

Stefan Behling
Dirk H. Braun
Andreas Fuchs
Peter Seger
Thomas Stark
Tina Volz

Neue Baumaterialien der Zukunft





Glas, Glas-Verbundsicherheitsrohre, hochtransparente Glasverklebungen, Tensegrity Tragwerke, Heißwasser-Kollektor-Systemfassaden, erneuerbare Energien in Gebäuden, Bionik, Nutzung von Windenergie – dies sind nur einige der neuen Technologien für Baustysteme, Baumaterialien oder Bautypen, die am Lehrstuhl 2 für Baukonstruktion und Entwerfen erforscht wurden und inzwischen in der Praxis Anwendung finden, wobei ein Forschungsergebnis besondere Aufmerksamkeit verdient: Die Glasrohrbrücke, sie gehört zu den weltweit ersten realisierten Konstruktionen, bei denen stabförmige Bauteile aus Stahl durch Glasrohrprofile ersetzt wurden.

Glas

Der Einsatz von Glas als jüngstem Primärbaustoff und die Weiterentwicklung von Glasprodukten verlaufen seit der Errichtung des Londoner Kristallpalastes Mitte des 19. Jahrhunderts mit ungebrochenem Innovationspotential. Die vergangenen zwanzig Jahre haben für dieses Material gleichsam einen Evolutionssprung gebracht. Dank neuartiger Herstellungs- und Fertigungstechnologien können die Basisprodukte auf vielfältige Weise behandelt werden und erhalten neben neuen funktionalen Eigenschaften auch ästhetisch hochwertige Gestaltungspotentiale. Einen maßgeblichen Anteil an dieser Entwicklung hat die europäische Forschung, die im weltweiten Vergleich auf diesem Gebiet eine Spitzenposition einnimmt. Entscheidend hierfür ist die traditionelle Verbundenheit von Handwerk und Industrie in Verbindung mit der historischen Entwicklung der europäischen Baukultur und den Ingenieurwissenschaften.

Stuttgart und die „Stuttgarter Schule“ sind durch die enge und fruchtbare Zusammenarbeit von Architekten und Ingenieuren geprägt. Bedeutende Baumeister sind in dieser Tradition gewachsen, und ihre wissenschaftlichen Arbeiten und Bauten sind international bekannt und

geschätzt. Die Arbeiten zum Thema Brücken von Leonhardt und Schlaich oder die Untersuchungen zu leichten Flächentragwerken von Frei Otto und Klaus Linkwitz machten Architekturgeschichte. Von besonderer Bedeutung sind der interdisziplinäre Umgang mit zum Teil neuen Themen und die Verschmelzung von konstruktiver und ästhetischer Vision. Vor diesem Hintergrund nimmt die Universität Stuttgart eine besondere Rolle in der Forschung und Entwicklung von Glas- und Fassadenkonstruktionen ein. In enger, fakultätsübergreifender Zusammenarbeit werden prototypische Konstruktionen entwickelt und durch Kooperationen mit der Industrie realisiert.

Peter Seger / Dirk H. Braun / Tina Volz ■
Thomas Stark / Andreas Fuchs / Stefan Behling ■
Neue Baumaterialien der Zukunft ■

Flächentragwerke der Universität Stuttgart. Diese Projekte haben gemeinsam, dass ihr Tragwerk aus Flachgläsern, die mit PVB Folien zu Verbundsicherheitsgläsern zusammengefügt wurden, besteht.

Würde man die Frage stellen, welche Form Glas als tragendes Element einnehmen wollte, so wäre die Antwort sicher nicht eine dünne Flachglasscheibe. Die extreme Schlankheit in eine Richtung begünstigt insbesondere bei hinzu kommender Imperfektion das Ausknicken, was unweigerlich zum Bruch und Versagen der tragenden Konstruktion führen kann. Studiert man traditionelle Materialien, die für druckbelastete Tragwerke eingesetzt wurden, wie beispielsweise Naturstein oder Beton, lässt sich beobachten, dass stets axial symmetrische Querschnitte Verwendung finden und nicht eine vergleichsweise dünne, flache Scheibe.

Im Laufe der Jahre ist es gelungen, in Forschungs- und Entwicklungsprojekten richtungweisende Bauten wie der „Gläserne Pavillon in Rheinbach“ (Architekten: Hieber+Marquardt), das erste Verbundsicherheits-Glasrohr, Verschattungs- und Lichtlenkungssysteme für Fassaden, Kollektorsysteme, Honey Comb-Konstruktionen aus Glas und vieles mehr in enger Zusammenarbeit mit Firmen aus der Glasindustrie zu entwickeln. Diese Aktivitäten wurden durch wegweisende Ausstellungen wie der Glass-Technology-Life auf der GlassTec in Düsseldorf und den internationalen Fachkongress GlasKon in München ergänzt.

Der Forschungsschwerpunkt „Glas- und Fassaden-Konstruktionen“ kann nur in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, dem Handwerk, den Fassadenentwicklern, Ingenieuren und Fachleuten sinnvoll betrieben werden. Entscheidend für den Erfolg ist die Dynamik, die zurzeit in diesem Forschungsbereich steckt und sich teilweise bereits in gebauten Projekten widerspiegelt. Als weiteres Ergebnis dieser Zusammenarbeit der letzten Jahre entstand das Fachbuch „glasklar – Produkte und Technologien zum Einsatz von Glas in der Architektur“. Es ist ein Produkt aus der gemeinsamen Arbeit und schließt eine Lücke in der umfangreichen Literatur zur Glasanwendung in der Architektur.



Ausstellungspavillon in Rheinbach.



Glasrohrbelastungstest.



Mero-Raumfachwerk aus Glasrohren.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegung begannen 1995 die ersten Versuche, Glasrohre als Druckelemente einzusetzen. In Seminaren wurden mit Studierenden die ersten Konstruktionen aus Glasrohren entwickelt. Im Zuge dieser Studien begann die Zusammenarbeit mit der Schott-Rohrglas GmbH, Mitterteich. Die Firma Schott Rohrglas ist der Weltmarktführer im Bereich von hochpräzisen Glasrohren aus Borosilikatglas. Diese sind in jedem Durchmesser von einem bis 400 Millimeter und zahlreichen Wandstärken von 0,1 bis 20 Millimeter erhältlich. Bei Rohren bis zu 120 Millimetern Durchmesser ist die Rohrlängenproduktion theoretisch unbegrenzt. Die Längenrestriktion ergibt sich im Wesentlichen aus dem Transport. Bei Rohren mit größeren Durchmessern ist die maximale Länge zurzeit noch auf ca. 3,80 Meter begrenzt. Nicht nur die hervorragende Resistenz gegen chemische Substanzen, sondern auch die erheblichen Lastaufnahmefähigkeiten von Glasrohren hat sich über Jahrzehnte beim Einsatz von Glasrohren im Bereich der chemischen und pharmazeutischen Industrie bewährt.

Noch nie zuvor sind die Leistungsgrenzen von Glasrohren als Druckstützen systematisch erforscht worden. In zahlreichen Versuchen und Testreihen wurden folgende zentrale Fragestellungen untersucht:

Glasverbundrohr als konstruktives Element

Glas besitzt eine sehr hohe, mit Stahl vergleichbare Druckfestigkeit. Dies inspirierte in jüngster Zeit Architekten und Ingenieure, in ihren Projekten Glas als tragenden Baustoff einzusetzen. Schon auf der GlassTec 1998 wurden zahlreiche neue Entwicklungen zu diesem Thema präsentiert. So zum Beispiel eine gläserne Kuppel der Firma Seele (Durchmesser 12,5 Meter) sowie ein Glasbogen (Spannweite 20 Meter) des Instituts für Leichte



Watertower Place, London – Fassade mit gläsernen Druckstützen.

- Leistungsgrenzen eines Glasrohres unter axialem Druck
- Optimierung der Lasteinleitung in das Rohrende in Abhängigkeit von dessen Oberflächenbearbeitung
- Bruchmechanik und Resttragfähigkeit
- Systementwicklung und Herstellungstechnik von Glasverbundrohren
- Tragfähigkeit von Glasrohren

Unterschiedliche Testreihen mit Glasverbundrohren im Prüfungslabor haben ergeben, dass Druckbelastungen von 400 Newton pro Quadratmillimeter (N/mm^2) und mehr durch eine neuartige, direkte Lagerung und Kräfteinleitung unproblematisch sind und nicht zum Versagen der Prüflinge führt. Selbst bei konservativsten Annahmen leitet sich daraus eine zulässige Druckfestigkeit von mindestens $60 N/mm^2$ ab. Dies bedeutet beispielsweise, dass ein Glasrohr von 200 Millimetern Durchmesser und neun Millimetern Wandstärke (Kontaktfläche $5.400 mm^2$) ca. 32,5 Tonnen Last aufzunehmen vermag und dabei erhebliche Sicherheitsreserven hat. Anmerkung: Bei einem Flachdach mit einem Stützraster von $10 m \times 10 m$ (Einzugsfläche $100 qm$) und einem Flächengewicht von 2,5 Kilonewton pro Quadratmeter (kN/m^2) zuzüglich $0,75 kN/m^2$ Schneelast (Gesamtlast $3,25 kN/m^2$) würde somit jede Stütze mit maximal 32,5 Tonnen belastet werden.

Selbstverständlich können Glasstützen nicht nur herkömmliche Stützen aus Stahl, Holz oder Beton ersetzen. Sie können auch als Druckelemente beispielsweise in räumlichen Tragwerken oder anderen Konstruktionen eingesetzt werden, bei denen idealerweise die Zug- und Druckkräfte in unterschiedliche Elemente aufgelöst werden. Schon auf der Glass-Tec 1996 wurde dies in einer Tensegrity Struktur vorgeführt. Im Jahre 2000 präsentierten wir mit der Firma Mero einen sieben Meter hohen Raumtragwerksturm aus Glasrohren mit integrierten Vorspannstäben. Der große Durchbruch ist die Entwicklung eines im industriellen Maßstab anwendbaren Herstellungsverfahrens für Glasverbundrohre. Hierbei werden nach einem geschützten Verfahren Glashalbschalen um ein inneres Kernrohr laminiert. Als Verbindung werden PVB (Polyvinylbutyral)-Folien im Scheibenzwischenraum, ähnlich wie bei handelsüblichen Verbund sicherheitsgläsern, erhitzt und unter Druck im Autoklaven zu-

sammengepresst. Diese Technik hat sich über Jahrzehnte nicht nur im Bauwesen, sondern speziell im Automobilbau als die sicherste Form der Glasanwendung bewährt. Das innere Rohr trägt, das äußere Rohr schützt.

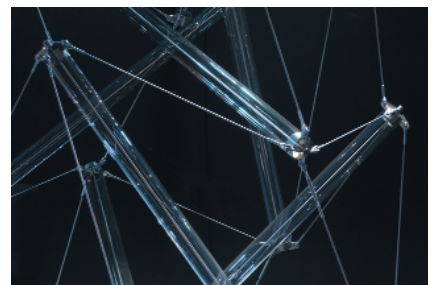
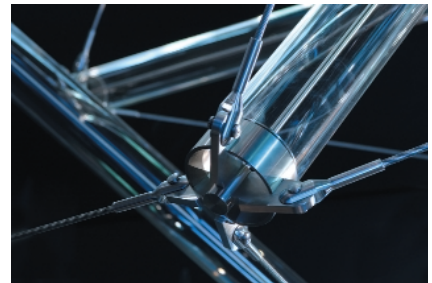
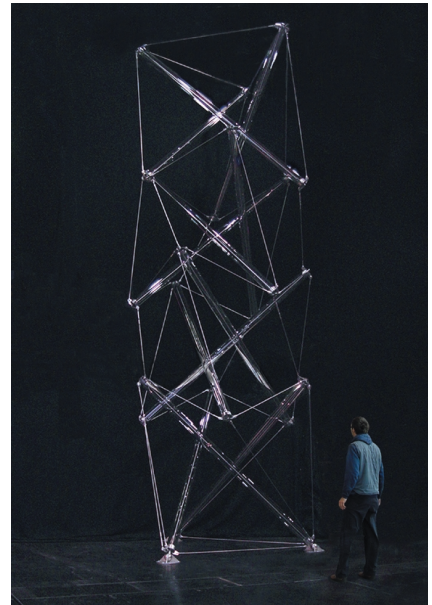
In zahlreichen Tests wurde nachgewiesen, dass auch bei mutwilliger Zerstörung durch unterschiedlichste Formen von Kraft- oder Gewaltanwendung eine wesentliche Resttragfähigkeit sowohl des äußeren als auch des inneren Glasrohres erhalten bleibt. So können zum Beispiel Teststücke von 700 Millimetern Länge, 185 Millimetern Durchmesser und fünf bis sieben Millimetern Wandstärke von einem Stahlstab von acht Millimetern Durchmesser unter einer Belastung von $400 N/mm^2$ vollständig durchbohrt werden, ohne zu versagen. In der Architektur ist die erste Anwendung von Verbund sicherheitsglasrohren in der Atriumfassade des Bürogebäudes Tower Place in London von Foster und Partners zu sehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich durch die Möglichkeit, Verbundglasrohre einzusetzen, ungeahnte planerische und ästhetische Möglichkeiten für eine transparente Architektur eröffnen. Diese Neuentwicklung könnte die Architektur ähnlich beeinflussen wie einst die Entdeckung des Stahlbetons. Vielleicht keine Revolution, aber gewiss ein wichtiger Schritt und eine Bereicherung für die Architektur.

Tensegrity-Skulptur aus Glasrohren

Die Tensegrity-Skulptur aus Glasrohren entstand im Rahmen einer Studienarbeit am Institut für Baukonstruktion, Lehrstuhl II, mit dem Ziel, die Möglichkeiten des konstruktiven Einsatzes von Glasrohrprofilen zu veranschaulichen. Die Idee des Entwurfes war, durch die Verwendung einer Tensegrity-Tragstruktur, bei der die Druck- und Zugelemente statisch und räumlich voneinander getrennt sind, neben der enormen Druckbeanspruchbarkeit auch die ästhetischen Qualitäten der Glasrohre besonders hervorzuheben. Durch die Transparenz des Glases entstand eine Skulptur, die mit den Sehgewohnheiten des Betrachters spielt.

Sie ist aus vier übereinander angeordneten Tensegrity-Grundelementen aufgebaut. Die Druckelemente, die aus drei



Tensegrity Turm mit Glasrohren als Druckelementen.

Meter langen Borosilikat-Glasrohren bestehen und einen Durchmesser von 120 Millimetern haben, werden mittels eines Zugstabes, der im Innern verläuft, mit 15 kN vorgespannt. Die Zugelemente, welche die Glasrohre statisch stabil im Raum halten, sind aus acht Millimeter starken Edelstahl-Spiralseilen. Diese werden über Gabelköpfe mit Laschen verbunden. Der Edelstahl-Endbeschlag besteht aus einem Ring, der die Kräfte nach einem geschütz-

Bionisch inspirierte Gebäudehüllen – Fassaden der Zukunft

ten Verfahren direkt in die Glasrohre überträgt, und einem Stern aus vier Laschen, der in diesen eingeschoben wird. Der Endbeschlag, der nur über Steckverbindungen zusammengefügt ist, nimmt sowohl die Seil- als auch die Vorspannkraft der Rohre auf. Bei dem Fußpunkt ist auf das Endstück eine 90 Millimeter große Edelstahlkugel aufgeschraubt, die gelenkig mit der verankerten Fußplatte verbunden ist. Bei diesem Projekt werden neueste Erkenntnisse der Forschung mit Architektur und Konstruktion verbunden.



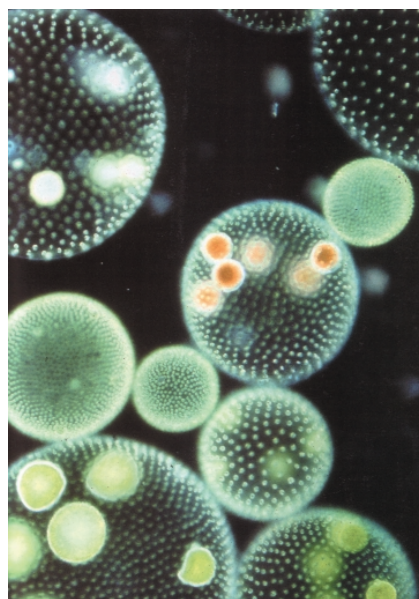
Glasrohrbrücke.



Glasrohrbrücke - Detail.

Außerdem wurde eine Glasrohrbrücke realisiert, bei der die Druckkraft des Glasbogens an den beiden End-Auflagern durch die unteren Zugglieder aufgenommen wird und dadurch horizontale Auflagerkräfte vermieden werden. Es entsteht ein kurzgeschlossenes System. Das Besondere der Konstruktion ist die Vorspannung der Gesamtstruktur durch Zugelemente aus Stahl. Die Vorspannung bewirkt, dass die Glasrohre auch bei Lastwechselwirkung immer unter Druckspannung stehen. So wird jedes Material entsprechend seinen besonderen Leistungsmerkmalen eingesetzt und der Anteil nichttransparenter Elemente minimiert. Die Rohrglasbrücke gehört zu den weltweit ersten realisierten Konstruktionen, bei denen stabförmige Bauteile aus Stahl durch Glasrohrprofile ersetzt worden sind. Sie zeigt das ästhetische Potential, das in Tragwerken dieser Art steckt.

Nicht zuletzt durch die drastischen Eingriffe des Menschen in seine Umwelt ist der bionische Gedanke zu einem populären Schlagwort geworden. Die Grundidee der Bionik – aus der Natur für technische und anthropogene 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. Die Forschungsarbeit beschreibt die aktuelle Diskussion rund um dieses Thema, das Leistungsbild dieser Transferdisziplin und die Entwicklungspotentiale aus Sicht eines Architekten. Darüber hinaus werden am Lehrstuhl im Bereich der Fassaden von „übermorgen“ verschiedene Prototypen erarbeitet, die von natürlichen Hüllen oder Häuten inspiriert sind. Wir versuchen, am Lehrstuhl Fassadensysteme 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 Konzeptionen für Gebäudehüllen entstehen, wie zum Beispiel atmende Glashäute, veränderliche Wärmedämmungen oder adaptive Verschattungssysteme. Spannend dabei ist besonders, dass alle diese Ideen per se veränderlich und adaptiv sein müssen, was eine besondere Herausforderung für die Architektur und ihre Architekten sein wird.

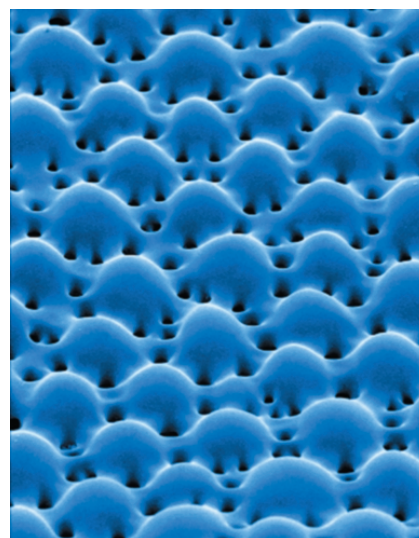


Zellen der Grünalgen.

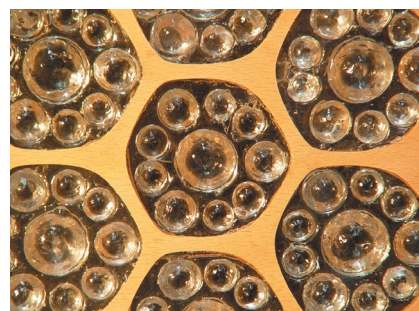
Um diese Prototypen konkreter zu beschreiben, werden sie nach ihren Anwendungsfähigkeiten aufgeteilt, um eine für den Architekten benutzbare Gliederung zu erstellen.

Bionische Strukturen und Fügungen

Unter „Bionischen Strukturen und Fügungen“ versteht man die Fähigkeit einer Konstruktion, aufgrund des Zwanges zur Selbstoptimierung die der Anforderung entsprechende Wirkung aufzubauen. Das Fügen dieser entweder ganzheitlich oder in Teilen funktionierenden Konstruktion wird durch das Fügen ergänzt oder erst möglich. Beispiel hierfür sind die Forschungen an Kalzitstrukturen des Schlangensternelets, der in der Lage ist, nur anhand seiner ausgebildeten Oberfläche Distanzen zu sehen, er ist also fähig, mit seinem Skelett zu sehen. So soll ein Prototyp entstehen, der nur durch die Beschaffenheit seiner Struktur selbstverschattende Fähigkeiten entwickelt, indem er den ultravioletten Lichtanteil „messen“ und je nach Gehalt Maßnahmen ergreifen kann.



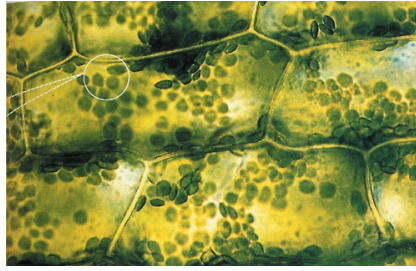
REM-Aufnahme einer Armplatte des Schlangensterne.



Modell einer Sensitiven Lichtfassade.

Bionische Materialien und Oberflächen

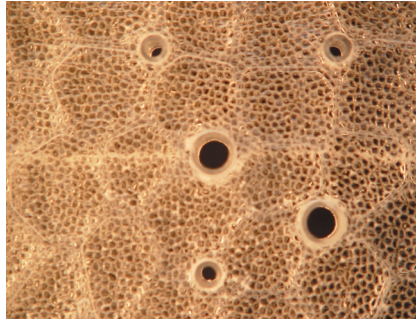
„Bionische Materialien und Oberflächen“ bestehen aus Ein- oder Mehrkomponentenstoffen, die ihre Eigenschaften nicht festgelegt haben und sich an äußere Beanspruchungen anpassen können. Ähnlich den Anforderungen in der Natur reagieren sie aktiv auf äußere Veränderungen wie Spannung, Temperatur, Belastungen oder Strahlungen und reagieren adaptiv, spontan reversibel oder sogar gleitend justabel. Beispielhaft für diesen Bereich stehen die Forschungen mit dem Perlmutter der Mollusken, einem Weichtier. Dieses Material kann seine Biegesteifigkeit mit zunehmender Last verändern und ist so in der Lage, variabel auf äußere Lasten zu reagieren. Denkbar wäre ein Fassadensystem aus diesem nachwachsenden und extrem hygienischen Material, das von selbst eine Unterdimensionierung im klassischen Sinn ermöglicht, kann es sich doch, dem Lastfall folgend, selbst einstellen.



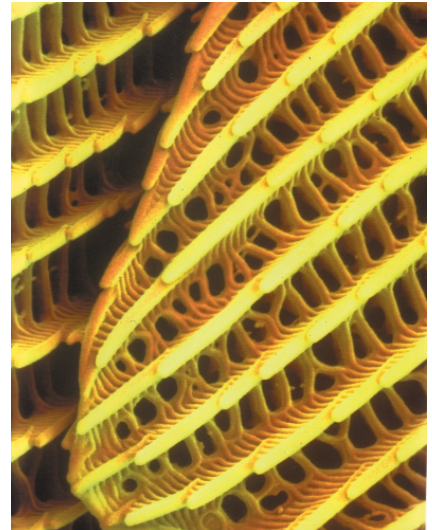
REM-Aufnahme von Blattgrün.



Durchlichtaufnahme eines Blattes.



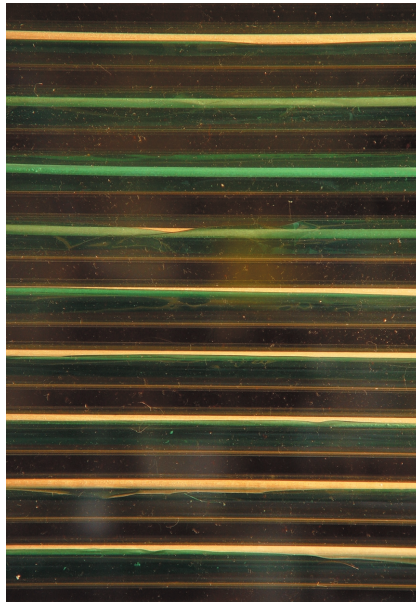
Modell einer Permeablen Fassade.



Schmetterlingsflügel.



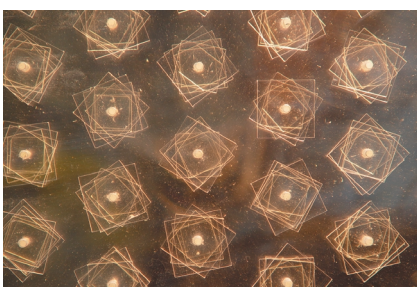
REM-Aufnahme einer versteinerten Molluske.



Modell einer Photobiologischen Fassade.



Haihaut.



Modell zum Verständnis der Struktur des Perlmutter.

Bionische Funktionen und Systeme

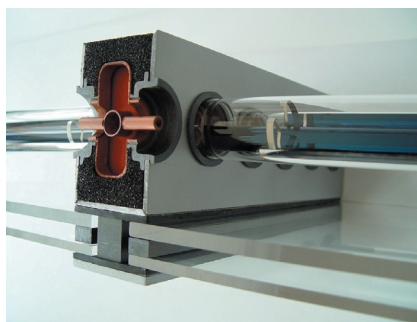
„Bionische Funktionen und Systeme“ sind primär sich optimierende ablauf-schematische Prozesse, die anhand des Grundprinzips der Selbstorganisation der Natur auf typologische und funktionale Abläufe in der Architektur anwendbar sind. Funktionsprinzipien sind sämtliche

funktional bestimmte Wirkungsweisen und Zusammenhänge, die unabhängig ihrer Wirkung Assoziationen zur Architektur zulassen und diese in ihrer Funktion bereichern. Beispiel hierfür ist die Entwicklungsarbeit an Photobiologischen Wasserstofffassaden, die, nach dem Vorbild der Photosynthese, Sonnenenergie in Wasserstoff umwandeln können. Dieses System basiert auf den erfolgreichen Forschungen im Bereich der Grünalgenanwendung zur Gewinnung des begehrten energiereichen Mediums. Vision ist darüber hinaus die Entwicklung einer permeablen Plasmamembran nach dem Vorbild amphibischer Häute. Diese Be-

strebungen könnten zur Entwicklung atmender Gebäudehüllen führen, die sich den umgebenden Verhältnissen anpassen können, dabei keine Energieverluste verursachen und – last but not least – den Augen des Architekten Gestaltungs-freiraum ermöglichen.



Ansicht Systemfassade.



Mögliche Medienführung der Systemfassade.

Entwicklung eines Fassadensystems

Der Energiebedarf von Gebäuden setzt sich aus den Energiedienstleistungen für die Wärmeversorgung, Kühlung und elektrische Energie für Beleuchtung etc. zusammen. Um einen Teil dieses Bedarfs zu reduzieren, beziehungsweise die Gebäudehülle als Energieversorger zu aktivieren, wird ein Fassadensystem zur aktiven Solarenergie- und Tageslichtnutzung entwickelt. Die entwickelte Fassade gliedert sich in drei Zonen:

Im Oberlichtbereich befinden sich Prismenstäbe aus Glas, die als transparenter Sonnenschutz bei gleichzeitiger Diffuslichtlenkung wirken. Diese reduzieren den sonst notwendigen Kunstlichteinsatz durch das Umlenken der Diffusstrahlung in die Raumtiefe. Eine Aufheizung des Rauminnen und damit eine eventuell notwendige Kühlung der Räume entfällt, da die direkte Strahlung durch Reflektion innerhalb der Glasprofile nach außen gelenkt wird.

Der sich anschließende Fensterbereich erhält einen Blendschutz, den der Benutzer je nach Bedarf verstellen kann und somit der freie Ausblick gewährleistet wird. Im Brüstungsbereich der Fassade sind Vakuumröhrenkollektoren zur aktiven Solarenergienutzung angeordnet. Hierbei soll die Fassadenkonstruktion der Medienführung dienen. Sowohl die Prismenstäbe als auch die gläsernen Kollektoren ermöglichen eine Teildurchsicht mit reizvollen Glaseffekten. Den Gestaltungsmöglichkeiten sind hier nur wenige Grenzen gesetzt.

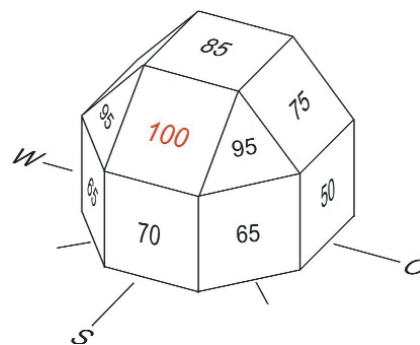


Innenraumdarstellung.

Im Rahmen eines vom Bundesumweltministerium geförderten Forschungsprojekts soll nun der Einsatz der Kollektoren im Fassadenbereich genauer untersucht werden. Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines Fassadenbauteils, das die Funktionen Sonnenschutz, Energiegewinnung und Tageslichtnutzung optimiert und in Fassadensystemen vollständig integriert und flexibel angewandt werden kann. Hierzu sollen die von der Schott-Rohrglas GmbH entwickelten Vakuumröhrenkollektoren in Fassadensysteme der Firma Schüco integriert werden. Die Fassadenpfosten sollen neben ihrer konstruktiven Funktion die Aufgabe des Sammlers übernehmen. Wichtig ist hierbei, eine einwandfreie technische Lösung, hohe Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit und flexible Gestaltungsmöglichkeiten mit hoher architektonischer Qualität zu verbinden.

Photovoltaik – Gebäudeintegration

Der Betrieb von Gebäuden ist in unseren Breitengraden unter Berücksichtigung entsprechender Behaglichkeitsanforderung untrennbar mit dem Einsatz von Energie verbunden. Im Zuge der Problematik, die dem Verbrauch von fossilen und atomaren Energiequellen anhaftet, kommt dem Architekten in seiner Verantwortung für die Umwelt eine große Bedeutung zu, zumal der Betrieb von Gebäuden nahezu die Hälfte der in Deutschland verwendeten Energie in Anspruch nimmt. Neben Maßnahmen zur Minimierung des Energiebedarfs bieten vor allem erneuerbare Energiequellen – und hier insbesondere die direkte Solarstrahlung – große Potenziale zur Energieoptimierung. Hierbei spielt die Gebäudehülle als baukonstruktives Subsystem von Bauwerken eine zentrale Rolle.



Relatives Potenzial der Solarstrahlung auf unterschiedlich ausgerichtete Gebäudeflächen.

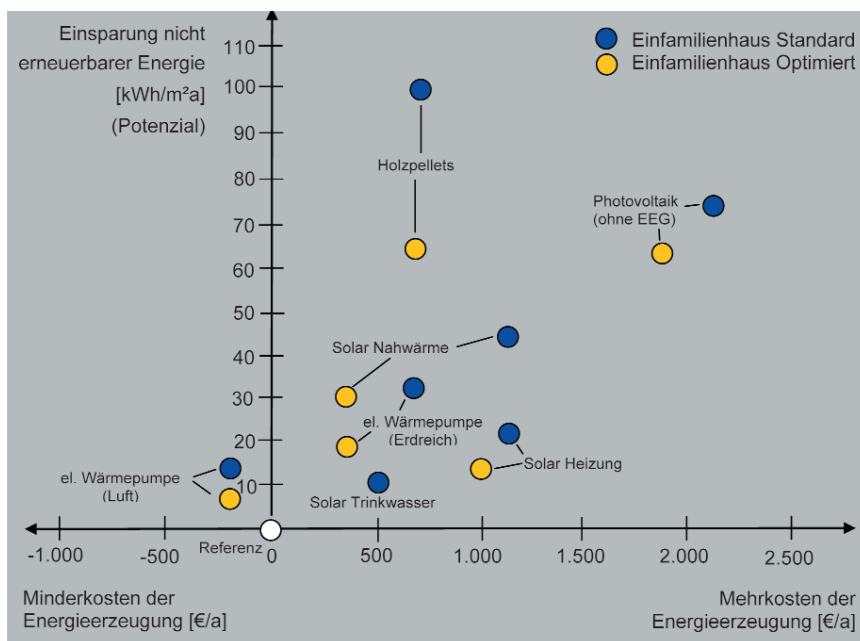
Am Institut wurden daher in einem interdisziplinären Ansatz grundlegende theoretische Untersuchungen zu diesem Themenkomplex erarbeitet. In einer vergleichenden Betrachtung der Bandbreite an Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energie in Gebäuden sind in einem hierfür entwickelten Bewertungsverfahren die energetischen, ökonomischen und architektonischen Aspekte erörtert worden. Die Forschungsarbeit offenbart die zentrale Bedeutung der Photovoltaik für die Energieoptimierung von Gebäuden aus architektonischer Sicht. Dabei steht der Ansatz hinter den Untersuchungen, dass die Photovoltaik in der Gebäudehülle nicht nur einen globalen Charakter hat. Die Gebäudehülle soll nicht nur als sinnvoller „Flächenlieferant“ für die Photovoltaik dienen, sondern in ihrer neuen Funktion in das objektspezifische Energiekonzept des Gebäudes integriert



Prototypischer Entwurf eines solaroptimierten Gebäudes.
(Foto: Arup Associates, London)



Semitransparentes Dünnschicht-Solarmodul. (Foto: Solon AG, Berlin)



Vergleichende Darstellung von Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energie in einem Einfamilienhaus.

werden. Dies ist vor allem im Hinblick auf die anstehende Novellierung der Energieeinsparverordnung EnEV von Bedeutung. Hier ist bislang eine Anrechnung von durch die Gebäudehülle erzeugter elektrischer Energie auf den Energiebedarf des Gebäudes nicht vorgesehen.

Hochtransparente Verklebungen – Hybridbauteil

Das Fügen von unterschiedlichen Bauteilen, Werkstoffen und Konstruktionsmaterialien hat sich in der Architektur in den letzten Jahren stark verändert. Solche „Entwicklungssprünge“ in der Technolo-

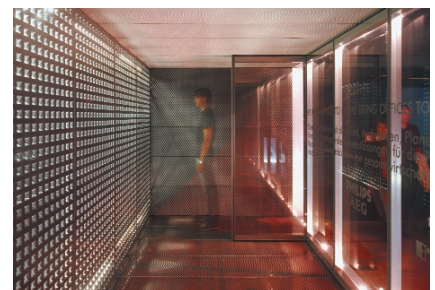
gie der Fügung lassen sich über die gesamte Baugeschichte verfolgen. Beispielsweise wurde im Stahlbau das Nieten von der hochfesten Verschraubung abgelöst und dies wiederum von einer sich noch immer weiterentwickelnden Schweißtechnologie.

Die heute üblichen Raumsysteme trennen, analog zur Fassadentechnologie, die Funktionen meist in konstruktive Elemente und Füllungen. In der Regel handelt es sich dabei um lineare Bauteile aus Stahl, Aluminium usw. oder flächige Bauteile wie beispielsweise Glasscheiben. Diese Art der Konstruktion „verschenkt“ das konstruktive Potential, welches in den Füllelementen steckt.

Unser Ansatz dagegen zielt in eine Richtung, die aus dem modernen Kraftfahrzeugbau bekannt ist. Bei Personenkraftwagen und noch viel mehr bei Reisebussen ist es heute üblich, dass die großflächigen, teilweise doppelt gekrümmten Verglasungen einen wesentlichen Beitrag zur Aussteifung und damit zur Gesamtstabilität der Karosserie beitragen. Für diesen Konstruktionsansatz, der einen flächigen und kraftschlüssigen Verbund erfordert, bieten sich Verklebungen unterschiedlicher Materialien als ideale Verbindungstechnik an.



Hochtransparente Verklebung mittels lichtaushärtenden Acrylaten.



Erste Präsentation des neuen Raumsystems. (Foto: Roland Halbe, Stuttgart)

der Entwicklung unterschiedlicher Hybridbauteile mittels dieser transparenten Klebetechnologie beschäftigen. Unser Fokus wird darauf liegen, immer leistungsfähigere Bausysteme mit immer geringerem Materialeinsatz zu entwickeln.

Integration von Windturbinen in die gebaute Umwelt

Die zunehmenden Schwierigkeiten bei der Planung und dem Bau von Windkraftwerken auf dem Festland führen zur Entwicklung riesiger Offshore-Turbinen. Beispiele für eine gelungene Integration in bebauter Umgebung, also in der Nähe der Primärnutzungen wie Gebäuden, bleiben eine Ausnahme.

Die erfolgreiche Integration von Windkraftanlagen in bebauter oder städtischer Umgebungen erfordert langfristig angelegte Entwicklungsvorgaben, die sowohl die Anliegen von Planern und Interessenverbänden als auch die der Öffentlichkeit,

decken, in dem sie untergebracht sind, beziehungsweise den entsprechenden Anteil an anliegende Nutzer abgeben. Die Gebäude selbst müssen energetisch effizient sein, um nicht Gefahr zu laufen, dass die Turbinen ein rein ästhetischer Beitrag werden.

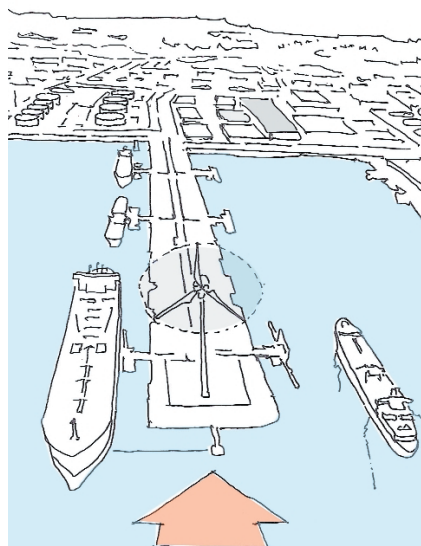
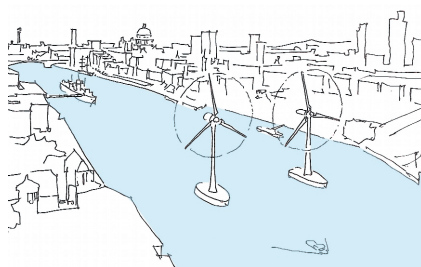
Der Schwerpunkt dieses Projekts zielte auf die Entwicklung von Techniken, die eine erhöhte Windnutzung und verbesserte Integration zur Folge haben sollten. Der jährliche Energiegewinn pro installierter Einheit sollte verbessert und die niedrigen bis mittleren Windgeschwindigkeiten (zwei bis fünf Meter pro Sekunde), die typisch für die meisten bebauten Gegenden Europas sind, besser genutzt werden. Dies erforderte, dass die ästhetischen, aerodynamischen, architektonischen, strukturellen und umweltbeeinflussenden Faktoren sorgfältig gegeneinander abgewogen und miteinander in Einklang gebracht werden mussten. Die Techniken konnten in Feldversuchen mit einem Gebäudeprototyp (Maßstab 1:7) beziehungsweise einem Windbeschleuniger mit einer Horizontal- beziehungsweise Vertikaltriebswindturbine im Rahmen des Projektes erfolgreich nachgewiesen werden. Gleichzeitig wurden Planungshilfen für urbane Windenergieconversionssysteme (UWECS) erarbeitet. Diese Richtlinien geben Hilfestellungen zum konzeptionellen Entwurfsprozess und beinhalten Methoden für die Voraussage des zu erwartenden Energiegewinns und der Bewertung der Umwelteinflüsse und Kosten.



Erstes Funktionsmodell M1:1.

Beim Verkleben transparenter Materialien, wie zum Beispiel von Glas, rückt der Klebstoff und die Klebefuge – nun selbst sichtbar – naturgemäß in den Fokus. Für uns war es eine besondere ästhetische Herausforderung, einen Klebstoff zu finden, der alle statisch konstruktiven Anforderungen erfüllt und dabei so transparent ist, dass er möglichst nicht wahrnehmbar ist. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Firmen aus diesem Bereich konnten erstaunliche Ergebnisse erzielt werden. So scheinen, bei dem neu entwickelten Raumsystem, die Glasscheiben vor den Konstruktionsprofilen zu schweben. In Wahrheit bilden diese, mittels der Verklebung mit dem tragenden Aluminiumprofil, eine konstruktive Einheit. Dadurch wird die statische Leistungsfähigkeit eines solchen Bauteiles wesentlich erhöht. Aber auch bauphysikalisch lassen sich positive Effekte erzielen. Stellt doch die Klebefuge eine einerseits konstruktiv verbindende und andererseits bauphysikalisch trennende Schicht in dem Gesamtsystem dar.

Ein wesentlicher Schlüssel zur Anwendung der Klebetechnologie ist sicherlich die Verarbeitungstechnologie. Noch heute verfügen die meisten Verarbeiter im Bauwesen nicht über die notwendigen Technologien, um solch komplexe Verklebungen herzustellen. Doch auch in diesem Bereich zeichnet sich ein Umbruch ab. In naher Zukunft werden wir uns mit



Freistehende Windturbinen in städtischer Umgebung.

im Hinblick auf Umwelteinflüsse und andere Auswirkungen auf die Umgebung, berücksichtigen. Die Anlagen sollten einen signifikanten Anteil (das heißt mindestens 20 Prozent) des jährlich benötigten Eigenbedarfs an Energie des Gebäudes



Windturm-Studie als offshore-Anlage.

Windkanalversuche und CFD-Studien

Drei grundsätzlich unterschiedliche Integrationsmöglichkeiten von Windkraftanlagen für das städtische Umfeld sind denkbar:

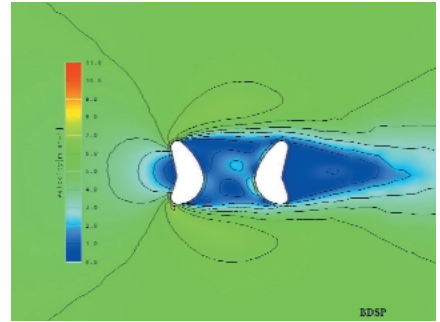
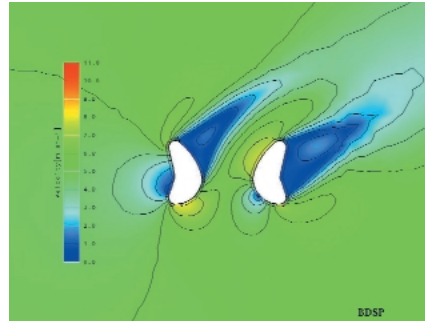
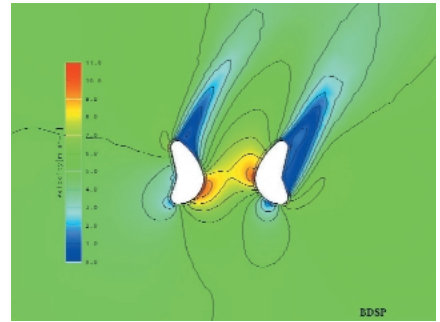
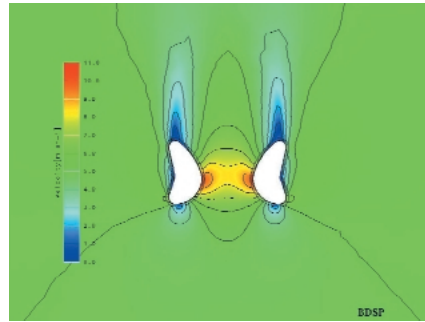
- Vollintegration, bei der die Windturbinen die architektonische Form bestimmen
- Nachrüstung bestehender Gebäude mit Windturbinen
- Landschaftsgestaltung für freistehende Windturbinen zur Einfügung ins städtische Umfeld.

Hochtechnischer Integration stehen einige besondere Probleme entgegen: Weder die Turbine noch das Gebäude können sich in den Wind drehen; die Turbinen werden sich in großer Nähe von Menschen und Gebäuden befinden; die mittleren Windgeschwindigkeiten sind im städtischen Umfeld geringer.

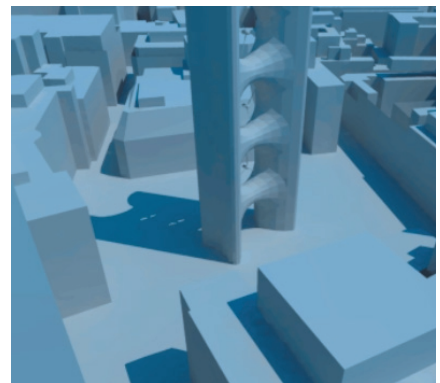
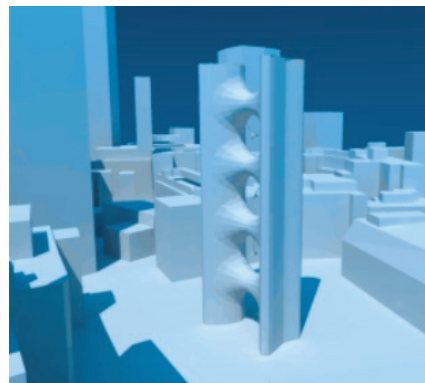
Die Projektpartner stimmten darin überein, unterschiedlichste Gebäudeformen zu untersuchen. Von orthogonalen Blockformen – die aerodynamisch ungünstig sind – bis zu aerodynamisch optimierten, freien Formen. Die aerodynamischen Eigenschaften wurden in Windkanalversuchen an maßstäblichen Modellen und in CFD-Simulationen (Computer Fluid Dynamics) bewertet.

Die Hauptergebnisse dieser Energiestudien waren:

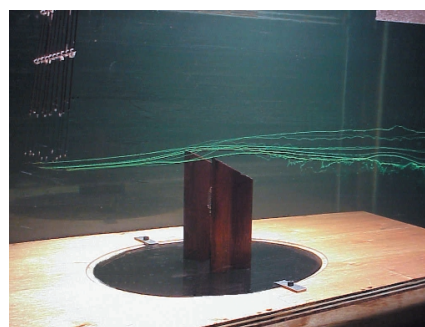
- Optimale Leistungen werden mit glatten, aerodynamischen Freiformen erzielt.
- Türme mit nieren- oder bumerangförmigen Grundrissen haben den besten Einfluss auf die Erhöhung der Durchströmgeschwindigkeit.
- Venturiflügel oder andere Verbindungselemente, welche die Türme verbinden und dabei eine Düse um den Rotor bilden, erweisen sich als höchst effizient, weil sie Verwirbelungen und damit Verlust an Durchströmgeschwindigkeit verhindern.
- Gute Windenergieausbeute wird bei einem Einfallswinkel von 40° - 50° erzielt und selbst bei sehr spitzwinkligem Windeinfall erfolgt ein nennenswerter Durchfluss durch die Düse.
- Das Maß der Kraftverstärkung ist proportional zur Vergrößerung des Massenflusses durch die vom Rotor bestri-



CFD-Studien – Bumerangform.



Studie eines Mehrfachturbinen-UWECS in London.



Visualisierung der Windströmungen im Windkanal.

chene Fläche (das heißt, es ist abhängig von der einfachen Windgeschwindigkeit und nicht von deren 2. Potenz). Die maximale Kraftverstärkung, die direkt erreicht werden kann, bleibt kleiner Faktor 2.

Feldversuche der UWECS-Prototypen

Der Prototyp eines der vielversprechendsten UWECS-Entwürfe – ein aerodynamischer Zwillingturm mit „Bumerang-Grundriss“ – wurde als großmaßstäbliches Modell gebaut und erfolgreich getestet. Der Entwurf resultierte aus einer Reihe von Architektur-, Aerodynamik- und Tragwerksstudien aller beteiligten Partner. Die Firma Mecal führte die Tragwerksberechnung des im Maßstab 1:7 ausgeführten Prototyps durch, der in den Niederlanden von Xkwadrat (X2) ausgeführt, nach England transportiert und am Energy Research Unit am Rutherford Appellation Laboratory (RAL) bei Oxford aufgebaut wurde. Der Energiegewinn, sowohl des Horizontalachsers als auch der Vertikalachsers, wurde von RAL innerhalb und außerhalb des Prototyps (mit und ohne Verbindungselemente) gemessen.



Ansicht des Gebäudeprototypen (M 1:7).



Detailaufnahmen des Gebäudeprototypen (M 1:7).

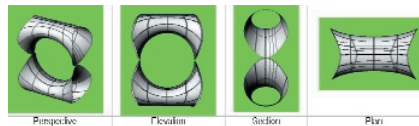
Wurden die Rotoren innerhalb der Gebäudekonfiguration (das heißt in der Düse) aufgestellt, erzeugten sie wesentlich mehr Kraft als konventionelle, freistehende Anlagen auf gleicher Höhe über Gelände. Für den Horizontalachser ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Die Düse erhöht die Windgeschwindigkeit am Rotor um einen Meter pro Sekunde.
- Der integrierte Rotor erweitert den Energiegewinn für ein weites Spektrum des Windeinfallswinkels (+/- 75°) auf das Gebäude.
- Durch das Hinzufügen der Verbindungselemente wird die Durchströmgeschwindigkeit (besonders bei spitzem Winkel) stark erhöht.

Extrapoliert man diese Ergebnisse mit einer Rechenmethode, die im Verlaufe des Projekts entwickelt wurde, würde ein maßstäblich vergrößertes Gebäude mit einem integrierten Horizontalwindantrieb eine mindestens 25 Prozent höhere Energieausbeute in einer typischen städtischen Situation gegenüber einer freistehenden Anlage zur Folge haben.

Weitere Gewinne könnten erzielt werden, wenn es gelänge, die Rotoren – ohne Sicherheitsrisiken – in größeren Höhen anzubringen und von den dort herrschenden höheren Windgeschwindigkeiten zu profitieren.

Um diese Ergebnisse zu bestätigen, sind weitere Versuche im größeren Maßstab und mit größeren Rotoren, die höhere Antriebsenergien benötigen, notwendig.



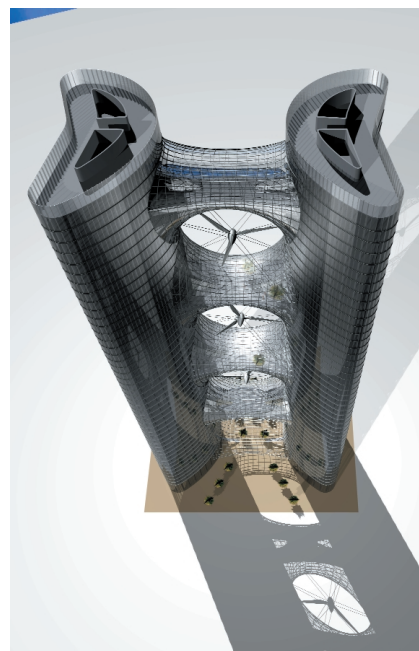
Computerstudien der Verbindungselemente.



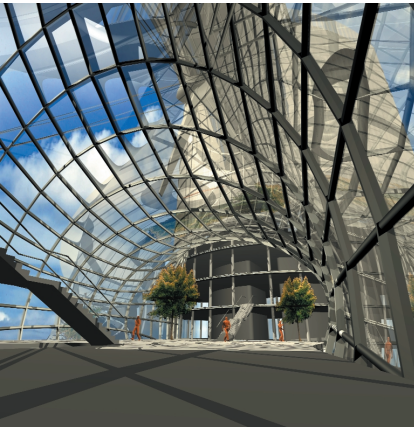
Architektonische Integration

Um die Möglichkeiten der architektonischen Integration von UWECS zu untersuchen, wurden mehrere Konzeptentwürfe für Gebäude im Maßstab 1:1 entwickelt, darunter auch Konstruktionen mit mehreren Rotoren. Sie wurden in detaillierten Architektur- und Computermodellen hergestellt und analysiert.

Aerodynamisch optimale Konstruktionen erweisen sich bezüglich der wirtschaftlichen Raumnutzung möglicherweise als nicht optimal. Sie ergeben auch nicht notwendigerweise energiesparende Gebäude. Vor allem dann, wenn sie tief innen liegende Nutzungsbereiche haben, die aufgrund ihrer Nähe zu den Rotoren mögliche Beeinträchtigungen durch Schallübertragung, Flackern der Rotorblätter, elektromagnetische Störung von Computern, Telekommunikationsgeräten usw. erfahren und deshalb weniger attraktiv und wertvoll sind. Es wäre daher sinnvoll, nicht ständig genutzte Bereiche oder Versorgungszonen (zum Beispiel Technikräume, Aufzüge, Treppen, Gebäudekerne), an die weniger strenge Anforderungen als an normale Büroflächen gestellt werden, in der Nähe der Rotoren unterzubringen. Dort könnten sie eine Pufferrolle übernehmen. Die Innenbereiche der Verbindungselemente, mit der die Zwillingtürme verbunden sind, könnten als interessante Übergangsbereiche gestaltet oder als schwebende Korridore genutzt werden.



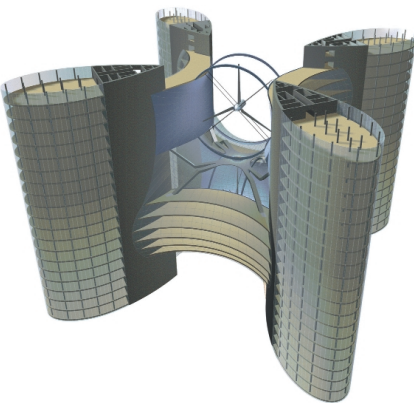
Zwillingturm mit drei integrierten Horizontalachsenerotoren.



Studie eines aerodynamisch geformten Verbindungsflures.

Die bauliche Optimierung von UWECS ist besonders wichtig. Dafür wurden Methodologien und Prototypentwürfe (basierend auf FEM-Analysen) entwickelt, um die speziellen Probleme im Zusammenhang mit UWECS zu bewältigen. Dazu gehören beispielsweise die Entwicklungen von stromlinienförmigen Turbinenaufhängungen für Gebäude, von Sicherheitsnetzen für die Sicherheit von Passanten (und das Sicherheitsempfinden), für den Fall des Versagens einer Turbine, für das Lösen des Drehklang-Schwingungsproblems usw. Auch die wichtigsten externen Umweltfaktoren für städtische Standorte wie die Schallemission und -ausbreitung oder der optische Einfluss wurden ebenfalls anhand von Computermodellen untersucht.

Sofern die technisch-wirtschaftlichen Belange und Umweltauflagen erfüllt werden können, könnten die integrierten Turbinen für ein Zwillingsturmgebäude mit mehreren Turbinen, basierend auf einem erreichbaren durchschnittlichen Leistungsfaktor von 0,1 bis 0,2, etwa 20 Prozent des jährlichen Strombedarfs des Gebäudes decken (das heißt Beleuchtung, Computer, Anlagen und Geräte).



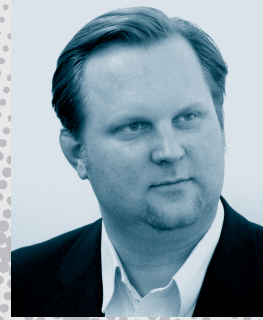
3D-Schnittstudie eines 360 m hohen Windturmes für umlaufende Windrichtungen.

Die Entwürfe zeigen, wie das Konzept der Integration von Windenergie in Gebäuden (UWECS) schlussendlich umgesetzt werden könnte. Die gleichen Grundsätze könnten auch in bescheidenerem Maßstab oder in Form von „Energie- oder Windtürmen“, das heißt zur Stromerzeugung genutzten unbewohnten Bauwerken, die an Land oder offshore platziert werden könnten, angewandt werden.



Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Behling

studierte Architektur in Aachen und arbeitet seit 1987 im Büro Foster and Partners, London. Er ist Professor und Leiter des Instituts für Baukonstruktion und Entwerfen seit 1995. Forschungsschwerpunkte: Solar-Energie, Fassaden-Technologien, Glas und Bionik. Zahlreiche Veröffentlichungen, Ausstellungen, Kongresse, Vorträge und EU-Forschungstätigkeit.



Dipl.-Ing. Architekt Dirk Henning Braun

Architekturstudium in Stuttgart. Seit 2002 Wissenschaftlicher Assistent und Doktorand zum Thema „Bionisch inspirierte Gebäudehüllen“ am Institut für Baukonstruktion und Entwerfen. Mitarbeiter bei Foster and Partners, Architects and Designers, London. Vorlesungen, Vorträge, Seminare und Kongresse, zahlreiche Fachveröffentlichungen. Während des Studiums studentischer Mitarbeiter am Institut für Leichtbau und Entwerfen und in mehreren Architekturbüros. Stipendiat der Studienstiftung des Deutschen Volkes. Praktizierender Architekt, mehrere Preise und Anerkennungen.



Dipl.-Ing. Architekt Andreas Fuchs

In Stuttgart und Barcelona Studium der Architektur. Mitarbeiter und Projektleitung bei Knoche Architekten, Stuttgart, und Schneider + Schumacher, Frankfurt am Main. Seit 2001 am Institut für Baukonstruktion und Entwerfen, Lehr- und Forschungstätigkeit, Schwerpunkt Glas- und transparente Klebetechnologie, Vorlesungen, Vorträge, Seminare und Workshops, Fachveröffentlichungen, Patentanmeldungen und Tätigkeit als Architekt.



Dr.-Ing. Thomas Stark

Ausbildung zum Bankkaufmann, Architekturstudium in Stuttgart. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baukonstruktion und Entwerfen. Forschungs- und Lehrtätigkeiten im Bereich erneuerbare Energie in der Architektur mit dem Schwerpunkt Solarenergie. Vorträge, Veröffentlichungen und Ausstellungen, freiberuflich planende und beratende Tätigkeiten.



Dipl.-Ing. Architekt Peter Seger

Studium der Architektur in Stuttgart und am Illinois Institute of Technology, Chicago. Akademischer Oberrat am Institut für Baukonstruktion und Entwerfen. Produktentwicklung in der Industrie, Lehr- und Forschungstätigkeit mit Schwerpunkt Glas- und Fassadentechnologien. Zahlreiche Fachveröffentlichungen, Kongresse, Vorträge und EU-Forschungs- und Gutachtertätigkeiten. Selbstständige Tätigkeit als Architekt.



Dipl.-Ing. Architektin Tina Volz

Nach dem Studium der Architektur in Stuttgart 1992 Diplom bei Prof. Dr. Kurt Ackermann. Mitarbeiterin bei arat, siegel + partner, Stuttgart, im Renzo Piano Building Workshop, Paris, und bei Thomas Herzog + Partner, München. Seit 1999 Wissenschaftliche Assistentin am Institut für Baukonstruktion und Entwerfen. Neben der Lehrtätigkeit beschäftigt in Planung und Organisation von Ausstellungen und Kongressen zum Thema Glaseinsatz in der Architektur. Seit 2000 Leitung und Dissertation zum Forschungsprojekt Tageslicht und aktive Solarenergienutzung mit Glasprofilen und -rohren in der Fassade.

