnet. Die einzelnen Beinsegmente sind über Gelenkzapfen und eine alles überspannende Gelenkhaut verbunden. Das Exoskelett besteht aus Chitinpolymeren in unterschiedlichen Verhärtungsgraden. Die Spinne erhöht den Druck in den Kanälen, die ihr gesamtes Exoskelett durchziehen, um ca. 50 kPa um ihre Beine zu strecken. Der Druckerzeuger liegt im Vorderkörper, in welchem Muskelzüge die Brustplatte auf den Rückenpanzer zu bewegen und so den benötigten Druck erzeugen. Die Membran im Gelenkspalraum wird durch Erhöhung des Druckes in Bewegungsrichtung gestreckt ohne gleichzeitig auszubeulen. Die Spinne ist mit dieser Technik in der Lage große und blitzschnelle Fangsprünge auszuführen. Unterstützt wird ihre Bewegung durch ein optimales Verhältnis der Längen der Beinsegmente zueinander. Das Projekt wird gefördert durch das BMBF und das DLR (Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum). Die Technik der Spinne erlaubt die Herstellung stoffschlüssiger Gelenke in der Miniaturtechnik, die für hydraulisch getriebene Miniaturgreifer in der Medizintechnik angewandt werden können. Sie können in ihren Freiheitsgraden optimal an die Aufgabe

angepasst werden und sind leicht zu desinfizieren, da sie keine schwer zugänglichen Zwischenräume besitzen.

- **Universität Bonn: Infrarotsensorik bei Insekten**

Institut/ Institutsleiter: Institut für Zoologie, Prof. Horst Bleckmann
Projektleitung: Dr. Helmut Schmitz
Projektteam: Tobias Mainz, Eva Kreiss, Martin Müller, Anne Wyen
Anschrift: Institut für Zoologie, Universität Bonn, Poppelsdorfer Schloß, 53115 Bonn
Webseite: www.zoologie.uni-bonn.de

Inspiziert durch den Kiefernprachtkäfer arbeiten Dr. Helmut Schmitz und Stefan Trenner von der Uni Bonn, Institut für Zoologie, und Prof. A. J. Welch und H. G. Rylander von der University of Austin, Department of Medical Engineering an der Insektensensorik dieser Käferart. Dieser ist in der Lage Waldbrände über mehrere Kilometer Entfernung zu orten und nutzt diese Fähigkeit um eine ökologische Nische zu besetzen und seine Eier in verkohlte Bäume zu legen. Mechanosensoren des Käfers reagieren auf die infrarote Strahlung des Feuers mit einer Wellenlänge von ca. 3 μm . Der Käfer besitzt kleinste Sinnesorgane (Sensillen) in Vertiefungen an der Körperunterseite. Diese Organe enthalten Kugeln aus Chitin, dem Material aus dem der Panzer des Käfers hauptsächlich besteht. Die Kugeln dehnen sich durch die infrarote Strahlung des Feuers aus und aktivieren einen fingerförmigen Fortsatz innerhalb der Sensillen. Das Projekt wurde 1993 begonnen und wird gefördert durch das BMBF und die Organisationen DARPA (Defense Advanced Research Project) sowie AFSOR (Air Force Office of Scientific Research). Diese Ergebnisse der Forschung sollen zur Entwicklung eines marktfähigen Waldbrandsensors verwendet werden. Der künstlich hergestellte Sensor basiert auf demselben Prinzip, die Kugeln aus Chitin werden jedoch durch Plättchen aus Polyethylen ersetzt, welches auf infrarote Strahlung ähnlich reagiert. Der so hergestellte Sensor wird robuster und billiger als herkömmliche Sensoren sein. Die Prototypen arbeiten noch nicht mit der gewünschten Genauigkeit, in 2-3 Jahren könnte das Produkt aber Serienreife erreichen.

Europäische Bionikforschung

Im europäischen Nachbarland wird vornehmlich in England der Umsetzung biologischer Systeme gearbeitet. Dort vor allem an der University of Reading, dem Center for Biomimetics, und der University of Bath, dem Center for Biomimetics and Natural Technologies. Diese Hochschulen im Süden und in der Mitte Englands, kooperieren seit längerem erfolgreich mit dem Biocomposites Center Wales, einem Forschungszentrum für Biomaterialien. Ebenso bestehen Kooperationen mit dem Center for Sustainable Design an der University of Cambridge. Auch die University of York und dort das Department of Biomedical Engineering sind kooperative Teile des Verbundes *Bionis*. Dieser Forschungsverbund arbeitet an den Forschungsthemen smart fabrics, der Umsetzungen natürlicher Atmungsvorgänge in Kleidung, an natürlichen Tarnmechanismen oder adaptiver Tarnung oder auch an medizinischen endoskopischen Geräten, die durch Motorik und Systematik von Parasiten inspiriert sind. Verbindungstechniken nach natürlichem Vorbild wie zum Beispiel Hakenverbindungen in der Natur werden ebenso untersucht wie Pflanzenfasern als Basismaterial für Neue Materialien.

- **University of Bath: Textilbionik**

Institut/ Institutsleiter: Center for Biomimetics and Natural Technologies, Prof. Julian Vincent
Projektleitung: Prof. Julian Vincent
Projektteam: Rhodi H. Armor, Paul Riggs, Veronika Kapsali
Anschrift: Centre for Biomimetic and Natural Technologies, The Department of Mechanical Engineering, The University of Bath, BATH BA2 7AY, UK
Webseite: www.bath.ac.uk/mech-eng/biomimetics

Professor Julian Vincent und sein Forschungsteam am Center for Biomimetics, bestehend aus Rhodi H. Armor, Paul Riggs und Veronika Kapsali arbeiten an den Mechanismen des Pinienzapfens, der als Vorbild für neue Techniken in der Textilforschungen dienen kann. Die Zapfen der Pinie fallen vom Baum sobald sie reif sind und öffnen sich um ihre Samen freizugeben und sich fortzupflanzen. Dieser Mechanismus beruht auf den zwei unterschiedlichen Materialien aus denen die Schuppen des Kiefernzapfens bestehen. Die Materialien reagieren verschieden auf Feuchtigkeit: beim Austrocknen

des Zapfens zieht sich das Material an der Aussenseite der Schuppe mehr zusammen als an der Innenseite und ermöglicht so die Öffnung der Schuppenstruktur. Das Projekt wurde 1997 begonnen und gefördert vom EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council UK) und vom DTI (Department of Trade and Industry UK). Neben der University of Bath ist das London Fashion College an dem Projekt beteiligt. Veronika Kapsali ist dort verantwortlich für das Design der neuen Textilien. Die Technologie soll auf adaptive Kleidung übertragen werden, die sich unterschiedlichen klimatischen Bedingungen anpassen kann und optimalen Tragekomfort gewährleistet. Ausgestanzte Lüftungsklappen mit einer Größe von ca. 1/200 mm öffnen sich bei Transpiration des Trägers. Das Verfahren des Kiefernzapfens wird umgekehrt angewandt, das heißt durch Einwirkung von Feuchtigkeit öffnen sich die Klappen, bei Nachlassen der Transpiration schließen sie sich selbständig wieder. Eine regendichte Unterschicht des mehrschichtigen Materials schützt den Träger vor Feuchtigkeit und Nässe von aussen. Das Department of Mechanical Engineering unter der Leitung von Prof. Julian Vincent, unterstützt durch Alex Parfitt, beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Biologische Tarnung des Tintenfisches. Diese ist aufgrund seiner direkten Übertragung mittels mechanischen Steuerungen besonders interessant. Tintenfische oder Kopffüßer gehören zur Familie *cephalopoda* und besitzen ein effizientes biologisches Tarnsystem. Sie können die Färbung ihrer Haut dem Untergrund und ihrer Umgebung anpassen, um so für Feinde schwerer erkennbar zu sein. Der Tarnmechanismus beruht auf dem mehrschichtigen Aufbau der Haut des Tintenfisches. Die Haut besteht aus 3 unterschiedlichen Farborganen: Chromatophoren, Iridophoren und Leucophoren. Chromatophoren sind pigmentierte Organe in den Farben rot, gelb und braun/schwarz die durch kleine radiale Muskeln kontrolliert vom zentralen Nervensystem gesteuert werden. Durch öffnen oder schließen dieser Organe erzeugt der Tintenfisch unterschiedliche Farbmischungen, Muster und Helligkeiten. Die Schichten der Iridophoren und Leucophoren befinden sich in tiefen Schichten der Haut. Ihre Aufgabe ist es, das Licht der Umgebung zu reflektieren und so die Wirkung der Chromatophoren zu unterstützen. Bewegt sich der Tintenfisch frei im Wasser kommen hauptsächlich die reflektierenden Schichten der Haut zum Einsatz und lassen ihn scheinbar im Wasser verschwinden.

Das Projekt wird gefördert vom britischen EPSRC und vom britischen MOD (Ministry of Defense). Diese Technik soll als adaptive Bionische Tarnung für militärische Fahrzeuge und Anlagen angewandt werden. Die Forscher versuchen ein gel-basiertes System zu entwickeln und auf faltbare Abdeckungen zu übertragen.

- **University of Reading: Isolationswirkung von Pinguinfedern**

Institut/ Institutsleiter: Center for Biomimetics, Dr. Richard Bonser

Projektleitung: Dr. Richard Bonser

Projektteam: Colin Dawson, George Jeronimidis, Graham Rice, Paula Foreshaw

Anschrift: Centre for Biomimetics, School of Construction Management and Engineering, Engineering Building, The University of Reading, Whiteknights, Reading RG6 6AY, UK

Webseite: www.rdg.ac.uk/Biomim

Das Forschungsteam von Dr. Richard Bonser am Center for Biomimetics mit Colin Dawson, George Jeronimidis, Graham Rice und Paula Foreshaw untersucht die Mechanik und Struktur der Pinguinfedern. Pinguine leben unter extremen Klimabedingungen und sind an ihre Umgebung durch ihre evolutionäre Entwicklung sehr gut angepasst. Die Federn des Pinguins bestehen aus Keratin, aus dem auch menschliche Haare und Fingernägel aufgebaut sind. Im Wasser liegt das Gefieder eng am Körper an und gewährleistet eine stromlinienförmige Form mit geringem Wasserwiderstand. Die Federn weisen eine primäre Verzweigungsstruktur in „barbs“ und eine weitere Aufspreizung in „barbules“ auf, die zu einem 3D-Velcro-Effekt führt. Durch diesen Effekt verhaken sich die Federn und richten sich an Land durch die Spannungen im Gefieder wieder auf. Zusätzlich werden die thermischen Eigenschaften des Gefieders durch die feine Aufspreizung positiv beeinflusst. Ein natürlicher Ölfilm schützt die Federn vor Nässe und sorgt dafür, dass sie auch im nassen Zustand noch eine hohe Isolationsleistung aufweisen. Das Projekt wird gefördert vom EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council UK) und vom MOD (Ministry of Defense). Forscher versuchen diese Erkenntnisse auf künstlich hergestellte Daunen zu übertragen und so deren Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Herkömmliche synthetische Federn verlieren weitgehend ihre Isolationsfähigkeit im feuchten Zustand und auch natürliche Daunen sind was-

serempfindlich, da ihr natürlicher Ölfilm aufgrund des Geruches entfernt wird bevor sie weiterverarbeitet werden. Ziel der Entwicklung ist es, eine wasserbeständige aktive thermische Isolierung mit variabler Dicke und Leistung herzustellen.

Internationale Bionikforschung

Vor allem an den amerikanischen Hochschulen werden gezielt biologische Phänomene untersucht, um diese in technische Systeme umzusetzen. Dabei sollte auch erwähnt sein, dass die meisten Forschungsgelder vom amerikanischen Militär zur Verfügung gestellt werden.

- **MIT Bosten: Hydrodynamic and Naval Design Research, Enhancing Soldier Survivability**

Institut/ Institutsleiter: Institute for Soldier Technologies, Center for Ocean Engineering, Professor Michael S. Triantafyllou
Projektteam: David Barret, Fred Baker, Franz Hover
Anschrift: Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, 5-288, Cambridge, MA 02139-4307, USA
Webseite: oe.mit.edu

Am MIT Boston und dort am Department of Ocean Engineering arbeitet das Forschungsteam, mit David Barret, Fred Baker und Franz Hover an der Effizienz mariner Antriebssysteme nach dem Vorbild des Thunfisch. Der Thunfisch gehört zur Familie *scombridae* und dient Forschern als Vorbild für die Entwicklung mariner Antriebssysteme. Thunfische sind durch ihre evolutionäre Entwicklung perfekt an die Bewegung im Wasser angepasst. Sie können Geschwindigkeiten unter Wasser von bis zu 80 km/h erreichen und sind auch bei hohen Geschwindigkeiten sehr manövrierfähig. Die Bewegungsabläufe des Fisches sind optimiert und erlauben eine hohe Energieeffizienz. Das Projekt wurde 1999 begonnen und dauert bis heute an. Förderung erhält das Projekt vom MIT Sea Grant College Program, vom ONR (Office of Naval Research) und von DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Zur Erfor-

schung der Bewegungen des Thunfisches wurde ein vereinfachtes mechanisches Modell des Fisches erstellt. Das Rückrat des Modells besteht aus 8 über Kugelgelenke miteinander verbundenen Teilen. Über Kabelzüge sind diese Segmente mit 6 Servomotoren, die die Steuerung und den Antrieb des Modells bilden verbunden. Die gesamte Konstruktion wurde mit einer flexiblen Hülle aus Lycra überzogen, die optimal am Modell anliegt. Dadurch entsteht kein Faltenwurf. Im MIT Towing Tank, einer Anlage zur hydrodynamischen Analyse von Schwimmkörpern, kann das Modell getestet werden. Das Modell bildet dabei einen lernfähigen Mechanismus an dem die Bewegungen und strömungstechnischen Aspekte beim Schwimmen optimal studiert und nachgebildet werden können. Die Erkenntnisse der Forschung sollen zur Entwicklung sog. *Autonomous Undersea Vehicles* (AUV's) zu militärischen Aufklärungszwecken eingesetzt werden.

- **University of Illinois: Human-Computer Intelligent Interaction, Human-machine interface design, Molecular and Electronic Nanostructures, Chemical and Physical processing Enhancing**

Institut/ Institutsleiter: Beckman Institute for Advanced Science, Department of Theoretical and Applied Mechanics, Department of Chemistry, Department of Aerospace Engineering, Dr. Scott White
Projektteam: Dr. Paul Braun, Dr. Philippe Geubelle, Dr. Jennifer Lewis, Dr. Nancy Scottos
Anschrift: Department of Aerospace Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 306 Talbot Laboratory, MC-236, 104 South Wright Street, Urbana, Illinois 61801, USA
Webseite: www.ae.uiuc.edu

An der University of Illinois und dort am Department of Theoretical and Applied Mechanics sowie dem Department of Chemistry arbeitet das Forschungsteam von Dr. Scott White gemeinsam mit Dr. Paul Braun, Dr. Philippe Geubelle, Dr. Jennifer Lewis und Dr. Nancy Scottos an der autonomen Reparatur Faserverstärkter Kunststoffe. Diese Mehrkomponentenwerkstoffe, vor allem Duroplaste, neigen zu Haarrissen tief in der Struktur der Matrix. Dort sind sie schwer zu erkennen und unmöglich zu reparieren. Diese Risse können durch thermische oder mechanische Ermüdung entstehen und beeinträchtigen die Tragfähigkeit des Materials erheblich. Das Projekt an der University of Illinois imitiert das Prinzip natürlicher Selbstheilung in der Natur. In eine Kunststoff-

matrix werden bei der Herstellung Mikrokapseln mit einer Größe von 50-200 Mikrometer und kleine Kugeln aus einem Katalysatormaterial eingebracht. Die Mikrokapseln sind gefüllt mit dem Epoxidharz DCPD. Beim Bruch des Materials platzen die Mikrokapseln und geben das flüssige Epoxidharz frei. Durch Kontakt mit dem Katalysatormaterial härtet das Harz in wenigen Minuten aus. Durch diese Methode kann die Tragfähigkeit des ursprünglichen Materials zu 90% wiederhergestellt werden. Die Technologie soll zu marktreifen Produkten weiterentwickelt werden. Zudem wird an einer Übertragung der Funktion auf andere spröde Materialien wie Glas oder Keramik geforscht. Das Projekt begann im Jahr 2001 und wird gefördert durch die Organisationen NSF (National Science Foundation), AFOSR (Air Force Office of Scientific Research) und Motorola Inc.

- **Case Western Reserve University: Biomedical Engineering, Biomaterials and Tissue Engineering**

Institut/ Institutsleiter: School of Engineering, Department of Macromolecular Science Structure and processing of polymers, Dr. Eric Baer

Projektleitung: Dr. Eric Baer

Projektteam: Radoslaw Novacky, Huywen Tai

Anschrift: Case Western Reserve University, Department of Macromolecular Science and Engineering, 2100 Adelbert Road, Kent Hale Smith Bldg, Cleveland, Ohio 44106, USA

Webseite: polymers.case.edu

Nach dem Vorbild des Oktopusauges wird am Department of Macromolecular Science unter der Leitung von Dr. Eric Baer und seinem Forschungsteam mit Radoslaw Novacky und Huywen Tai die Lichtbrechung innerhalb des Auges untersucht. Der Oktopus ist in der Lage das einfallende Licht 5-mal stärker zu bündeln als das menschliche Auge. Das Auge nutzt die Tatsache, dass Materialien verschiedener Dichte das Licht unterschiedlich stark brechen. Je größer die Differenz zwischen den Brechungsindizes, desto stärker wird das Licht gebogen. Biologische Linsen bestehen aus tausenden feinsten Schichten mit unterschiedlichem Brechungsindex. Das menschliche Auge zum Beispiel besitzt 20 000 solcher Schichten. Im Wasser lebende Tiere brauchen aber noch schärfere Sehorgane, da Wasser das Licht stärker bricht als Luft. Das Projekt wird gefördert durch die DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency).

Die Forscher der Case Western Reserve University haben mit Hilfe von Nanotechnologie das Auge der Krake kopiert. Die künstlichen Linsen bestehen aus Kunststofffilmen mit einer Dicke von 50 μm . Jeder Film besteht aus ca. 6000 einzelnen Schichten zweier Polymere, die so aufgebracht werden, dass die einzelnen Filme leicht unterschiedliche Brechungsindizes aufweisen. Auf diese Weise werden 100 verschiedene Polymerfilme erzeugt, deren Brechungsindex sich um jeweils ein Prozent unterscheidet. Stapelt man diese Filme aufeinander und biegt sie zu einer Kugel, entsteht eine Linse die so leistungsfähig ist wie das Auge des Oktopus. Die Technologie kann auch verwendet werden um völlig flache Linsen herzustellen. Hierzu muss die Polymerlinse einen von der Mitte radial nach aussen zunehmenden Brechungsindex besitzen. Nach Eric Baer ist es möglich, nahezu jeden Brechungsindex künstlich herzustellen. Weitere Vorteile der Polymerlinse gegenüber Glas sind ihre Flexibilität und ihr geringes Gewicht von einem Viertel einer vergleichbaren Glaslinse.

- **Lewis & Clark College Portland: Biomechanics, Design of legged climbing robots, Adhesive Biomaterials**

Institut/ Institutsleiter: Department of Biology, Dr. Kellar Autumn

Projektleitung: Dr. Kellar Autumn, Wendy Hansen

Projektteam: Paulette F. Bierzychudek, Greta Binford, Kenneth E. Clifton, Edwin R. Florance, Greg Hermann, Deborah E. Lycan, C. Gary Reiness, Steven R. Seavey

Anschrift: Lewis & Clark College, Department of Biology, 0615 S.W. Palatine Hill Rd, Portland Oregon 97219, USA

Webseite: www.lclark.edu/dept/biology

Inspiriert durch die Füße des Geckos werden am Department of Biology von Dr. Kellar Autumn und Wendy Hansen Haftfähigkeiten amphibischer Füße untersucht. Geckos sind Echsen, die auf senkrechten Flächen aus nahezu jedem Material laufen können. Dabei sind die Füße des Geckos sogar beim Laufen auf Sand völlig schmutzabweisend. Das Tier ist in der Lage sein eigenes Körpergewicht mit der Oberflächenhaftung nur einer Zehe zu tragen. Verantwortlich für diesen Effekt sind sehr kleine zwischenmolekulare Anziehungskräfte zwischen der Oberfläche und dem Fuß des Geckos. Diese Setae-Haare sind nur ca. 1 μm (ein menschliches Haar misst ca. 2 μm) dick und bedecken die gesamte Lauffläche des Fußes. Jedes Seta-Haar spaltet sich am Ende in wei-

tere 1000 feinste Härchen auf. Diese Härchen passen sich der Oberflächenstruktur des Untergrundes perfekt an und erzeugen Haftung durch zwischenmolekulare Van-der-Waals-Kräfte. Trotz der hohen Haftungskräfte kann das Gecko seine Füße leicht von Oberflächen lösen indem es die Lauffläche des Fußes von der Oberfläche „abrollt“. Diesen Vorgang muss das Gecko beim Laufen 15 mal pro Sekunde ausführen. Das Projekt ist eine Kooperationsarbeit mit Prof. S. Fearing und Prof. Robert Full von der University of Berkeley und Prof. Thomas Kenny von der Stanford University. Gefördert wird das Projekt durch die DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Eine kommerzielle Anwendung des Effekts befindet sich in der Entwicklung, es gelang bereits den Effekt, der auf rein physikalischen Grundlagen beruht, künstlich nachzubilden. Anwendungen könnten wiederverwendbare selbstreinigende Klebstoffe für nahezu alle Materialien sein. Dr. Kellar Autumn forscht auch an einer Übertragung des Effekts auf mehrbeinige Roboter, die in der Lage sein sollen wie ein Gecko senkrechte Wände zu erklimmen.

Literaturangaben (alphabetisch):

[AIZENBERG 2005]

J. Aizenberg: Skeleton of Euplectella, SCIENCE Vol. 309 8 July 2005

[ALBERTS 2004]

Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Walter, P.: Molekularbiologie der Zelle, Viley-VCH Verlag, Weinheim 2004.

[ALDERSEY-WILLIAMS 2003]

Aldersey-Williams, H.: Zoomorphic London, Laurence King Publishing Ltd., 2003

[ARCH+ 2002]

Arch+ 159/160, Zeitschrift für Architektur und Städtebau, Arch+ Verlag GmbH, Mai 2002

[ARCHITHESE 2002]

Archithese 2/02, Zeitschrift und Schriftenreihe für Architektur, Verlag Niggli AG, Februar 2002

[ARZT 2004]

Arzt, Eduard, Mikro-/Nanomechanik von biologischen Materialien und Systemen, Max-Planck-Institut; Stuttgart; Tätigkeitsbericht 2004

[BARTENBACH 1995]

Bartenbach, Chr., und Witting, W., Licht- und Raummilieu, Jahrbuch für Licht und Architektur, Berlin, Ernst & Sohn, 1995, S.13-23.

[BARTHLOTT 1997]

Barthlott, W. und Neinhuis, C. 1997: The purity of sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces; in: Planta 1, 102, 1-8; Heidelberg: Springer

[BECH 1990]

Bech, Reinhold und Ulrich Kaden: Echsen, Urania-Verlag, 1990

[BECKER 2001]

Becker, R.; Braun, H.: Nestwerk, Architektur und Lebewesen, Oldenburg, Isensee Verlag Oldenburg, 2001

[BEHLING 1996]

Behling, S. und S., Sol Power, Die Evolution der solaren Architektur, Prestel-Verlag 1996

- [BEILBY 1921]
Aggregation and Flow of Solids, MacMillan an Co. Ltd., London, UK, 1921
- [BERGMANN 1847]
Bergmann, C.: Über die Verhältnisse der Wärmeökonomie der Tiere zu ihrer Grösse“, Göttinger Studien, 1847
- [BRUNNER 1999]
Brunner, H., Synthetische Membranen, in: Wechselwirkungen Jahrbuch 1999, nach: H. Strathmann, 1976,
- [CLEAVE 1996]
Cleave, Andrew, Robben und Seelöwen, Parkland Verlag Köln, 1996, ISBN 3-88059-850-9
- [CLOUDSLEY-THOMPSON 2001]
Cloudsley-Thompson, J. 2001: Thermal and water relations of Desert Beetles; in: Naturwissenschaften 88, 11, 447-460
- [COINEAU 1987]
Coineau, Y.; Kresling, B.: Erfindungen der Natur, Bionik – die Technik lernt von Tieren und Pflanzen. Nürnberg, Tessloff-Verlag, 1987
- [CURREY 2005]
Currey, John D.: Hierarchies in Biomineral Structures, SCIENCE Vol. 309 8 July 2005
- [CROITORU et al., 1978]
- [DANIELS 1992]
Daniels, Klaus. „Hochhäuser - natürlich belüftet? Neue Wege ökologischen Bauens bei hohen Gebäuden“. Werkbericht 11. München: Selbstverlag, 1992. S. 15.
- [DANIELS 1995]
Daniels, Klaus. Technologie des Ökologischen Bauens. Basel [u.a.]: Birkhäuser Verlag, 1995, S. 39.
- [DANIELS 1996]
Daniels, Klaus. Technologie des Ökologischen Bauens. Basel [u.a.]: Birkhäuser Verlag, 1996. S. 34
- [DEE 2006]
Dee, Regine: Das Geheimnis der Geckos, Innovatel, Ausgabe März 2006
- [DEEGE 1995]

- Deege, M.: Die Technikphilosophie Arnold Gehlens Hamburg, Verlag Dr. Kovac, 1995
- [DRACK 2002]
Drack, M.: Bionik und Ecodesign - Untersuchung biogener Materialien
- [DUGUY 1992]
Duduy, Raymond: Pinnipedia - Handbuch der Säugetiere Europas, Aula-Verlag Wiesbaden, ISBN 3-89104-471-2
- [EICKE-HENNIG 1997]
Eicke-Hennig, Werner, und Jäkel, Michael. „Mehr Gebäudequalität mit weniger Energie. Ein Vergleich zweier Bürogebäude“. Bundesbaublatt 11 (1997): S. 788.
- [EISELE 2002]
Eisele, Johann: Hochhaus-Atlas München, Callwey, 2002. - 301 S. : Ill.; (dt.) ISBN 3-7667-1524-0
- [ERHORN 1996]
Erhorn, Hans, und Kluttig, Heike. „Energiesparpotentiale im Verwaltungsbau zur Reduzierung der CO2-Emission“. Sonderdruck aus gi - Gesundheits-Ingenieur 5 (1996): S. 270-274 und 6 (1996): S. 309-321.
- [EVANS 1991]
Evans, W.H., Graham, J.H.: Struktur und Funktion biologischer Membranen, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York 1991,
- [FEUERSTEIN 2002]
Feuerstein, G.: Biomorphic Architecture, Menschen- und Tiergestalten in der Architektur. Stuttgart, Edition Axel Menges, 2002
- [FISCH 2001]
Fisch, N., Möws, B., Zieger, J.: Solarstadt Stuttgart, W.Kohlhammer GmbH, 2001
- [FRITSCH 2002]
Fritsche, Olaf: Wie Geckos an der Decke „kleben“, Spektrum der Wissenschaft, September 2002
- [FUJISHIMA 2004]
Fujishima, Akira und Sato, Osamu “Biomimetic titanium dioxide film with structural color and extremely stable hydrophilicity” Applied Physics Letters, 22 November 2004

- [GIERSBERG 1967]
Giersberg, Hermann: Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere - Band 1, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena 1979 (1. Auflage 1967)
- [GLÄSER 1992]
Gläser, Hans-Joachim. Funktions-Isoliergläser. Böblingen: Expert Verlag, 1992. S. 41
- [GORTER & GREDEL 1925]
- [GRANDJEAN 1974]
Grandjean, Etienne. Wohnphysiologie, Zürich: Artemis, 1974. S. 205
- [GREGUSS 1985]
Greguss, F.: Patente der Natur, Technische Systeme in der Tierwelt, Biologische Systeme als Modelle für die Technik. Heidelberg, Quelle&Meyer Verlag, 1985
- [GÜLEC 1994]
Gülec, T., Kolmetz, S., und Rouvel, L. „Energieeinsparungspotential im Gebäudebestand durch Maßnahmen an der Gebäudehülle“. Bericht des Entwicklungsvorhabens IKARUS Nr. 5-22. Forschungszentrum Jülich GmbH, Hg. Jülich: Selbstverlag, 1994. S. 112-114 und S.65
- [HAUSLADEN 1997]
Hausladen, Gerhard. „Doppelfassaden - Energetische und Raumklimatische Auswirkungen“. Tagungsband ‚Doppelfassaden und Technische Gebäudeausrüstung‘ Hg. von dem Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. Bonn: Selbstverlag, 1997. S. 80-90
- [HARDY 1972]
XXXX
- [HEINRICH]
Heinrich, Bernd: The Hot-Blooded Insects, Harvard University Press
- [HENNINGS 2000]
Hennings, D. , Knissel, J.: Energieeffiziente Bürogebäude. Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH 2000
- [HENSCHEL 2000]
Henschel, J.R. und Seely M.K. 2000: First approximation of the ecophysio-

- gy of fog and dew - a tribute to Gideon Louw
[HENWOOD 1975]
Henwood, Kenneth: „A field tested thermoregulation model for two diurnal namib desert tenebrionid beetles“ *Ecologie* 56 (6) 1975, pp 1329-1342
- [HERTEL 1963]
Hertel, H.: *Struktur – Form - Bewegung, Biologie und Technik*. Mainz, Krauskopf-Verlag GmbH, 1963
- [HILL 1998]
Hill, B.: *Naturorientiertes Lernen, Eine Einführung in die Bionik für Lehrer*. Aachen, Shaker Verlag, 1998 [HILL 2001]
Hill, B.: *Bionik, Lernen von der Natur für die Technik*. Berlin, Verlag Franzbecker, 2001
- [HYDE 2000]
Hyde, R.: *Climate responsive design*. New York, E & FN Spon, 2000
- [INNENMINISTERIUM BW 2005]
Städtebauliche Klimafibel, 2005, Innenministerium Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem Amt für Umweltschutz Stuttgart
- [INTELLIGENTE ARCHITEKTUR 2001]
Intelligente Architektur 31, Zeitschrift für Architektur, Gebäudetechnik und Facility Management. Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, Nov./Dez. 2001
- [ISHAY & CROITORU, 1978]
- [ISHAY & BARENHOIZ-PANIRY, 1995]
- [KABISCH 1990]
Kabisch, Klaus „Wörterbuch der Herpetologie“, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1990
- [KINOSHITA 2002]
Kinoshita, Shuichi et al. “Photophysics of Structural Color in the Morpho Butterflies”
Forma, Vol 17. 2002
- [KLEISNY 2001]
Kleisny, H.: *Design in der Natur, Bionische Methoden als Chance für die Zukunft*. Libri Books on Demand, 2001
- [KEG 1984]
Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Hg. *Atlas über die Sonnen-*

- strahlung Europas. Köln, Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1984. S. 157.
- [KOOLMAN 2003]
Koolman, J., Roehm, K.H.: Color Atlas of Biochemistry, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York 2003
- [KORNADT 1997]
Kornadt, Oliver, und Güttler, Gerhard. „Energieverbrauch und CO₂-Emissionen eines Bürogebäudes und Untersuchung der Wirtschaftlichkeit bei Einsatz von Solarenergie“. Bauphysik 3 (1997): S. 74-75.
- [KÜPPERS 2002]
Küppers, U.; Tributsch, H.: Verpacktes Leben – Verpackte Technik, Bionik der Verpackung. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002
- [LANDESMUSEUM FÜR TECHNIK UND ARBEIT 1996]
Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim: Bionik, Zukunfts-Technik lernt von der Natur. Mannheim, Landesmuseum für Technik und Arbeit, 1996
- [LANG 2000]
Lang, W., Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Gebäude unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung der Solarenergie, Dissertation an der TU München, 2000
- [LEVI 1989]
Levi, C.: A remarkably strong natural glassy rod, Journal of Materials Science 8/1989 p. 337-339
- [LODISCH 1996]
Lodish, H., Baltimore, D., Berk, A., Zipursky, S.L., Matsudaira, P., Darnell, J.: Molekulare Zellbiologie, De Gruyter, Berlin-New York 1996,
- [LÖDEL 1997]
Lödel, Thomas. „Geprüft. Erfahrungsbericht über das Sol-Skin-Gebäude der Götz GmbH in Würzburg“. AIT Spezial. Intelligente Architektur 11, (1997): S. 76-79.
- [MATTHECK 1995]
Mattheck, C.: Design in der Natur, Der Baum als Lehrmeister. Freiburg im Breisgau,

- Rombach Verlag, 1995
- [MAX-PLANCK-INSTITUT 2005]
Max-Planck-Institut, An den Grenzen des Wissens, Geo Magazin Nr. 06/05
- [MOLLERUP 2001]
Mollerup, P.: Collapsibles. München, Stiebner Verlag GmbH, 2001
- [MC CLAIN 1985]
McClain, Elisabeth, Seely, Mary K., Hadley, Neil F., Gray, Vivian: „Wax Blooms in Tenebrionid beetles of the namib desert“ *Ecologie* 66(1) 1985, pp. 112-128
- [MPG 2005]
Max-Planck-Gesellschaft: Presseinformation 7.7.05
- [MÜLLER 1995]
Müller, Helmut F.O. „Einsatz und Erprobung holografisch-optischer Elemente für die Tageslichtlenkung“. Innovative Fassadentechnologie. Tagungsband des Workshop ‚Lichtlenkende Bauteile‘ und ‚Internationales Forum Innovative Fassadentechnologie. Hg. von dem Institut für Licht- und Bautechnik an der Fachhochschule Köln. Köln: Selbstverlag, 1995. S. 213.
- [NACHTIGALL 1986]
Nachtigall, W., Wisser, C.-M. und Wisser, A. (1986): Pflanzenbiomechanik. (Schwerpunkt Gräser), Konzepte SFB 230, Heft 24
- [NACHTIGALL 1996]
Nachtigall, W., Wisser, (1996): A.BIONA-report 10
- [NACHTIGALL 1997]
Nachtigall, W.: Vorbild Natur, Bionik - Design für funktionelles Gestalten. Berlin, Springer-Verlag, 1997
- [NACHTIGALL 1998]
Nachtigall, W.: Bionik, Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Berlin, Springer-Verlag, 1998
- [NACHTIGALL 2001]
Nachtigall, W. : Natur macht erfinderisch, Das große Buch der Bionik. München, Ravensburger Buchverlag Otto Maier GmbH, 2001

- [NACHTIGALL 2002]
Nachtigall, W.: Bionik, Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2. Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 2002
- [NACHTIGALL 2003 A]
Nachtigall, W.: Bau-Bionik, Natur-Analogien-Technik. Berlin, Springer-Verlag, 2003
- [NACHTIGALL 2003 B]
Nachtigall, W.; Wisser, A.: Biona report 16. Mainz, Akademie der Wissenschaften und der Literatur, 2003
- [NICOLSEN 1983]
Nicolsen, Susan W.: „Use of ventilated capsule and tritiated water to measure evaporative water losses in a Tenebrionid beetle“, Department of Zoology, University of Cape Town, August 1983, The Company of Biologists Limited 1984
- [NICOLSEN 1985]
Nicolsen, Susan W., Hanrahan, Shirley A. : “Diuresis in a desert beetle? Hormonal control of the Malpighian tubules of *Onymacris Plana*“, Journal of Comparative B., Department of Zoology, University of Cape Town, December, 1985
- [NICOLSEN 1990]
Nicolsen, Susan W.: “Diuresis or cleanance: Is there a physiological role for the “diuretic hormone” of the desert beetle *Onymacris*?“, Department of Zoology, University of Cape Town, December 1990, Pergamon Press
- [NIETHAMMER]
Niethammer, Jochen: Handbuch der Säugetiere Europas - Band 2 Robben
- [NOGATA 1997]
Nogata, Fumio, Innovative design concepts for materials can be learned from biological structures, Materials Technology, Vo.12,1997,104-106
- [NOGATA 1999 A]
Nogata, Fumio, Intelligent modelling mechanisms and design concepts of FGMs in natural composites, Materials Science Forum, Vols.308-311,1999,pp.331-337.
- [NOGATA 1999 B]
Nogata, Fumio, Chapter 2: Lessons from nature in Functionally Graded

Materials: Design, Processing and Applications, eds. Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin, A. Kawasaki, and R.G. Ford, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 7-27.

[NOGATA 2000]

Nogata, Fumio, Biological strain/stress sensing power in plants and modelling mechanisms, *Strain*, Vol. 36, 2000, pp. 3-8.

[NÜSSLE 1997]

Nüßle, Fritz. „Heizen und Kühlen mit abgehängten Decken“. *Deutsche Bauzeitschrift (DBZ)* 8 (1997): S. 105.

[PATURI 1974]

Paturi, F.R.: *Geniale Ingenieure der Natur*, Düsseldorf 1974.

[PFLUMM 1996]

Pflumm, Walter: *Biologie der Säugetiere*, Berlin: Parey, 1996, ISBN 3-8263-3140-0

[REIF 2001]

Reif, W.-E.; Dinkelacker, A.: Hydrodynamics of the squamation in fast swimming sharks. *Westfalia Separator AG, Separator's Digest* 1/2001

[ROEPER 2005]

Roepert, J.: *Physiologie-Vorlesung SS04/5, Membrantransport : Pumpen & Kanäle*

[ROER 1984]

Roer, Hubert: „Zur Lebensweise des Namibwüstenkäfers *Onymacris Plana*“, *Zoologisches Forschungsinstitut und Museum Alexander Koenig, Bonn* 1984

[ROSENZWEIG 2000]

Rosenzweig, Eyal: „Navigation Organs of the Oriental hornet, The Ocelli and Ciliated, Sensory Epithelium of the Head Micromorphology, function and homeostasis“, *Doktorarbeit an der Reichsuniversität Groningen, Groningen* 2000, ISBN 90-367-1183-5

[RWE 1998]

RWE Energie AG, Hg. *RWE Energie, Bau-Handbuch*. 12. Aufl. Heidelberg, Energie Verlag GmbH, 1998. S. 16/6,

[SCHÄFER 1982]

Schäfer, Jochen Peter. „Das Klima ausgewählter Standorte der BRD, München“.

- Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 159, Offenbach/Main, Selbstverlag, 1982.
- [SCHÄFER]
Schäfer, Lutz. „Dissertation“, Dissertation, Universität Berlin, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 159, Offenbach/Main, Selbstverlag, 1982.
- [SCHULER 1996]
Schuler, Mathias. „Energiegewinnung durch Glasfassade?“ Bauwelt 43/44 (1996): S.2462.
- [SCHMITZ 1994]
Schmitz, H., Tributsch, H.: Verhandlungen der deutschen Zoologischen Gesellschaft, 87. Jahresversammlung 1994 Jena, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, S.112
- [SCHWAB 1993]
Schwab, Armin. Wärmeübertragung bei Mischkonvektion in luftdurchströmten Fassaden. Dissertation, TU München, 1993.
- [SCHWARZ 1995]
Schwarz, Uwe. „Doppelfassade - architektonisches Stilelement oder technisch-wirtschaftlich vorteilhafte Lösung“. Fassade 4 (1995): S. 21-32.
- [SFB 230 1986]
Mineralabscheidung in der Natur und im Experiment, Konzepte SFB 230 Heft 12, März 1986
- [SHERWOOD ROMER]
Sherwood Romer, Alfred/Parsons, Thomas S. : Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, Hamburg-Berlin, 1983, ISBN 3-490-21718-7
- [SHIMONY & ISHAY, 1984]
- [SINGER & NICOLSON 1972]
- [STARK 1982]
Stark, Dietrich: The vertebrate body - Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, - Band 1./3., Springer Verlag, 1982, ISBN 0-387-11268-5/ISBN 3-540-11268-5
- [STARK 2003]
Stark, Th., Untersuchung zur aktiven Nutzung erneuerbarer Energie am Beispiel eines Wohn- und eines Bürogebäudes, Dissertation an der Universität

- Stuttgart,
Fraunhofer IRB Verlag 2003, ISBN 3-8167-6479-7
- [STEVENS 1988]
Stevens, P.S.: Formen in der Natur. München, R. Oldenbourg Verlag, 1988
- [STRAßMANN 2005]
Straßmann, Burkhardt: Kleben wie der Gecko, Die Zeit-Wissen, Hamburg,
Ausgabe 49/2005
- [TENNEKES 1997]
Tennekes, H.: Kolibris und Jumbo-Jets, Die simple Kunst des Fliegens. Berlin, Birkhäuser Verlag AG, 1997 Birkhäuser Verlag AG, 1997
- [THE COMPANY OF BIOLOGISTS 2006]
The Company of Biologists: Dynamics of geckos running vertically, The Journal of Experimental Biology 209, 260-272, November 2005
- [THIEL 1995]
Thiel, Dieter. „Doppelfassade - ein Bestandteil energetisch optimierter und emissionsarmer Bürogebäude“. Innovative Fassadentechnologie. Tagungsband des Workshop ‚Lichtlenkende Bauteile‘ und ‚Internationales Forum Innovative Fassadentechnologie. Hg. von dem Institut für Licht- und Bautechnik an der Fachhochschule Köln. Selbstverlag, 1995. S. 13-37.
- [VINCENT 1990]
Vincent, J.F.V.: Structural biomaterials, Princeton 1990.
- [VON GLEICH 2001]
Von Gleich, A.: Bionik, Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur ? Stuttgart,
B.G. Teubner GmbH, 2001
- [VUKUSIC 2000 A]
Vukusic, Pete et al. "Optical Classification of Microstructure in Butterfly Wing-Scales". Photonics Science News, Vol 6. 2000
- [VUKUSIC 2000 B]
Vukusic, Pete "Colour mixing in wing scales of a butterfly". Nature, 30 März 2000
- [VUKUSIC 2001]

- Vukusic, Pete et al. „Now you see it—now you don't". Nature, 1 März 2001
[VUKUSIC 2003]
- Vukusic, Pete und Sambles, Roy "Photonic Structures in Biology". Nature, 14 August 2003
- [WAGNER 1994]
- Wagner, Andreas. „Klimatische Parameter und ihre Bedeutung für die Planung".
Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden. Seminarbericht des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme, Freiburg: Selbstverlag, 1994, S. 7-8
- [WANDREY 1997]
- Wandrey, Rüdiger: Die Wale und Robben der Welt, S.170-249, Kosmos Naturführer, 1997, ISBN 3-440-07047-6
- [WEAVER & MORSE 2003]
- Weaver, J.C., Morse, D.: Molecular Biology of Demosponge Axial Filaments and Their Roles in Biosilification, MICROSCOPY RESEARCH & TECHNIQUE 62/356-367 (2003)
- [WILLIS 1997]
- Willis, D.: Der Delphin im Schiffsbug – Wie Natur die Technik inspiriert. Basel 1997.
- [WÖSS 2004]
- Wöß, A.: Cellular Solids beyond the Apparent Density, Advanced Engineering Materials 2004, Vol. 6
- [WOLFF 1892]
- Wolff, J.: Die Gesetze der Transformation der Knochen.
- [WWF 1991]
- World Wide Fund for Nature : Bionik, Patente der Natur. München, Pro Futura, Verlag, 1991
- [YEANG 2001]
- Yeang, K.: Designing with Nature, The Ecological Basis for Architectural Design.
Oldenburg, Isensee Verlag, 2001
- [YOSHIDA 2002]
- Yoshida, Akihiro "Antireflection of the Butterfly and Moth Wings through Microstructure" Forma, Vol 17. 2002

[ZERBST 1987]

Zerbst, E.W. : Bionik, Biologische Funktionsprinzipien und ihre technischen Anwendungen. Stuttgart, B.G. Teubner, 1987

[ZHONG-ZE 2003]

Zhong-Ze Gu et al. „Structural Color and the Lotus Effect“. Angewandte Chemie, International Edition, Vol. 42. 2003

[ZIMNIOK 1984]

Zimniok: Tintenfische, Landbuchverlag, 1984

[ZÜRCHER 1998]

Zürcher, Christoph, und Frank, Thomas. Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis. Stuttgart, B.G. Teubner Verlag, 1998. S. 15.

Richtlinien und Verordnungen:

Arbeitsstättenrichtlinien ASR 7/3

Arbeitsstättenverordnung §5 - Lüftung, sowie Arbeitsstättenrichtlinien § 5, Abschnitt 3, Freie Lüftung. Filderstadt, Weinmann, 1988.

VDI-Richtlinien (2078)

ENEV 2007

VDI 2067

Verordnung über einen wirksamen Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung), Bundesgesetzblatt. Jahrgang 1994 Teil 1 55 (1994).

Teil 1 - Einleitung

- Abb. 3.0.1: Die Schnittstelle Bionik in der technisch biologischen Vorgehensweise, vom Autor erstellt
- Abb. 3.2.1: Die Schnittstelle Bionik in der technischen Vorgehensweise, vom Autor erstellt

Teil 2 - Anforderungen

- Abb. 0.0.1: Wechselbeziehung von Nutzungsanforderungen und witterungsbedingten Einflüssen und dem Energieverbrauch, vom Autor erstellt
- Abb. 1.5.1: Unterschiedliche Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz
- Abb. 3.2.1: Durchschnittliche interne Wärmegewinne nach VDI 2067
- Abb. 4.0.1: Subsysteme im Gebäude, vom Autor erstellt
- Abb. 4.0.2: Abhängigkeiten der Subsysteme untereinander, vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.1: Diagrammatische Darstellung eines Anforderungskataloges moderner Gebäudehüllen, vom Autor erstellt
- Abb. 5.0.1: Tabellarische Darstellung energetischer, sicherheitstechnischer und betriebstechnischer Anforderungen an eine Hüllstruktur, vom Autor erstellt
- Abb. 5.3.1: Tabellarische Darstellung der Komponentenkohärenten Eigenschaften, vom Autor erstellt
- Abb. 5.3.2: Tabellarische Darstellung unterschiedlicher Diagramme für verschiedene Leistungsbereiche, vom Autor erstellt
- Abb. 5.4.1: Schematische Darstellung der kohärenter und inkohärenter Komponenten, vom Autor erstellt
- Abb. 5.4.2: Diagrammatische Darstellung einer Bionisch inspirierten gaspermeablen Hüllstruktur in der Draufsicht, vom Autor erstellt
- Abb. 5.4.3: Perspektivische Darstellung einer Bionisch inspirierten adaptiven und gaspermeablen Hüllstruktur, vom Autor erstellt

Teil 3 - Ansätze für Bionisch inspirierte Gebäudehüllen

- Abb. 1.0.1: Tabellarische Darstellung der Grundrecherche nach natürlichen Materialien, Strukturen und Funktionen, vom Autor erstellt
- Abb. 1.0.2: Tabellarische Darstellung der ersten Selektion unterteilt nach den Kategorien Material, Struktur und Funktion, vom Autor erstellt
- Abb. 1.0.3: Tabellarische Darstellung im Teil 3 untersuchten Phänomene unterteilt nach den Kategorien Material, Struktur und Funktion, vom Autor erstellt
- Abb. 1.1.1: Tabellarische Darstellung der Selektionsschritte unterteilt in die Kategorien Material, Struktur und Funktion, vom Autor erstellt
- Abb. 1.1.2: Diagrammatische Darstellung der Kategorien Material, Struktur und Funktion und ihre Schnittstellenbereiche, vom Autor erstellt
- Abb. 2.0.1: Selektionsdiagramm in drei Kategorien Material, Struktur und Funktion, vom Autor erstellt
- Abb. 2.1.1: Querschnitt durch die Wandung eines Bambus, Pflanzenbiomechanik (Schwerpunkt Gräser), Konzepte SFB 230, Heft 24
- Abb. 2.1.2: Biologische Klassifizierung des Bambus, vom Autor erstellt
- Abb. 2.1.3: Physikalische Kennwerte einiger Faserverbundwerkstoffe, Pflanzenbiomechanik (Schwerpunkt Gräser), Konzepte SFB 230, Heft 24
- Abb. 2.1.4: Schlankheitsquotienten von Pflanzen, W. Nachtigall, Baubionik, 2003
- Abb. 2.1.5: Gewebeverteilung bei Hohlgräsern, Pflanzenbiomechanik (Schwerpunkt Gräser), Konzepte SFB 230, Heft 24
- Abb. 2.1.6: Einfluss der Anordnung des Skelerenchyms am axialen Flächenträgheitsmoment
- Abb. 2.1.7: Querschnitt durch die Wandung eines Bambus und diagrammatische Darstellung der Gefäßbündel a und b, vom Autor mit Unterstützung von Richard Barth erstellt
- Abb. 2.1.8: Diagramm zur Erzeugung biologisch elektrischer Signale, vom Autor mit Unterstützung von Moritz Kofler erstellt
- Abb. 2.1.9: Versuchsanordnung zur Messung mechanischer Stimulation, vom

- Autor mit Unterstützung von Moritz Kofler erstellt
- Abb. 2.1.10: Funktionale Gegenüberstellung von Halm und Turm, Pflanzenbiomechanik (Schwerpunkt Gräser), Konzepte SFB 230, Heft 24
- Abb. 2.1.11: Diagrammatische Zeichnerische Gegenüberstellung im Querschnitt und Grundriss, vom Autor mit Unterstützung von Moritz Kofler erstellt
- Abb. 2.1.12: Schematischer Aufbau der Druckmanschette, vom Autor mit Unterstützung von Moritz Kofler erstellt
- Abb. 2.1.13: Versuchsmodell und diagrammatische Darstellung der lokalen Verformung, vom Autor mit Unterstützung von Moritz Kofler erstellt
- Abb. 2.1.14: Visualisierungsmodell einer Bambus affinen adaptiven Tragstruktur, vom Autor mit Unterstützung von Moritz Kofler und Richard Barth erstellt
- Abb. 2.2.1: Gewellte Perlmutteroberfläche durch Schichten aus ungeordneten Molekülen, www.sciencephoto.com
- Abb. 2.2.2: Biologische Klassifizierung des Bambus, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 2.2.3: Übersichtsaufstellung der Klassen des Stammes *Mollusca*, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 2.2.4: REM-Aufnahmen der Perlmutterstruktur in der Perspektive, www.sciencephoto.com
- Abb. 2.2.5: REM-Aufnahmen der Perlmutterstruktur in der Schnittansicht, www.sciencephoto.com
- Abb. 2.2.6: Fortlaufende Spannungs-Dehnungskurven an der Perlmutter-schicht einer Meerohrschale, www.sciencephoto.com
- Abb. 2.2.7: Vergrößerter Teilausschnitt
- Abb. 2.2.8: Diagrammatische Darstellung der Spannungsverläufe verschiedener Materialien, vom Autor erstellt
- Abb. 2.2.9: Darstellung des E-Moduls und der zulässigen Zugspannung verschiedener Materialien, vom Autor erstellt
- Abb. 2.2.10: Visualisierungsmodell der Perlmutterarchitektur in zwei Größen, vom Autor mit Unterstützung von Angelos Tsigotis erstellt
- Abb. 2.2.11: REM-Aufnahmen des künstlichen Perlmutter, www.sciencephoto.com
- Abb. 2.3.1: Glasschwammstruktur, Aufbau eines Stranges, Max Planck Ge-

- sellschaft, Presseinformation, 07. Juli 2005: Biologischer Glaskäfig aus der Tiefsee, Autor: Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
- Abb. 2.3.2: Biologische Klassifizierung des Glasschwamms, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 2.3.3: Skelett zweier *euplectella aspergillum* nebeneinander, Skelett des *euplectella aspergillum*, University of Aberdeen, Museum of zoology, Autor: Martyn L. Gorman
- Abb. 2.3.4: Skelettausschnitt des *euplectella aspergillum*, Max Planck Gesellschaft
- Abb. 2.3.5: Bruchstelle einer Faser, Aizenberg: Skeleton of Euplectella, Science Vol. 309
- Abb. 2.3.6: REM: Konzentrische Schichten 5 μm , Aizenberg: Skeleton of Euplectella, Science Vol. 309
- Abb. 2.3.7: REM-Aufnahme: Faser-Verbund-Struktur der Stränge; 20 μm , Euplectella, Science Vol. 309
- Abb.2.3.8: REM-Aufnahme: Knotenpunkte der Gitterstruktur; 100 μm , Euplectella, Science Vol. 309
- Abb. 2.3.9: REM-Aufnahme: Aufbau eines Stranges aus unterschiedlich grossen Fasern; 50 μm , Euplectella, Science Vol. 309
- Abb. 2.3.10: Schnitt durch einen Strang, Max Planck Gesellschaft, Presseinformation, 07. Juli 2005: Biologischer Glaskäfig aus der Tiefsee, Autor: Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
- Abb. 2.3.11: Schematisches Diagramm der zylindrische Gitterstruktur, vom Autor erstellt
- Abb. 2.3.12: Detail der Gitterstruktur, Lage der Diagonalen, 3 mm, Lage der Diagonalen, 3 mm, Max Planck Gesellschaft, Presseinformation 07. Juli 2005: Biologischer Glaskäfig aus der Tiefsee, Autor: UCSB (University of California at Santa Barbara)
- Abb. 2.3.13: Diagrammatische Darstellung des Spannungsverlaufes eines Siliziumstäbchens und einer Biogenen Glasfaser, Max Planck Gesellschaft, Presseinformation, 07. Juli 2005: Biologischer Glaskäfig aus der Tiefsee, Autor: Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung

- Abb. 2.3.14: 3-Punkt Bruchversuch (Abstand zwischen den Auflagerpunkten = 30 mm), vom Autor erstellt
- Abb. 2.4.1: REM-Aufnahme eines Resilinknotens in einem Libellenflügel 2 μm , www.csiro.au
- Abb. 2.4.2: Biologische Klassifizierung, vom Autor erstellt
- Abb. 2.4.3: Nahaufnahme des Aderengerüsts eines Libellenflügels, www.csiro.au
- Abb. 2.4.4: Libelle, www.biologie.at
- Abb. 2.4.5: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Resilinknoten im Aderengeflecht eines Libellenflügels, www.csiro.au
- Abb. 2.4.6: REM Aufnahme einer starren Verbindung (rechts) und einer flexiblen Verbindung (links), www.csiro.au
- Abb. 2.4.7: Libellenflügel mit Resilinknotenachse, www.csiro.au
- Abb. 2.4.8: Libelle im „Windkanal“: Anpassung der Flügel an aerodynamische Kräfte, www.csiro.au
- Abb. 2.4.9: Synthetischer Resilin-Strang, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), St. Lucia, Australien
- Abb. 2.4.10: Synthetisches Resilin aus dem Labor CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), St. Lucia, Australien
- Abb. 3.0.1: Selektionsdiagramm in drei Kategorien Material, Struktur und Funktion, vom Autor erstellt
- Abb. 3.1.1: Lamellenstruktur der Schuppe eines Schmetterlingflügels, Universität Hamburg
- Abb. 3.1.2: Biologische Klassifizierung des Schmetterlings, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 3.1.3: Schmetterlingflügel, www.gettyimages.de
- Abb. 3.1.4: Blue Morpho Schmetterling, www.corvi.com
- Abb. 3.1.5: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps I in der Übersicht, University of Exeter, School of physics, Research, Natural Photonics
- Abb. 3.1.6: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps I als Querschnitt mit den „Christbaumstrukturen“, University of Exeter, School of physics, Research, Natural Photonics

- Abb. 3.1.7: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps II in der Übersicht, University of Exeter, School of physics, Research, Natural Photonics
- Abb. 3.1.8: Zeichnerische Darstellung des Schuppentyps III in der Übersicht, University of Exeter, School of physics, Research, Natural Photonics
- Abb. 3.1.9: 3D-Modell einer einlagigen Kristallstruktur, erstellt vom Autor mit Unterstützung von Hugo Cabrera
- Abb. 3.1.10: 3D-Modell bei überlagernden Layern zu einer Hohlraummatrixstruktur, erstellt vom Autor mit Unterstützung von Hugo Cabrera
- Abb. 3.1.11: Photonische Kristallstrukturen des Schuppentypes III, Vukusic, Pete und Sambles, Roy: "Photonic Structures in Biology"
- Abb. 3.1.12: 3D-Modell einer Photonischen Hohlraummatrix, erstellt vom Autor mit Unterstützung von Hugo Cabrera
- Abb. 3.1.13: 3D-Darstellung eines konventionellen Vakuumröhrenkollektors und seiner einzelnen Bestandteile, vom Autor erstellt
- Abb. 3.1.14: 3D-Darstellung zweier Vakuumröhrenkollektoren in komplettierten Zustand, vom Autor erstellt
- Abb. 3.1.15: 3D-Darstellung einer konventionellen und einer optimierten Reflektorfläche, vom Autor erstellt
- Abb. 3.1.16: 3D-Detaildarstellung einer optimierten Reflektorfläche nach dem Vorbild des Schuppentyps I, vom Autor erstellt
- Abb. 3.1.17: 3D-Darstellung mehrerer optimierter Reflektorfläche in der Abfolgung, vom Autor erstellt
- Abb. 3.2.1: Panzeroberfläche eines Rosenkäfers, „Fit for future“ Focus-Wettbewerb: Strukturen bei Käfern, Mörike Gymnasium, Esslingen
- Abb. 3.2.2: Biologische Klassifizierung des Rosenkäfer, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 3.2.3: REM-Aufnahme eines Kongo Rosenkäfers, „Fit for future“ Focus-Wettbewerb: Strukturen bei Käfern, Mörike Gymnasium, Esslingen
- Abb. 3.2.4: Kongo-Rosenkäfer (*pachnoda marginata*), www.lurche-kerfe.de/images/Pachnoda-2.jpg
- Abb. 3.2.5: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Goliathrosenkäfers

- (Wachsbeschichtete Oberfläche), „Fit for future“ Focus-Wettbewerb: Strukturen bei Käfern, Mörike Gymnasium, Esslingen
- Abb. 3.2.6: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Asiatischen Rosenkäfers (Schuppenstruktur), „Fit for future“ Focus-Wettbewerb: Strukturen bei Käfern, Mörike Gymnasium, Esslingen
- Abb. 3.2.7: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Kongo Rosenkäfers (Stippenstruktur mit Härchenstruktur), „Fit for future“ Focus-Wettbewerb: Strukturen bei Käfern, Mörike Gymnasium, Esslingen
- Abb. 3.2.8: REM-Aufnahme der Panzeroberfläche eines Rosenkäfers (Härchenstruktur), „Fit for future“ Focus-Wettbewerb: Strukturen bei Käfern, Mörike Gymnasium, Esslingen
- Abb. 3.2.9: Skizzenhafte Visualisierung der Panzerstruktur des Rosenkäfers, vom Autor mit Unterstützung vom Maïke Buttler erstellt
- Abb. 3.2.10: Skizzenhafte Visualisierung der Panzerstruktur des Rosenkäfers, vom Autor mit Unterstützung vom Maïke Buttler erstellt
- Abb. 3.2.11: Skizzenhafte Visualisierung der Wirkungsweise der Panzerstruktur des Rosenkäfers, vom Autor mit Unterstützung vom Maïke Buttler erstellt
- Abb. 3.3.1: Geschuppte Sandfischhaut, www.sciencephoto.com
- Abb. 3.3.2: Biologische Klassifizierung des Sandfisch, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 3.3.3: Glänzende Haut des Sandfisches, TU-Berlin
- Abb. 3.3.4: Eingetrübte Oberfläche einer Blechdose im Sand (nach 20 Minuten leichter Sandbrise), TU-Berlin
- Abb. 3.3.5: REM-Aufnahme der Sandskinkhaut am Bauch (oben) und Rücken (unten) in unterschiedlichen Maßstäben, TU-Berlin
- Abb. 3.3.7: Alternative Reibungsmessung mit einem sandgefüllten Gleitzylinder, Rechenberg, I. und El Khyari A. R.
- Abb. 3.3.8: Abriebversuch am Sandfischrücken, die Nadelspitze weist auf den Aufprallpunkt, Rechenberg, I. und El Khyari A. R.: Reibung und Verschleiß am Sandfisch der Sahara, Bericht zum begleitenden Forschungsvorhaben im Rahmen des Festo-Stipendiums für El Khyari A.R., 2004

- Abb. 3.3.9: Abriebflecke auf technischer Oberfläche a) Stahlplatte b) Glasplatte, Rechenberg, I. und El Khyari A. R.
- Abb. 3.3.10: Sandskinshaut vor/nach dem Test im Lichtmikroskop bei etwa 1000-facher Vergrößerung, Rechenberg, I. und El Khyari A. R.: Der Sandskin der Sahara - Vorbild für Reibungs- und Verschleißminderung, TU-Berlin, 2005
- Abb. 3.3.11: Skizzenhafte Visualisierung der Sandfischhaut *scincus scincus*, vom Autor mit Unterstützung vom Maike Buttler erstellt
- Abb. 3.3.12: Skizzenhafte Visualisierung der Sandfischhaut *scincus scincus*, vom Autor mit Unterstützung vom Maike Buttler erstellt
- Abb. 3.3.13: Skizzenhafte Visualisierung der Sandfischhaut *scincus scincus*, vom Autor mit Unterstützung vom Maike Buttler erstellt
- Abb. 3.4.1: Oberflächenstruktur des Schlangensterns (Armplatte), www.zoldmagazin.com
- Abb. 3.4.2: Biologische Klassifizierung des Schlangensterns, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 3.4.3: Nahaufnahme der rückseitigen Armplatte des *ophiocomma wendtii*, <http://dcmp.bc.edu/images/fig1.jpg>
- Abb. 3.4.4: *Ophiocomma Wendtii*, Susan Hottenrott, http://home.att.net/~ophiuroid/assets/images/db_images/db_ophiocomma_wendti.jpg
- Abb. 3.4.5: Tag- und Nachtfärbung des *Ophiocomma Wendtii*, Joanna Aizenberg, Bell Laboratories/Lucent Technologies
- Abb. 3.4.6: Kalzitstruktur, www.rsc.org/ej/JM/2004/b402558j.pdf
- Abb. 3.4.7: Sphärische Aberration und perfekte Lichtlenkung durch Parabelform, vom Autor erstellt
- Abb. 3.4.8: Darstellung der Doppellinsen im Schnitt und als diagrammatische Zeichnung, vom Autor erstellt
- Abb. 3.4.9: Diagrammatische Zeichnung des deaktivierten und aktivierten Sonnenschutzes, vom Autor erstellt
- Abb. 3.4.10: Diagrammatische Zeichnung einer autosensitiven Verschattungsstruktur, vom Autor erstellt
- Abb. 3.4.11: Modellausschnitt einer autosensitiven Verschattungsstruktur im Überblick, vom Autor mit Unterstützung von Mark Kaul und Petar

- Bejic erstellt
- Abb. 3.4.12: Modellausschnitt einer autosensitiven Verschattungsstruktur im Detail, vom Autor mit Unterstützung von Mark Kaul und Petar Bejic erstellt
- Abb. 3.5.1: Setae-Struktur an den Geckozehen, www.sciencephoto.com
- Abb. 3.5.2: Biologische Klassifizierung des Geckos, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 3.5.3: Insekten- und Amphibienarten im Vergleich zu ihren Haftstrategien, www.lclarck.edu
- Abb. 3.5.4: Lamellenstruktur einer Geckozehe, www.lclarck.edu
- Abb. 3.5.5: Gecko, www.naturfotografen-forum.de, Juni 2006
- Abb. 3.5.6: Lamellenstruktur der Setae, www.pnas.org, Juni 2006; Evidence for self-cleaning in gecko setae, Fig. 1c
- Abb. 3.5.7: Spatelförmige Spatulaeenden, www.pnas.org, Juni 2006, Evidence for self-cleaning in gecko setae, Fig. 1e
- Abb. 3.5.8: Spatulae freistehend, www.mpg.de, 2004, Max-Planck-gesellschaft, Tätigkeitsbericht 2004, Abb 2, MPI für Metallforschung
- Abb. 3.5.9: Spatulae in Kontakt, www.mpg.de, 2004, Max-Planck-Gesellschaft, Tätigkeitsbericht 2004, Abb.1, MPI für Metallforschung
- Abb. 3.5.10: Geckofüße mit Schmutzpartikeln, www.pnas.org; Juni 2006; Evidence for self-cleaning in gecko setae; Fig. 4a
- Abb. 3.5.11: Geckofüße ohne Schmutzpartikel, www.pnas.org; Juni 2006; Evidence for self-cleaning in gecko setae; Fig. 4b
- Abb. 3.5.12: VSG- und GeckoTape Scheibe, vom Autor mit Unterstützung von Tanja Arnold erstellt
- Abb. 3.5.13: Glasscheibe und GeckoTape Setae, vom Autor mit Unterstützung von Tanja Arnold erstellt
- Abb. 3.5.14: 3D-Modell Visualisierung einer Setae Anhäufung von oben, vom Autor mit Unterstützung von Tanja Arnold erstellt
- Abb. 3.5.15: Künstlich hergestellte Setae, www.andrew.cmu.edu
- Abb. 3.5.16: Gecko-Tape, www.hero.ac.uk
- Abb. 3.6.1: Schmeißfliege (*calliphoridae*), Nachtigall und Blücher: „Das Große Buch der Bionik“
- Abb. 3.6.2: Biologische Klassifizierung der Schmeißfliege, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.3: Ansammlung mehrerer Schmeißfliegeneier, Nachtigall und Blü-

- cher: „Das Große Buch der Bionik“
- Abb. 3.6.4: Oberflächenstruktur einer aufgebrochenen Eischale, Nachtigall und Blücher: „Das Große Buch der Bionik“
- Abb. 3.6.5: Aufgebrochene Schmeissfliegeneischale, Nachtigall und Blücher: „Das Große Buch der Bionik“
- Abb. 3.6.6: Schmeissfliegeneischale im Detail, Nachtigall und Blücher: „Das Große Buch der Bionik“
- Abb. 3.6.7: Schmeissfliegeneischale, Nachtigall und Blücher: „Das Große Buch der Bionik“
- Abb. 3.6.8: Schmeissfliegeneischale als Nahaufnahme, Nachtigall und Blücher: „Das Große Buch der Bionik“
- Abb. 3.6.9: Modellstudie, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.10: Modellstudie als Nahaufnahme, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.11: Versuchsmodellstudie als Nahaufnahme, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.12: Versuchsmodellstudie in der Übersicht, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.13: Systematischer Aufbau des Versuchsmodells, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.14: Darstellung der Funktionsweisen einer exemplarischen Dezentralen Flächenlüftung, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.15: Schematische Übersicht, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.16: Innenansicht des struktureller Aufbaus der Fliegeneischale, vom Autor erstellt
- Abb. 3.6.17: Wasserabweisende, geschlitzte, eckige Struktur der Oberfläche, Öffnungsgröße ca. 5 μm , vom Autor erstellt
- Abb. 4.0.1: Selektionsdiagramm in drei Kategorien Material, Struktur und Funktion, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.1: Orientalische Hornisse (*Vespa orientalis*), www.vespa-crabro.de/images/hornisse.jpg
- Abb. 4.1.2: Biologische Klassifizierung der Hornisse, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.3: Horizontalschnitt durch einen Porenkanal, www.ub.rug.nl/eldoc/dis/medicine/e.rosenzweig/c3.pdf, Seite 57
- Abb. 4.1.4: Diagrammatische Darstellung des Luft- und Stromkreislaufes der Hornissenhaut, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.5: Funktionsbelegung der braunen und gelben Streifen, Struktur der

- gelben Streifen, www.ub.rug.nl/eldoc/dis/medicine/e.rosenzweig/c2.pdf, Seite 25
- Abb. 4.1.6: Schnitt durch einen Porenkanal, Epikutikula [1], Exokutikula [2], Endokutikula [3,4], Gelbe Pigmente [5] im Porenkanal [6], Photorezeptor [12], www.ub.rug.nl/eldoc/dis/medicine/e.rosenzweig/c2.pdf, Seite 34
- Abb. 4.1.7: Vergrößerung einer Trachealöffnung, Porenkanal [1], Umhüllung des Photorezeptors [2], www.ub.rug.nl/eldoc/dis/medicine/e.rosenzweig/c2.pdf, Seite 28
- Abb. 4.1.8: Spektralfarben mit Angabe des Energiegehaltes, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.9: Skizzenhafte Visualisierung einer Thermoelektrischen Beschichtung nach dem Vorbild der Hornissenhaut, 1 Obere Schicht, 2 Mittlere Schicht, 3 Untere Schicht, 4 Photorezeptorzelle, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.10: Skizzenhafte Visualisierung einer Thermoelektrischen Beschichtung nach dem Vorbild der Hornissenhaut, 1 Porenkanal, 2 Äußere Schutzschicht, 3 Kathodisch wirkende Einzelschichten, 4 Untere Tragschicht, 5 Basismembran und Untere Schutzschicht, 6 Luftdurchströmte Bereiche, 7 Photorezeptorzelle, 8 Anodisch wirkende Zwischenschicht, vom Autor erstellt
- Abb. 4.2.1: Grünalgen, www.sciencephoto.com/search/searchLogic.html
- Abb. 4.2.2: Biologische Klassifizierung der Grünalge, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 4.2.3: Chlorophyll, www.wikipedia.org/wiki/Bild:Pediastrum_duplex.jpg, Dr. Ralf Wagner
- Abb. 4.2.4: Grünalge, www.psteinmann.net/bilder_plankton/Spirogyramatte3.jpg
- Abb. 4.2.5: Purpurbakterien, www.iwf.de/iwf/do/mkat/wmv.aspx?LEGACYGUID=02000011500110000000&Multiple=False, IWF (Göttingen)
- Abb. 4.2.6: Grünalge, commons.wikimedia.org/wiki/Image:Crucigenia.jpg, Environmental Protection Agency
- Abb. 4.2.7: Leistungsvergleich der Wasserstoffproduktion einer normalen und einer manipulierten Grünalge, vom Autor erstellt

- Abb. 4.2.8: Funktionsablauf einer Fassadenintegrierten Wasserstoffproduktion, vom Autor erstellt
- Abb. 4.2.9: Funktionsschema einer Brennstoffzelle, www.solarserver.de/lexikon/images/brennstoffzelle.gif, Der Solarserver
- Abb. 4.2.10: Brennstoffzellenstapel (Stacks), www.initiative-brennstoffzelle.de/ibz/live/nachrichten/pspic/bild/91/ballardgro45005407b4f71.jpg, Initiative Brennstoffzelle
- Abb. 4.2.11: Algenreaktor im Testlabor, www.sciencephoto.com
- Abb. 4.2.12: Nahaufnahme des Testmodells, vom Autor erstellt
- Abb. 4.2.13: Neigungswinkel der Lamellen, vom Autor erstellt
- Abb. 4.2.14: Zeichnerische Darstellung eines Fassadenelementes zur photobiologischen Produktion von Wasserstoff, vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.1: Verschiedene Froschhäute in unterschiedlichen Tages- und Jahreszeitsituationen, www.sciencephoto.com
- Abb. 4.3.2: Biologische Klassifizierung der Kopffüßer, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.3: Iguana, www.norman.walsh.name/2004/05/07/images/20040506-193014.jpg, Norman Walsh
- Abb. 4.3.4: Kopffüßer, www.meerwasserlexikon.de/kopffuesser/1082342164-1.jpg
- Abb. 4.3.5: Scholle (Chromatophoren über Nervensignale gesteuert), www.jassesnee.de/blog/wp-images/2006/04_06_scholle.jpg
- Abb. 4.3.6: Soldatenfisch (Farbwechsel je nach Licht/Stimmung), www.tau-cher.net/edb/edb_npics/2006-09-02.1157225907.jpg
- Abb. 4.3.7: Farbzellaufbau bei einem Leguan, <http://www.terra-rva.de/krankheiten/merkmalederreptilien.html>
- Abb. 4.3.8: Farbzellaufbau, <http://tolweb.org/tree/eukaryotes/animals/mollusca/cephalopoda/glossary/Glossary.html>
- Abb. 4.3.9: Fassadenelemente trüben graduell vom Rahmenbereich in die Mitte des Elementes ein, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.10: Versuchsmodell eines farbgefüllten Tanks mit angeschlossenen Kapillarröhrchen, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt

- Abb. 4.3.11: Typ 2 Modell im Montagezustand, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.12: Typ 2 Modell kurz vor der Befüllung, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.13: Eckmetallrohre Typ 2 Modell, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.14: Typ 2 Modell 6 Stunden nach der Befüllung, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.15: Schlauchmodell Typ 1, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.16: Schlauchmodell Typ 2 direkt nach der Befüllung mit Benzin und destilliertem Wasser, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.17: Modellausschnitt mit Teilbefüllung, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.18: Schlauchanordnung in der Nahaufnahme, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.19: Lamellen verfärben sich und spenden Schatten, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.20: Pixelstudie mit 2, 5, 18, 72 Pixel pro cm², vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.3.21: 50% Flächendeckung (50% Schwarz, 50% Durchsicht) unterschiedliche Pixelierungen, vom Autor mit Unterstützung von Michael Stradinger und Georg Türk erstellt
- Abb. 4.4.1: Nahaufnahme einer Froschhautoberfläche, Heldmeier, Neuweiler, Vergleichende Tierphysiologie
- Abb. 4.4.2: Biologische Klassifizierung der Froschlurche, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 4.4.3: Froschhaut (*Trichobatrachus robustus*), www.wissenschaft-online.de
- Abb. 4.4.4: Frosch (*agalychnis callydrias*), www.froschnetz.de
- Abb. 4.4.5: Anteile der Atmungssysteme, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 4.4.6: Zeichnerische Darstellung verschiedener Atmungsarten bei Amphibien im Vergleich zum Mensch, Heldmeier, Neuweiler, Vergleich-

- chende Tierphysiologie
- Abb. 4.4.7: Systeme des Gasaustausches, Systeme des Gasaustausches, Heldmeier, Neuweiler, Vergleichende Tierphysiologie
- Abb. 4.4.8: Jahreszeitliche Froschatmung, www.livingunderworld.org/biology/images/frog_arterial_system
- Abb. 4.4.9: Zeichnerische Darstellung durch eine Froschhaut im Schnitt, www.hla.wiener-neustadt.at
- Abb. 4.4.10: Atmungssystem Ansicht, Heldmeier, Neuweiler, Vergleichende Tierphysiologie
- Abb. 4.4.11: Atmungssystem Aufsicht, faculty.clintoncc.suny.edu
- Abb. 4.4.12: Exemplarische Visualisierung einer Dezentralen Flächenlüftung mit Wärmetauscher, links Innenansicht, rechts Außenansicht, vom Autor erstellt
- Abb. 4.4.13: Darstellung der Funktionsweisen einer exemplarischen Dezentralen Flächenlüftung, vom Autor erstellt
- Abb. 4.5.1: Schematische Schnittdarstellung einer Plasmamembran, Heldmeier, Neuweiler, Vergleichende Tierphysiologie
- Abb. 4.5.2: Membranstruktur einer Plasmamembran, www.med.uni-jena.de/emz/bilder/cav1.jpg
- Abb. 4.5.3: Diagrammatische Darstellung einer Doppellipidschicht und einer Micellenform, <http://www.wikipedia.de>, vom 12.07.2006
- Abb. 4.5.4: Diagrammatischer Vergleich zwischen aktivem und passivem Transport, vom Autor erstellt
- Abb. 4.5.5: Diagrammatische Darstellung eines Carrier-Proteins, vom Autor erstellt
- Abb. 4.5.6 : Beispiele für mögliche Filterwirkungen bei Fassaden, vom Autor erstellt
- Abb. 4.5.7: Zeichnerische Darstellung der Funktionsfläche für die einfache Diffusion von Sauerstoff, vom Autor mit Unterstützung von Orlin Atanassov und Paul Christian erstellt
- Abb. 4.5.8: Zeichnerische Darstellung der Funktionsbänder für die einfache Diffusion von Kohlendioxid, vom Autor mit Unterstützung von Orlin Atanassov und Paul Christian erstellt
- Abb. 4.5.9: Zeichnerische Darstellung der Funktionsdüsen für den Transport

- von Wasser, vom Autor mit Unterstützung von Orlin Atanassov und Paul Christian erstellt
- Abb. 4.5.10: Zeichnerische Darstellung der Funktionsporen für den Aufbau eines Konzentrationsgefälles, vom Autor mit Unterstützung von Orlin Atanassov und Paul Christian erstellt
- Abb. 4.5.11: Modellfoto permeables Fassadenelement, vom Autor mit Unterstützung von Orlin Atanassov erstellt
- Abb. 4.5.12: Nahaufnahme des Strukturmodells, vom Autor mit Unterstützung von Orlin Atanassov erstellt
- Abb. 4.6.1: *Aequorea Victoria*, www.advancedaquarist.com/2005/12/aafeature2
- Abb. 4.6.2: Biologische Klassifizierung der *Vibrio Harveyi*, *Vibrio Fischeri*, vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.3: Struktur des Grün-fluoreszierenden Proteins (GFP), Wikipedia, GFP, Foto: A. Brandt
- Abb. 4.6.4: Qualle „*Aquorea Victoria*“, http://istflori.cantiere.duemetri.com/_istflori/images/medusa.jpg
- Abb. 4.6.5: Vergleich verschiedener Bakterienarten, vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.6: Petrischale mit Kolonien von *Vibrio Fischeri*, vom Autor in Zusammenarbeit mit Antonio Migliore und Prof. Spengler, Uni Stuttgart, erstellt
- Abb. 4.6.7: Prototyp eines Fassadenelements, vom Autor in Zusammenarbeit mit Antonio Migliore erstellt
- Abb. 4.6.8: Eigenschaften von Vibrionen vom Autor in Zusammenarbeit mit Maïke Buttler erstellt
- Abb. 4.7.1: Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Rete Mirabile, http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Circulus_arteriosus_schaf.jpg
- Abb. 4.7.2: Biologische Klassifizierung der Robben, Tabelle von Autor erstellt
- Abb. 4.7.3: Robbenfell in einer Nahaufnahme, www.universum-bremen.de/files/presse/Weddell%20Robbe%20-%20%2045.jpg
- Abb. 4.7.4: Robbe, www.awi-bremerhaven.de/AWI/Presse/PM/pm04-1.hj/0401drescher-d.html
- Abb. 4.7.5: Körpertemperatur in Bezug zur Umgebungstemperatur, Grafik von Autor erstellt

- Abb. 4.7.6: Energieumsatz Homoiotherme-Poikiotherme, Heldmeier, Neuweiler, Vergleichende Tierphysiologie
- Abb. 4.7.7: Thermografische Aufnahme einer liegenden Robbe mit Angabe der Kerntemperatur, Heldmeier, Neuweiler, Vergleichende Tierphysiologie
- Abb. 4.7.8: Schema zur Durchblutung einer Extremität bei kalter und warmer Umgebung, Heldmeier, Neuweiler, Vergleichende Tierphysiologie
- Abb. 4.7.9: Zeichnerische Darstellung eines Rete Mirabile, auch Wundernetz genannt, welches als Wärmetauscher fungiert, vom Autor erstellt
- Abb. 4.7.10: Zeichnerische Darstellung des Hautaufbaus mit einer arteriovenösen Anastomose, vom Autor erstellt
- Abb. 4.7.11: Tabellarische Analogiebetrachtung eines Robbenfells bezogen auf die Gebäudehülle, vom Autor erstellt
- Abb. 4.7.12: Schematisches Testmodell eines Vasomotorischen thermoregulierenden Mehrschichtsystems, vom Autor erstellt
- Abb. 4.7.13: Schematisches Testmodell eines variablen Mehrschichtsystems aus zwei Dämmschichten, vom Autor erstellt
- Abb. 4.7.14: Diagrammatische Darstellung eines sequentieller Jahresablauf eines thermoregulierenden Mehrschichtsystems inspiriert durch die Wirkungsweise des Robbenfelles, vom Autor erstellt
- Abb. 4.8.1: Schwarzer Kiefernprachtkäfer (*melanophila acuminata*), www.scinecephoto.com
- Abb. 4.8.2: Biologische Klassifizierung, Tabelle vom Autor erstellt
- Abb. 4.8.3: Durch roten Pfeil markierter Feuersensor des Kiefernprachtkäfers, www.scinecephoto.com
- Abb. 4.8.4: REM-Aufnahme des Infrarot-Organ des Kiefernprachtkäfers, www.scinecephoto.com
- Abb. 4.8.5: IR-Organ des Schwarzen Kiefernprachtkäfers mit ca.75 kuppelförmigen photomechanischen IR-Sensillen, www.scinecephoto.com
- Abb. 4.8.6: REM-Aufnahme IR-Sensillen mit zweitausendstel Millimeter dicken chitinösen Panzerschicht, www.scinecephoto.com
- Abb. 4.8.7: Querschnitt durch ein Sensillum, www.scinecephoto.com
- Abb. 4.8.8: Schematische Zeichnung des photomechanischen Prinzips des Sensillums, www.scinecephoto.com

- Abb. 4.8.9: Vergleich der elektromagnetischen Strahlung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche, vom Autor erstellt
- Abb. 4.8.10: Skizzenhafte Visualisierung der photomechanischen Infrarotsensoren des *melanophila acuminata*, vom Autor mit Unterstützung von Maïke Buttler erstellt
- Abb. 4.8.11: Skizzenhafte Visualisierung der photomechanischen Infrarotsensoren des *melanophila acuminata*, vom Autor mit Unterstützung von Maïke Buttler erstellt
- Abb. 4.8.12: Skizzenhafte Visualisierung der photomechanischen Infrarotsensoren des *melanophila acuminata*, vom Autor mit Unterstützung von Maïke Buttler erstellt

Teil 4 - Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle

- Abb. 5.4.2 aus dem Teil 2 - Anforderungen -: Tabellarische Darstellung energetischer, sicherheitstechnischer und betriebstechnischer Anforderungen an eine Hüllstruktur, vom Autor erstellt
- Abb. 1.0.2: Tabellarische Darstellung der Anforderungen, Lösungsansätze und Phänomene, vom Autor erstellt
- Abb. 3.2.1: Tabellarische Darstellung der Schichten, Diagramme und Phänomene, vom Autor erstellt
- Abb. 3.2.2: Perspektivische Darstellung des Schichtenaufbaus analog zur tabellarischen Darstellung, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.1: Perspektivische Darstellung eines Schaltzustandes der Schichtenbereiche, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.2: Perspektivische Darstellung eines Schaltzustandes der Schichtenbereiche, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.3: Perspektivische Darstellung eines Schaltzustandes der Schichtenbereiche, vom Autor erstellt
- Abb. 4.1.4: Perspektivische Darstellung eines Schaltzustandes der Schichtenbereiche, vom Autor erstellt
- Abb. 4.2.1: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Isolierung - Zustand Aktiv 01 -, vom Autor erstellt

- Abb. 4.2.2: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Isolierung - Zustand Aktiv 02 -, vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.1: Perspektivische Darstellung der deaktivierten Schichten, vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.2: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 01 -, vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.3: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 02 -, vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.3: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 02 -, vom Autor erstellt
- Abb. 4.3.4: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 03 -, vom Autor erstellt
- Abb. 4.4.1: Perspektivische Darstellung der selektiv aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand 01 -, vom Autor erstellt
- Abb. 4.4.2: Perspektivische Darstellung der aktivierten Schicht Energiegewinnung - Zustand Aktiv 02 -, vom Autor erstellt
- Abb. 4.4.3: Perspektivische Darstellung mehrerer selektiv aktivierten Schichten, vom Autor erstellt
- Abb. 4.4.4: Perspektivische Darstellung mehrerer selektiv aktivierten Schichten, vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.1: Diagrammatische Darstellung (Szenario 1), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.2: Diagrammatische Darstellung (Szenario 2), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.3: Diagrammatische Darstellung (Szenario 3), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.4: Diagrammatische Darstellung (Szenario 4), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.1.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 1), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.1.2: Perspektivische Visualisierung (Szenario 1), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.2.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 2), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.2.2: Perspektivische Visualisierung (Szenario 2), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.3.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 3), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.3.2: Perspektivische Visualisierung (Szenario 3), vom Autor erstellt
- Abb. 4.6.4.1: Diagrammatische Schnittdarstellung (Szenario 4), vom Autor er-

stellt
Abb. 4.6.4.2: Perspektivische Visualisierung (Szenario 4), vom Autor erstellt

Dirk Henning Braun

Dipl.-Ing. Freier Architekt
Wernhaldenstrasse 20
70184 Stuttgart

Geburtstag 29. Juli 1971 in Tübingen

Familienstand verheirat, 2 Kinder (8/10)

Schulbildung

1978-82 Grundschule Winkelwiese, Tübingen

1982-91 Humanistisches Uhland-Gymnasium, Tübingen

Lehrausbildung

1991-93 Ausbildung zum Bauzeichner Gestaltung und Hochbau

Vorpraktikum

1993-94 Architekturbüro Asp, Stuttgart/Tübingen

Studium

1994-99 Studium der Architektur an der Universität Stuttgart

1996 Stipendiat der Studienstiftung des Deutschen Volkes

1996-98 Praktika bei Peters & Keller Architekten, Stuttgart und Odilo Reutter Architekten, Esslingen

1996-98 Wiss. Hilfskraft am ILEK, Institut für leichte Flächentragwerke
Universität Stuttgart

1999 Diplomarbeit Prof. Stefan Behling und Prof. Dr. Werner Sobek

Beruf

1999-02 Architekt bei Foster and Partners, London, Mitarbeit an verschiedenen internationalen, interdisziplinären Projekte, u.a. e-plus Hauptverwaltung, Deutsche Bank Hauptverwaltung
Australien

seit 2002 Braun Associates Architekten, Stuttgart

2002-07 Univ. Assistent an der Universität Stuttgart, Institut für Baukonstruktion, Lehrstuhl 2, Prof. Stefan Behling, Lehrtätigkeit in den Gebieten Baukonstruktion und Entwerfen, Betreuung von Entwurfs- und Diplomarbeiten

Epilog - Der Weg in die Fläche

Hinter der Entwicklung einer adaptiven gaspermeablen Hüllstruktur steht quasi als gedanklicher Überbau eine strukturelle Betrachtung, die für Fassaden von morgen oder sogar übermorgen Antworten und Anregungen geben könnte.

Es gibt sicherlich zigtausend Unterschiede zwischen natürlichen Hüllstrukturen, die über 500 Mio. Jahre evolutioniert sind und den Hüllstrukturen, die wir Menschen seit ca. 50.000 Jahren um uns herum ein- und verbauen.

In der vorliegenden Betrachtung möchte ich jedoch besonders ein Phänomen einkreisen, das in seiner Ausprägung deutliche Unterschiede zu natürlichen Systemen aufweist und das Wegbereiter unkonventioneller Ansätze für Gebäudehüllstrukturen von Morgen sein kann:

Mit der Entwicklung und Einführung ebener flächiger Bauwerkstoffe, wie z.B. Plattenwerkstoffe aus Holz oder Glas, hat sich in der modernen Bauindustrie das separate oder (noch deutlicher) separierende Konstruieren von Trag- und Füllstrukturen durchgesetzt. Auch der Einsatz von transparentem Glas, das an seinen Rändern oder an seinen Randbereichen gehalten werden muss, sei es durch linienförmige oder punktuelle Halterungen, ist erst durch das Konstruieren von Trag- und Füllstrukturen möglich geworden.

Diese grundlegenden Begebenheiten stellen einen kleinen, aber entscheidenden Unterschied zu natürlichen Hüllsystemen dar, denen ich in den letzten Jahren begegnet bin. Diese unterscheiden (fast) nie zwischen tragenden und füllenden Strukturen. Die Separierung in tragende Pfosten-Riegel-Fassaden mit füllenden Flächen, seien sie zu Elementen montiert oder bauseits zu montieren, bedingt eine eingeschränkte Belegung der Elemente mit Eigenschaften.

D.h. jedes Bauteil kann nur eine geringe Anzahl an Funktionen übernehmen, selten mehr als drei, aber nie mehr als fünf. Darüber hinaus werden Fugen und Strukturen zu gestalterischen Gegebenheiten, die reizvoll aber auch unnötig sein können.

In der Natur dagegen bestehen Hüllstrukturen meist aus flächigen, dreidimensional verformbaren und multifunktional belegten Schichten oder Gradienten. Hier findet keine Separierung zwischen Trag- und Hüllstruktur statt, sondern vielmehr ein Verschmelzen von tragenden und füllenden Bauteilen.

Denkt man nun an dieser Stelle weiter, könnte man im Themenspektrum der Gebäudehüllen von morgen oder übermorgen den Ansatz einer "Evolution in die Fläche" verankern, der in drei Phasen von der aktuell praktizierten Separierung von Material, Struktur und Funktion über eine Annäherung zwischen Trag- und Hüllstruktur bis hin zur Verschmelzung der drei vorgenannten Kategorien führt.

