

ANNEX II: Bionische Potenziale für Low-Tech Gebäude

Low Tech – High Effect!
Eine Übersicht über nachhaltige Low-tech Gebäude: realisierte Beispiele,
innovative Ansätze, Prinzipien und systemische Lösungswege

F&E Dienstleistung, Prj.Nr.: 850096

DI Susanne Gosztonyi

Energy and Building Design
Architecture and Built Environment
Lund University

Facade Research Group
Design of Construction, Architectural Engineering and Technology
Delft University of Technology

Juli 2016

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	3
1.1. Methodik	4
2. Der Begriff „Low-Tech“	4
2.1. Was benötigt Low-Tech?	5
2.2. Neuinterpretation von „Low-Tech“ Designstrategien	6
2.2.1. Planungs- und Produktionsprozessketten	8
3. Bionik und Architektur	9
3.1. Anwendungspotenziale in Praxis und Forschung	9
3.2. Digitale Methoden und Bionik	12
3.3. Methoden und Prozesse in der Bionik	10
3.3.1. Analyse von biologischen Vorbildern	10
3.3.2. Transfer von Material- und Strukturlogiken	11
3.3.3. Produktion und Umsetzung bionischer Modelle	11
3.4. Architektur(bionik) 2.0?	11
4. Potenziale für „Low-Tech“	13
4.1. Methoden für Planungsprozesse	13
4.1.1. Analyse und Produktoptimierung	14
4.1.2. Parametrische Design- und Produktentwicklung	16
4.2. Methoden für Produktionsprozesse	17
4.2.1. Methoden des Additive Manufacturing	17
4.2.2. Dynamische Materialstrukturen	18
4.2.3. Robotik in der Produktion	20
4.2.4. Robotik im Produktentwicklungsprozess	21
4.2.5. Robotik am Bau	22
4.2.6. Contour Crafting – digitaler Hausbau	22
5. Schlussfolgerungen	23
5.1. Ist „High-Tech“ und „Low-Tech“ ein Widerspruch?	23
5.2. Beitrag der Bionik für Low-Tech	24
6. Referenzen	24

1. EINLEITUNG

Der Fokus auf die Energie- und Ressourceneffizienz von Gebäuden beeinflusst tiefgreifend Planung und Ausgestaltung von Bauwerken. Fragen der architektonischen, konstruktiven und energetischen Qualität müssen im Kontext der Nachhaltigkeit beantwortet werden. Gebäude werden demzufolge vorrangig als leistungsorientierte Systeme betrachtet, deren bauphysikalische und betriebstechnische Fähigkeiten den energetischen und komfortbezogenen Anforderungen gerecht werden müssen. Die daraus resultierenden, hohen technischen Qualitätsansprüche an Bauteile bzw. Technikkomponenten verlangen teilweise hohen Energie- und Materialbedarf in der Produktion und im Betrieb. Der Bedarf an Lösungen, die weniger Energie- und Materialverbrauch sowie geringere Wartung versprechen, ist daher bei steigender Komplexität und Funktionalität sowohl technisch als auch wirtschaftlich betrachtet gross. Innovative „Low-Tech“ Ansätze sollen hierbei einen alternativen Umgang mit diesen Herausforderungen des nachhaltigen Bauens aufzeigen.

Jüngste Entwicklungen in den Bereichen digitaler Design- und Produktionsprozesse schaffen Potenzialräume, um diesen Bedarf zu erfüllen: Integrative multifunktionale Komponenten und dynamisch reagierende sowie bedarfsangepasste Materialien, welche in diesem Sinne digital entwickelt, produziert und eingebaut werden, benötigen weniger Material in der Produktion und keine oder geringere externe Energieversorgung im Betrieb. Parametrische Designmethoden ermöglichen dabei eine flexible aufgabenorientierte Ausgestaltung der Bauelemente oder Baustoffe, welche die lokal vorhandenen, dynamischen Energieströme im Betrieb bestmöglich nutzen können. Aber auch die Planung und Umsetzung von gesamten Bauwerken beinhaltet durch den Einsatz von parametrischem Design ein beachtliches Optimierungspotenzial. Innovative energieeffiziente Baustrategien, die mit minimierten aktiven Energiesystemen auskommen wollen, können auch durch die Verknüpfung von digitalen Designtools und dem Wissen über die traditionelle vernakuläre Baukunst, welche derzeit eine Renaissance erlebt, profitieren. Derartige Massnahmen können unter anderem auch mit dem Begriff „Low-Tech Technologien“ oder „Low-Tech Design“ verbunden werden.

In der Natur gibt es evolutionsbedingt „optimierte Systeme“, die den komplexen Leistungsanforderungen standhalten können während Material- und Energieverbrauch im gesamten Lebenszyklus auf ein Minimum reduziert sind. Die Natur spart an Material durch die Optimierung von Form. Die transdisziplinäre Forschungsdisziplin Bionik nutzt das bestehende Wissen über diese biologischen „Form/Funktionsoptimierungen“, um deren Funktionsprinzipien auf diverse Anwendungsfelder zu transferieren. Vor allem für das Spannungsfeld „High-Tech versus Low-Tech“ bietet die Bionik einen interessanten Input: Die effizienten Funktions- und Materialsysteme der Natur zeigen eine besonders nachhaltige Einfachheit und Robustheit, die dennoch enorm komplexe dynamische Prozesse wie z.B. die Aufrechterhaltung des energetischen Gleichgewichts, der Homöostase, oder die solare Energiegeneration, die Photosynthese, regeln können. Die Vielfalt der Natur bzw. die entdeckten und übersetzten Prinzipien in der Bionik liefern daher auch interessante Anregungen für Low-Tech Gebäude.

Im vorliegenden Bericht wird dieses Spannungsfeld näher beleuchtet und in Kontext mit den neuesten Entwicklungen der digitale Design- und Produktionsprozesse gesetzt, da diese Ansätze für die Form/Funktionsoptimierung am besten umsetzen können. Dabei steht die

Frage nach nachhaltigen Lösungen bzw. energieeffiziente Funktionsweisen in Produktion und im Betrieb im Vordergrund.

1.1. Methodik

Folgende methodische Schritte wurden unternommen:

- Literaturrecherche zu Bionik und Low-Tech Lösungen im Bau, digitales Design und Prozesse mit Bezug auf bionische Projekte und Forschungstätigkeiten,
- Interviews mit ExpertInnen aus digitalen Design, Produktion und Bionik,
- Aufbereitung der Recherche und der Interviews,
- Vorstellung der Erkenntnisse in einem Workshop,
- Dokumentation der Ergebnisse in einem Bericht.

Die Interviews und Wissensaustausch erfolgten über die Forschungsaktivitäten der Autorin zum Thema Bionik und energieeffiziente Architektur an der Lund Universität im Fachbereich „Energy and Building Design“, „Architecture“, an der Technischen Universität Delft im Fachbereich „Design of Construction“, und über das Bioniknetzwerk Biokon International.

Die beschriebenen Beispiele sind auszugsweise und exemplarisch zu betrachten. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit, da aufgrund der dynamischen Entwicklungen, welche in diesem Bereich stattfinden, eine vollständige Erfassung aktueller Möglichkeiten im Rahmen des vorgegebenen Umfangs nicht möglich ist. Der Bericht nimmt daher nur exemplarisch Bezug auf einzelne Lösungsansätze aus der Bionik, die für „Low-Tech“ Gebäude vielversprechend erscheinen.

2. DER BEGRIFF „LOW-TECH“

Eine klare Definition von „Low-Tech“ im Kontext des Bauwesens liess sich in der Recherche nicht finden. Eine der wenigen relevanten Definitionen, die sich finden liess, lautet wie folgt:

„Low Tech. Antithesis of High Tech, it involves the recycling of materials and components and the use of traditional construction, insulation, and natural means of heating and ventilation. Low Tech recognizes the environmental damage done by High Tech through excessive use of resources, and has been applied to the circumstances of poverty-stricken areas, where it has been termed ‘alternative’, ‘intermediate’ and even ‘utopian’ technology. It might involve the harnessing of solar energy or the use of human wastes to generate energy and nutrient for the soil.“ (James Stevens Curl, 2016)

Mit dem Begriff „Low-Tech“ soll meist den Entwicklungen des High-Tech Bereichs im Gebäudebetrieb, wie z.B. intelligente Gebäudemanagementsysteme, ‚smart buildings‘ oder Plus-Energiegebäuden, etc. mit passiven (solaren) bzw. ökologisch-traditionellen Massnahmen, wie z.B. lebenszyklusorientierte Baustoffe, gegengesteuert werden. Im Rahmen der Recherche wurden folgende Begrifflichkeiten zu „Low-Tech“ gefunden:

- Reduktion Technikaufwand
- Einfach bauen bzw „Down-sizing“, „Less is more“

- Ökologisches Bauen
- Konservierendes oder Traditionelles Bauen
- Nutzung lokaler Ressourcen
- Mensch versus Maschine
- Low-Cost

Mit dem Begriff „Low-Tech“ werden also unterschiedlichste Themen verbunden, vom technikreduziertem Bauen, welches mit reduzierter Energietechnik auskommt, bis zur Nutzung von recycelten und naturbelassenen Rohstoffen. Assoziationen mit „Low-Tech“ sind auch in der Katastrophenhilfe zu finden, in der auf Basis des Low-Cost Ziels mit einfachen Mitteln Herbergen geschaffen werden müssen (cp. Architecture for Humanity, 2006) (Shigeru Ban Architects, 1998). In der Produktentwicklung findet sich Low-Tech vor allem im Kontext mit ökologischen Baustoffen bzw. wiederverwendbaren Bauteilen und Materialien (Shigeru Ban Architects, 1998) (Superuse studios, 2009). In der Planung bzw. im integralen Design findet sich Low-Tech im Rahmen des Einsatzes von passiven (solaren) Massnahmen wieder, wie z.B. der Einsatz natürlicher Lüftungsstrategien, welche sich seit vielen Jahren auch bei sogenannten „High-Tech“ Bauwerken, wie auch dem Niedrigstenergie- oder Plusenergie-Gebäude, erhöhter Nutzung erfreut (Zimmermann, 2003). „Low-Tech“ wird auch als Gegenpol zur etwaigen Über-Technologisierung genannt; die Diskussion über eine Kehrtwende weg vom digitalisierten „smart home“ bzw. intelligenten Haus hin zum „menschgerechten Low-Tech“ Gebäude erhitzt die Gemüter in der Fachwelt seit einigen Jahren (ARCH+157, 2001). Das „High-Tech“ Haus, welches mitunter auch noch als dezentrales Kraftwerk fungiert, steht hierbei dem Wunsch nach manueller Kontrolle bzw. Reduktion des Hochleistungssystems gegenüber.

Aktuelle Bauprojekte, wie z.B. das im Jahr 2013 von den Architekten Baumschlager und Eberle fertiggestellte Bürogebäude 2226, nutzen vernakuläres Wissen aus der Baukunst, um Gebäude mit weniger bzw. keiner aktiv zugeführten Energie komforttechnisch versorgen zu können. *„Das Gebäude kommt ohne Heizung, Lüftung und Kühlung aus, in Steuerung der Energieströme zeigt sich der menschliche Eingriff. Vor allem aber, es ist ein Haus aus Stein, mit Wänden, Türen und hohen Räumen. Es benötigt wenig graue Energie, es sorgt dank der elementaren Mittel der Architektur für ein Wohlbefinden, wie es dank der angenehmen Proportionen und dem selbsterklärenden Gebrauch entstehen kann.“* (Baumschlager & Eberle, 2013). Derartige Projekte und Produktentwicklungen haben einen öffentlichen Diskurs zum Thema „Low-Tech“ ausgelöst, welches mitunter als Kontraposition zu dem Begriff „High-Tech“ verstanden wird. Dass High-Tech nicht unbedingt im Gegensatz zu Low-Tech stehen muss, wird im Folgenden näher beleuchtet.

2.1. Was benötigt Low-Tech?

Die Basis für Massnahmen jeglicher Art, ob Low- oder High-Tech, ist die Zielanforderung an das Produkt oder System. Im Bauwesen werden diese durch Ästhetik- und Komfortziele, Energieverbrauchskennwerte, Sicherheits- und Umweltbestimmungen festgelegt. Das Wissen über Materialeigenschaften, physikalische Wirkzusammenhänge und thermodynamische Prozesse sowie örtliche Klima- und Lagebedingungen ist eine essenzielle Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung von Bauwerken nach heutigem Standard. Die Erfüllung dieser Bedingungen erfordert eine holistische Planung und Umsetzung; ob es um die Produktion von Baustoffen und –elementen geht oder die Realisierung eines Bauwerks. Auch Low-Tech Lösungen müssen diesen Ansprüchen

standhalten können. Der Einsatz von Low-Tech in modernen Bauaufgaben kann daher oft nur durch sogenannte High-Tech Tools, digitale Design- und Analysewerkzeuge und digitale Produktionsmethoden, zeitgemäss umgesetzt werden.

2.2. Neuinterpretation von „Low-Tech“ Designstrategien

Ein Spezifika des klimagerechten vernakulären Bauens ist die Ausgestaltung von Raumanordnung, Gebäudeform und Bauteilen auf Basis lokaler klimatischer und kultureller Bedingungen mithilfe einfacher lokaler Baumittel und Baustoffe. Die jeweilige Klimaregion, die Topographie, die Rohstoffe und der sozio-kulturelle Kontext bestimmen hierbei zu einem hohen Masse Typologie und Funktion eines Bauwerks. Bis zur Industrialisierung im späten 19. Jahrhundert war das Wissen um diese Rahmenbedingungen für das Bauwesen essentiell. Durch Technologisierung des Gebäudebetriebs und die Globalisierung der Produktion hat sich der enge Bezug zwischen Lokalität und Bauwerk rasch gelöst, Form und Funktion wurden von der unmittelbaren Umgebung weitgehend freigestellt. Der Einsatz von Haustechnik und High-Tech Produkten zur Bereitstellung eines hohen Innenraumkomforts ermöglichte eine technische Kontrolle der thermodynamischen Austauschprozesse zwischen Innen- und Aussenklima ohne Rücksichtnahme auf die spezifischen lokalen Bedingungen. Die Ausgestaltung des Baukörpers wurde in den gemässigten Klimaregionen auf die Gewährleistung einer luftdichten und wärmedämmenden Gebäudehülle sowie auf die Nutzung/Vermeidung direkter solarer Strahlung reduziert. Die performativen, komfort-relevanten Aufgaben wurden weitgehend aus der architektonischen Gestaltung herausgelöst und zur technisch-konstruktiven bzw. haustechnischen Aufgabe gemacht. Lediglich die Nutzung von Tageslichtqualitäten ist ein architektonisches Gestaltungsziel geblieben.

Der Einsatz von bekannten passiven Baumassnahmen, wie z.B. der solar nutzbare Fensterflächenanteil oder das effektive Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis), reduziert nicht ausreichend den hohen Energieverbrauch im Betrieb. Solare Designstrategien alleine sind also kein Garant für energieeffiziente Gebäude nach heutigem Standard. Bauphysikalisch unterstützende Massnahmen, wie z.B. hohe Wärmedämmung oder Sonnenschutzsysteme, können ein hohes Mass an Energieeffizienz erreichen, schaffen jedoch mit steigender Qualität eine Abhängigkeit von aktiven Technologien, von z.B. kontrollierten Lüftungssystemen oder aktiven Kühlsystemen, welche durch die luftdichte, hoch-wärmedämmende Gebäudehülle notwendig werden. Im Kontext eines nachhaltigen Lebenszyklus von Baustoffen und Bauteilen müssen des Weiteren auch jene Prozesse betrachtet werden, die in der Herstellung und der Wiederverwertung, dem Recycling und der Demontage Energie verbrauchen.

Die vernakuläre Baukunst und die transdisziplinär agierende Bionik bieten hier Lösungsansätze, um Energie und Material gleichermassen in Produktion und Betrieb bei gleichbleibender Qualität zu sparen. Nachhaltige Designstrategien können durch die Zusammenführung dieser Felder zu einem klima-sensitiven „Low-Tech“ Design neu interpretiert werden: Zum Einen kann hochwertiger Komfort und Energieeffizienz über den Einsatz von sogenannten klima-aktiven, reagierenden „Low-Tech“ Materialien, Bauteilen und Systemlösungen erreicht werden; zum Anderen kann durch intelligente „Low-Tech“ Produktionsketten Material- und Ressourcenschonung in Gewinnung, Herstellung und Wiederverwertung gesichert werden, während hohe Design-Flexibilität und Lösungsvielfalt gewährleistet werden kann.

Die Entwicklungstrends, welche in diesem Zusammenhang identifiziert wurden, können wie folgt interpretiert werden:

- *intelligente performative Geometrien* (performatives Design mit inherenter Funktionalität):

Die dreidimensionale Formgebung von Komponenten und Bauformen kann durch den Einsatz parametrischer, multi-kriterieller Analysewerkzeuge eine Performancequalität erreichen, welche mit herkömmlichen Designstrategien nicht möglich ist. Als Beispiel dafür können z.B. geometrisch optimierte Bauteile dienen, welche für spezifische Aufgaben angepasst werden. Dies können z.B. dreidimensionale Knotenverbindungen für Skelettkonstruktionen sein (siehe 4.2.1). Hierbei wird durch numerische Analyse die Form und Struktur an die gewünschten Bedingungen und Anforderungen angepasst und anschliessend über digitale Produktion realisiert, ohne Materialverschwendung. Auch formoptimierte Bauwerke, die über Simulation auf lokale Umweltbedingungen angepasst werden, zählen dazu. Exemplarisch dazu passen z.B. das Swiss Re Headquarters in London, England (Foster + Partners, 2004), bei welchem durch Formoptimierung auf natürliche Lüftungsstrategie und statische Festigkeit eingegangen wird, oder das Plus-Energie Gebäude Umweltarena Spreitenbach in der Schweiz (René Schmid Architekten AG, 2012), dessen Form durch die Maximierung der Solarproduktion bestimmt ist. Bei den letzten beiden Beispielen steht jedoch die Materialnutzungsoptimierung nicht im Vordergrund.

- *Digitale Low-Tech Produkte* (Design von dynamisch agierenden Bauprodukten):

Digitale Low-Tech Produkte können durch computerbasiertes Design und moderner Fertigung von passiven, statischen Produkten zu aktiven, dynamisch reagierenden Systemen mutieren: Durch die Verkettung von physikalischem, konstruktivem und digitalem Wissen werden funktionale Aufgaben direkt in die Produktentwicklung eingebettet; das Material wird sozusagen für ein bestimmtes Verhalten eingesetzt, die Form durch diese Funktion bestimmt. Als Beispiel dafür können exemplarisch z.B. die sogenannten „Materialstrukturen“ aus der Bionikforschung dienen, welche selbst-adaptiv reagieren (z.B. klimasensitive Holzhaut „HygroSkin“ (Menges, Reichert, & Mihaylov, 2013)). Auch wenn bereits einige bionische Produkte erfolgreich in der Praxis realisiert wurden, besteht auf diesem Gebiet noch ein erheblicher Forschungsbedarf.

- *Digitale Fertigung und Bauprozesse* (Fertigung von material/funktionsoptimierten Produkten und Systemen):

Additive Manufacturing (AM) und Robotik werden immer häufiger in Werkshallen bzw. auf Baustellen eingesetzt. Gebäudeteile oder gesamte Bauwerke werden mithilfe digitaler High-Tech Produktionsmethoden erstellt, um Material und Zeit einzusparen während eine hohe Designflexibilität durch die ad-hoc Herangehensweise erhalten bleiben. Bei digitalen Fertigungsprozessen steht die Prämisse, Material sparsam zur Schaffung einer funktionsbestimmten Form einzusetzen, im Vordergrund. Ein Beispiel für den Einsatz von Robotik im Bauprozess bzw. an der Baustelle ist das aktuelle Forschungsprojekt „Baustategien für Roboter auf der Baustelle“ des Instituts Gramazio Kohler Research der ETH Zürich (Gramazio Kohler Research, 2016), welches die potentielle Zukunft mobiler und kooperierender Robotersysteme auf der Baustelle aufzeigt, um die Qualität standardisierter Bauwerke mit den Wünschen flexibler Lösungen zu verknüpfen. Auch hier steht die Prämisse, Material durch optimierte Formgebung sparsamer und effizient einzusetzen, im Vordergrund.

2.2.1. Planungs- und Produktionsprozessketten

Im Kontext der Entwicklungstrends „Digitale Fertigung und Bauprozesse“ muss auch die Lebenszyklusthematik mit einbezogen werden. Low-Tech Massnahmen sind mit Ressourcen- und Energieverbrauch gekoppelt, welcher in allen Phasen des Lebenszyklus stattfindet, in der Rohstoffgewinnung und –verarbeitung, in der Produktentwicklung oder Produktion, im Betrieb, und im Recycling bzw. Abbau (Abbildung 1). Daher können Produkte, die z.B. unter Umgebungstemperaturen und mit wenig Energiezufuhr hergestellt und wiederverwertet werden können, ebenso unter Low-Tech fallen, wie Planungsaufgaben, die den Betrieb eines Gebäudes mit reduzierter Technik ermöglichen. Einige Produktansätze werden im Feld der Kreislaufwirtschaft beschrieben, wie z.B. in der „Cradle to Cradle®“ Initiative, die sich durch die Initiative von (McDonough, W.; Braungart, M., 2002) entwickelt hat.

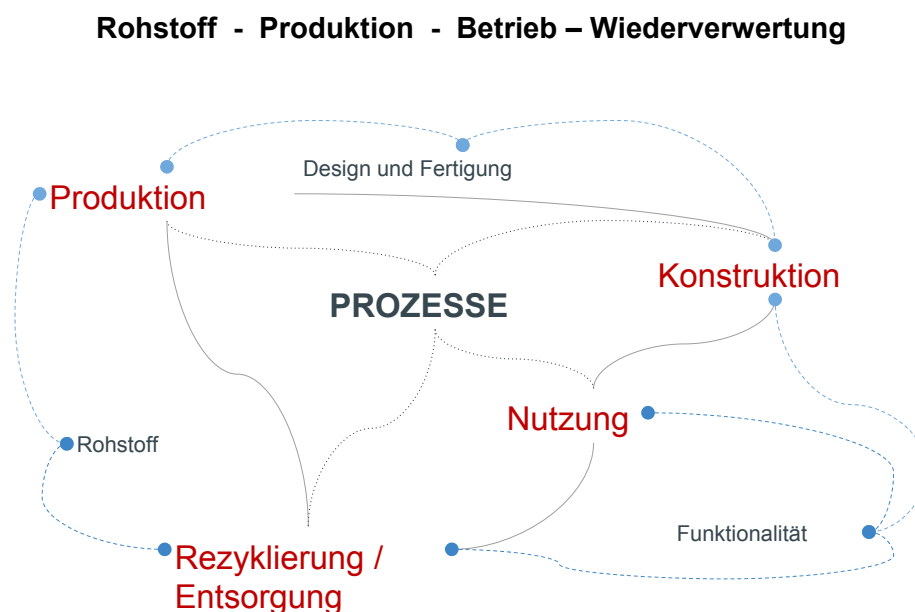


Abbildung 1: Was bedeutet Low-Tech? Kreislaufwirtschaft und Potenzialfelder für Low-Tech Massnahmen

Die traditionellen Prozessketten in der Planung und im Bau zeigen auch den markanten Unterschied zwischen biologischer Evolution und menschlicher Technologie auf: Obwohl Biologie und Technik denselben physikalischen Gesetzen und Rohstoffen unterliegen, sind die Lösungen sehr unterschiedlich. Biologische Organismen sind in der Regel multifunktionale Systeme, die über die Ausgestaltung von funktionsoptimierten Formen eine bestmögliche Einsatzfähigkeit erreichen. Sie müssen mit wenigen einfachen Rohstoffen auskommen, mit denen sie z.B. nicht nur ausreichende mechanische Stabilität schaffen, Wasser und Nahrung transportieren und speichern, und Energie gewinnen (z.B. Photosynthese), sondern parallel auch auf verändernde Umweltfaktoren dynamisch reagieren können und Selbstreparaturfähigkeiten entwickeln. Die Produktion und „Wartung“ dieser hochspezialisierten Systeme erfolgt dabei unter Umweltbedingungen (= Umgebungsdruck und- temperatur), als energiesparender Prozess.

Menschliche Techniksysteeme sind hingegen monofunktionale Systeme, die additiv (hoher Materialverbrauch, Einsatz vieler Rohstoffe) zu einem multifunktionellen Gesamtsystem

zusammengefügt werden und selten allen Kriterien gerecht werden können. Die Komplexität um alle Anforderungen zu steuern, wäre zu hoch. Produktion, Wiederverwertung und Wartung erfolgen im Allgemeinen über erheblichem Energie- und Materialaufwand.

3. BIONIK UND ARCHITEKTUR

Die Herausforderung der modernen Architektur liegt in der Ausgestaltung konstruktiver Lösungen, welche über die Lebensdauer formbar, anpassungsfähig und dynamisch regulierbar sein sollen. Ein Ziel, welches durch traditionelle Design- und Fertigungsprozesse nicht mehr realisierbar ist. In der Architektur sind "Material" und "Struktur" getrennte Systeme, die Konstruktion einer Struktur ist ein hierarchischer Prozess (Knippers & Speck, 2012). Diese Herangehensweise begrenzt die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von Bauwerken, da Tragwerk und Material nicht mit deren jeweiligen Eigenschaften verknüpft sind. Natürliche Konstruktionen zeigen eine grosse Vielfalt in der Verknüpfung von Material und Struktur, die durch Mutation, Rekombination und Wachstum beliebig variiert werden. Der Unterschied liegt darin, dass die Eigenschaften des Materials genutzt werden, um Struktur zu entwickeln. Die Form ergibt sich aus den Eigenschaften der Rohstoffe und Bedingungen der Umgebung.

Die Bionik bietet in diesen Kontext eine mögliche Hilfestellung zur Schaffung von derartigen funktionsorientierten „Materialstrukturen“ (Hensel & Menges, 2008). Durch die systematische Analytik von biologischen Funktionsprinzipien in der Natur können Abhängigkeiten und Eigenschaften sondiert, extrahiert und für Anwendungen in der Technik aufbereitet werden. Wie groß das Potenzial biologischer Ansätze für technische Innovationen sein kann, zeigen unter anderem die Publikationen von (Bar-Cohen, 2006), (Nachtigall, W., Pohl, G. (eds.), 2013), (Stricker, 2006) oder (von Gleich, Pade, Petschow, & Pissarskoi, 2007), die sich mit der Bionik und deren Innovationspotenzial für die Bautechnik und Produktentwicklung auseinandersetzen.

Durch die Verschneidung von Architektur, digitale Methoden und Bionik-Wissenschaft können also neue Architekturformen und –funktionen entwickelt werden, welche nicht nur das lokale klimatische Makro-Umfeld nutzen (vgl. vernakuläre Low-Tech Architektur), sondern auch den erweiterten Mikro- und Nanobereich, um dynamische Anpassung und Interaktion zu ermöglichen (vgl. „digital vernacular“).

3.1. Anwendungspotenziale in Praxis und Forschung

Die Anwendungspotenziale der Bionik im Bauwesen, insbesondere in der Entwicklung von energieeffizienten Baulösungen, wurden bereits in den Forschungsprojekten ‚Baubionik Potenziale‘ (Gosztonyi, Schinagl, Siegel, Haslinger, & R., 2014), und ‚BioSkin‘ (Gosztonyi, Gruber, Judex, Brychta, & Richter, 2013) behandelt, beide wurden von der Autorin im Rahmen des Forschungsprogramms ‚Haus der Zukunft Plus‘ durchgeführt. BioSkin untersuchte das Funktionspotenzial biologischer Vorbilder für die Entwicklung von bionischen Designs für die energieeffiziente Fassade, Baubionik Potenziale schaffte einen Informationsaustausch mit Akteurinnen und Akteuren aus unterschiedlichsten, auch baufremden, Fachbereichen, um das Potenzial der Bionikforschung für Plus-Energielösungen im Bauwesen zu bearbeiten. Bei beiden Projekten wurde deutlich, dass der

Forschungsbedarf dieser jungen innovativen Disziplin im Bauwesen sehr hoch ist und noch wenig „bionische“ Praxislösungen und Produkte auffindbar sind.

Umgesetztes Potenzial der Bionik finden sich vor allem im Bereich der High-Tech Forschungsfelder, wie z.B. Medizinforschung, Aeronautik, Automotivindustrie, Weltraumforschung oder High-Tech Materialien (Nanotechnologien, Optik, etc.), bzw. auch in Wirtschaft und Management, in welcher Bionik für Organisationsoptimierung genutzt wird. In der Architektur und dem Bauwesen wird Bionik als Inspirations- und Methodenpool für *biomorphes Design* (Vincent Julian F.V. et al., 2006), klimagerechte Baustrategien (Nachtigall, W., Pohl, G. (eds.), 2013), oder die Entwicklung von komplexen Bauteilen über generische Algorithmen, wie z.B. die Optimierung von Leichtbaustrukturen über die SKO / CAO Methode (VDI 6224-2, 2012), genutzt.

Bionische Designansätze für realisierte, klimagerechte Gebäude finden sich häufig in Verbindung mit passiver natürlicher Lüftung, wie z.B. für die passive Lüftungsstrategie beim Eastgate Center in Zimbabwe (Mick Pearce, 1996). Architekturbionik umfasst aber auch das Spektrum komplexer Formentwicklungen und -optimierungen. In der Praxis lassen sich hierzu bereits einige Produkte benennen, wie z.B. die biegeelastische Lamelle Flectofin® (ITKE Stuttgart, ITKE Stuttgart, Universität Freiburg, Plant Biomechanics Group, ITV Denkendorf, & claus Markissen, 2013).

3.2. Methoden in der Bionik

Es gibt keine international einheitliche Definition der Bionik, und deren Methoden und Prozesse im Bauwesen. Derzeit bestehen unterschiedliche Interpretationen, von welchen jene für diesen Bericht aufgegriffen werden, die in der Grundlagenstudie Bioskin und in den VDI-Richtlinien 6226 vom VDI-Arbeitskreis Bionik beschrieben wurden (vgl. VDI 6226-1, 2015). In der VDI-Richtlinien 6226-1 „Bionik – Architektur, Ingenieurbau, Industriedesign“ wird in zwei methodischen Herangehensweisen unterschieden: dem *Biology Push* (= Ausgangspunkt ist eine biologische Erkenntnis, die Motivation für eine bionische Forschung und Entwicklung darstellt) oder dem *Technology Pull* (= Ausgangspunkt ist hierbei eine technische Fragestellung, die über bionischen Forschung verbessert oder weiterentwickelt werden soll) (VDI 6226-1, 2015).

Der methodische Ablauf der Bionik wird, stark vereinfacht dargestellt, kann folgendermassen beschrieben werden:

Analyse – Transfer - Umsetzung

Wobei „Analyse“ das Studium und Abstrahieren von biologischen Vorbilder umfasst, „Transfer“ die Extraktion und Abstraktion der funktionalen Eigenschaften, welche übertragen werden sollen (dieses inkludiert diverse wissenschaftliche Analysen und Modellierungen der Vorbildfunktionen), und „Umsetzung“ die Designentwicklung, Programmierung und Fabrikation des technischen Modells beinhaltet.

3.2.1. Analyse von biologischen Vorbilder

Die modernen Methoden und Möglichkeiten eingehender Analysen biologischer Prozesse und Systeme über High-Tech Instrumente ermöglicht die Identifikation und Sondierung von biologischen Phänomenen und Funktionsprinzipien. Die Natur kann in ihren vielschichtigen,

funktionalen und methodischer Ebenen durch digitale Tools und Methoden genauer beobachtet und analysiert werden. Die Analysephase verlangt eine enge transdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Biologie und Technik, im Baubionikbereich auch seitens Design. Digitale Designtools aus der Architektur können hierbei die Funktionsphänomene sichtbar und begreifbar machen.

3.2.2. Transfer von Material- und Strukturlogiken

Die Umsetzung von Eigenschaften biologischer Systeme, wie z.B. hohe Belastbarkeit durch geometrische Anordnung oder Adaptierbarkeit durch eine bestimmten Faseraufbau, mündet in komplexe hierarchische Strukturen, welche in der Lage sind, auf Umweltbedingungen zu reagieren. Selbst eine stark abstrahierte Version biologischer Materialien kann synthetisch mit traditionellen Fertigungsmethoden nicht nachgebaut werden. Durch den Einsatz von digitalen (parametrischen und multi-kriteriellen) Analyse- und Designmethoden können bionische Lösungen entworfen werden, welchen dem Vorbild in der Funktionsweise deutlich näher kommen. Methoden, die dabei angewendet werden, umfassen z.B. mathematische Modelle, die sich generischer Algorithmen bedienen, oder „*Biotemplating, Festkörper-Transformationen, die Herstellung von biomakromolekularen Templates unter milden Milieubedingungen (Soft Chemical Processing) sowie deren Erzeugung mittels biotechnologischer Verfahren*“ (materialsgate (R), 2014), und einiges mehr. Der Einsatz dieser Methoden für die Entwicklung von smarten Strukturen wird in der Architektur bereits erfolgreich eingesetzt.

3.2.3. Produktion und Umsetzung bionischer Modelle

Wie auch bereits in der Transferphase, werden in der Produktion und Realisierung von bionischen Modellen digitale Fertigungsmethoden genutzt. Ein besonderer Ansatz in diesem Kontext ist der Einsatz von Robotern: Gramazio und Kohler (Gramazio Kohler Research, 2016) entwickelten Produktionsprozesse für die Errichtung von komplexen dreidimensional gekrümmten Ziegelwänden mithilfe von Robotern – eine Methode, die manuell zu komplex wäre und die nötige Präzision nicht erreichen würde. In diesem Falle, ist Low-Tech das Ergebnis, der Errichtungsprozess jedoch High-Tech.

3.3. Architektur(bionik) 2.0?

In der Architektur findet sich eine grosse Interpretationsvielfalt „bionischer Architektur“, welche nicht zwingend mit „Bionik“ im Sinne der angesprochenen Definition zu tun hat. Diese Unschärfe stellt die Rolle der Bionik in der Architektur vor einer Herausforderung, welche mit der Bionik in anderen Fachbereichen nicht vergleichbar ist. Andere Bionik-Fachbereiche zeigen wenige alternative Möglichkeiten zu sogenannten bionischen Lösungen, die Funktionsübertragung ist mehr oder weniger klar definiert. In der Architektur lässt sich hingegen eine unübersichtliche Vielfalt an Interpretationen sogenannter „bio-inspirierter“ Bauwerke finden, welche auch durch Definitionsversuche zu Bionik und Architektur, wie die des VDI (vgl. 3.2), nicht differenzierbar sind.

Die Architektur suchte in der Natur seit jeher nach Vorbildern bzw. liess sich durch biologische Organismen zu bautechnischen Entwicklungen inspirieren: Die Diskussion zur ökologischen „grünen“ Architektur lässt sich kaum von Natur und Umwelt trennen, vernakuläre Architektur zeigt Parallelen zu Eigenschaften von Lebensformen (Gruber, 2011),

Form- und Strukturoptimierung lehnte sich auch unabhängig von nachweisbaren Bionikentwicklungen an biologische Vorbilder an (vgl. Buckminster-Fuller, Antonio Gaudi). Es lässt sich daraus ableiten, dass Errungenschaften des Bauwesens immer stark von der jeweiligen Design- und Produktionskompetenz abhängen und die Weiterentwicklung des Bauwesens ein interdisziplinäres Produkt aus Beobachtung und Tests ist. Daher muss Architekturbionik in einem weiter gefassten Kontext betrachtet werden: Sie ist keine Erfindung der Neuzeit, sondern kombiniert Ergebnisse moderner Analysemethoden und -instrumente der Biologie mit dem Handwerkskönnen der Architektur und den progressiven Design- und Produktionsmethoden; Beide, Architektur und Bionik, profitieren davon. Daher wird „Architekturbionik“ in diesem Bericht als wissenschaftliche Methodik argumentiert, die spezifische Abläufe und Methoden aus der Bionik mit architekturrelevanten Methoden kombiniert.

3.3.1. Digitale Methoden und Bionik

Digitale Designtools und digitale Produktionsprozesse, also z.B. die Kopplung von parametrischem Design und Additive Manufacturing (AM), ermöglichen eine flexible sowie material- und zeitsparende Ausgestaltung komplexer Formen bzw. massgeschneiderter, funktional optimierter Bauteile. Den Ausgangspunkt bilden dabei computerbasierte parametrische Designprozesse, bei denen durch die Verknüpfung von statischen und dynamischen Parametern, Bedingungen und Zielvariablen massgeschneiderte Modelle entworfen werden. Dieser Ansatz schafft einen neuen Umgang mit der konventionellen Entwurfsgestaltung: Ein konkretes Design wird nicht mehr als Endprodukt entworfen, sondern über generische Algorithmen beliebig variiert und adaptiert. Mit digitalen Produktionsweisen ist es dann möglich, die individuellen Resultate unterschiedlichster Art und Funktionalität bei gleichbleibender Qualität zu realisieren, und diese - in naher Zukunft – auch material- und kosteneffizient in beliebiger Stückzahl herstellen zu können. Intensive Forschung und Prototypenentwicklung wird hierzu mittlerweile international auf Universitäten und in der Industrie betrieben.

4. POTENZIALE FÜR „LOW-TECH“

Ein möglicher Ansatz für die Kombination „Low-Tech“ im Kontext „Bau und Konstruktion“ und „Bionik“ wird über folgenden Ansatz vorgestellt:

Low-Tech Bau und Bionik = Material + System + Funktionalität in Einem

„Material“ kann in diesem Kontext als ‚ökologisch‘, ‚rezyklierbar‘ und ‚nachwachsend‘ gelten (wobei hier die Rohstoffnutzung miteinbezogen wird), welches über den bionischen Ansatz effizienter eingesetzt wird (Minimierung des Materialeinsatzes, Maximierung der materialeigenen Funktionalität); „System“ kann als ‚Bauweise‘ betrachtet werden, welche im Sinne der biologischen Baupläne funktional gesteuert wird; im Kontext mit Low-Tech spielt auch das traditionelle Handwerk mit Fokus auf eine moderne Interpretation eine mögliche Rolle in der Systemoptimierung, da eine mögliche Reduktion aktiver Technologien durch den Einsatz passiver oder integraler Strategien verfolgt wird. Und „Funktionalität“ wird letztendlich durch Material- und Systemkombination gewährleistet, mit der Prämisse, Energieeffizienz und hohen Komfort zu erreichen.

„Low-Tech“ Ansätze im angesprochenen Kontext können dann folgendermassen integriert werden:

- Robuste, nachhaltige Low-Tech Bauwerke und Bauteile, die durch digitale Planungs- und Konstruktionsverfahren geschaffen werden können,
- Massnahmen in der Produktion, welche dynamische Eigenschaften in ein Bauteil integrieren und dadurch die Architektur des Materials oder des Bauteils reagieren kann. „Form follow Function“ kann in diesem Kontext pointierter interpretiert werden.

Für diesen Bericht wurden Bionikpotenziale für Low-Tech über drei Felder, ‚digitale Planung‘, ‚digitale Produktion‘ und ‚Robotik‘, zusammengefasst, da Bionik mit diesen Bereichen eng in Interaktion steht.

Bionikpotenziale und Low-Tech	4.1 Methoden für Planungsprozesse
	4.2 Methoden für Produktion
	4.3 Robotik

4.1. Methoden für Planungsprozesse

Die Integration von haustechnischen und energietechnischen Funktionen in Bauteile zur Steigerung der Gesamtpomformance eines Gebäudes erfährt durch den Einsatz von digitalen Entwurfs- und Produktionstechniken einen fundamentalen Wandel. Während Haus- und Energietechniksysteme derzeit noch autonome, additive Systeme im Bauwerk sind, könnten sie künftig durch intelligent konstruierte Materialsysteme (Hensel & Menges, 2008) ersetzt werden. Materialsysteme bzw. -strukturen reagieren vergleichbar dynamisch und selbstständig auf Witterungsverhältnisse oder Komfortabweichungen, sind jedoch keine

technischen Einzelsysteme mehr, sondern das Baumaterial selbst – die Funktionen werden durch spezifische Strukturierung des Materials ermöglicht (vgl. Abbildung 2). Mithilfe des Computational Designs kann das morphogenetische Potenzial von Materialien derart gestaltet werden, dass z.B. formvariiierende, thermoadaptive, lichtemittierende, energiegenerierende oder -speichernde Aufgaben direkt durch die Materialstruktur erfüllt werden. Im Betrieb können derartige Bauteile als Low-Tech bezeichnet werden.

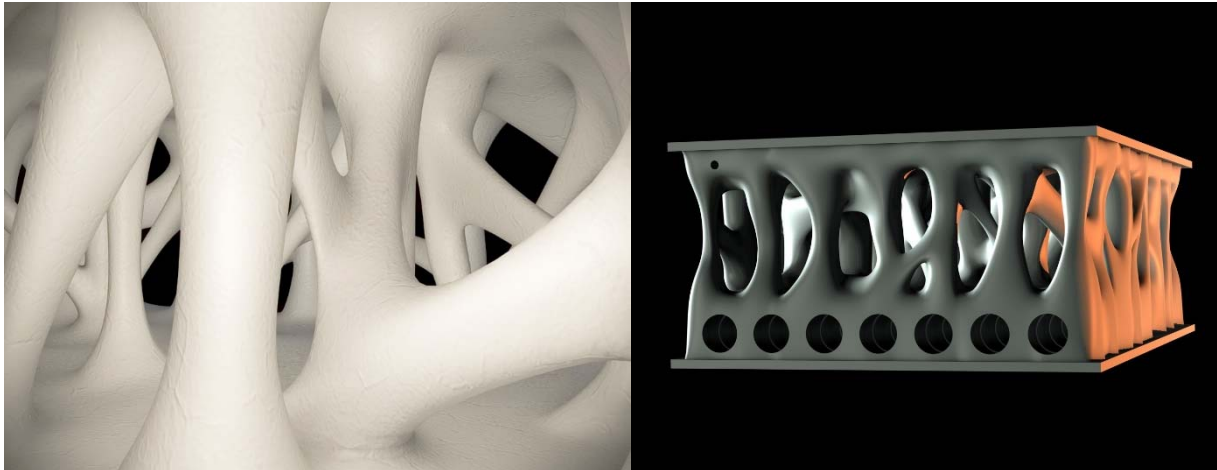


Abbildung 2: Funktionsorientiertes Design von Materialstrukturen mit eingebetteten Leitkanälen und Leichtbaustruktur. Bildquelle @ Dr. Marcel Bilow, TU Delft, 2014

Um derartige Produkte schaffen zu können, müssen digitale Analyse- und Planungsmethoden genutzt werden.

4.1.1. Analyse und Optimierung

High-Tech Analysewerkzeuge, digitale Simulationstools und mathematische Modellentwicklungen helfen, biologische Prozesse zu verstehen und nachzubilden. Die Bionikforschung hat in den letzten Jahrzehnten durch die Weiterentwicklung dieser Methoden nicht nur einen beachtlichen Aufschwung erfahren, sondern diese Entwicklung auch vorangetrieben. Mithilfe von generischen Algorithmen können z.B. ideale Lastpfade ermittelt werden und in Leichtbaustrukturen umgesetzt werden. Auch Zellstrukturen und Knochenwachstum können simuliert werden, um mögliche Anpassungsstrategien für künstliches Material zu untersuchen. Natürliche Strukturen sind z.B. gewichts- und materialoptimierte, redundante und hochdifferenzierte Strukturen (z.B. Knochengewebe), welche durch bionische Methoden, wie z.B. der SKO (Soft Kill Option) und der CAO (Computer Aided Optimization) Methoden von Claus Mattheck (KIT - IAM Institut für Angewandte Materialien, 2012), in deren Eigenheiten untersucht und nachgebaut werden können.

Die wissenschaftlichen Analysen der Eigenheiten von biologischen Genotypen und Phenotypen unterstützt das Verständnis über die jeweilige Formausgestaltung, die physikalischen Wirkzusammenhänge und Fähigkeiten, und die eigentliche Endform und den Nutzen des Organismus. Dieses führt des Weiteren zu unterschiedlichsten technischen Lösungen, auch in der Architektur. So hat unter anderen z.B. Andres Harris (Harris, 2011) Leichtbaustrukturen aus sehr dünne Lamellen digital nachgebildet, deren Vorbild spongiösen Gewebe (Vogelschädel) sind und deren Besonderheit das hohe Festigkeit-zu-Gewicht Verhältnis ist: Der Aufbau ungerichteter Spongiosazellen wird durch pneumatisierte Zellen

konfiguriert, die Luftporen zwischen den festen Materialbereichen schaffen und so das Gesamtgewicht der Struktur ohne Beeinträchtigung seiner Festigkeit reduzieren. Die sich daraus ergebende Konfiguration ist eine sehr starke und leichte Materialstruktur (Abbildung 3).

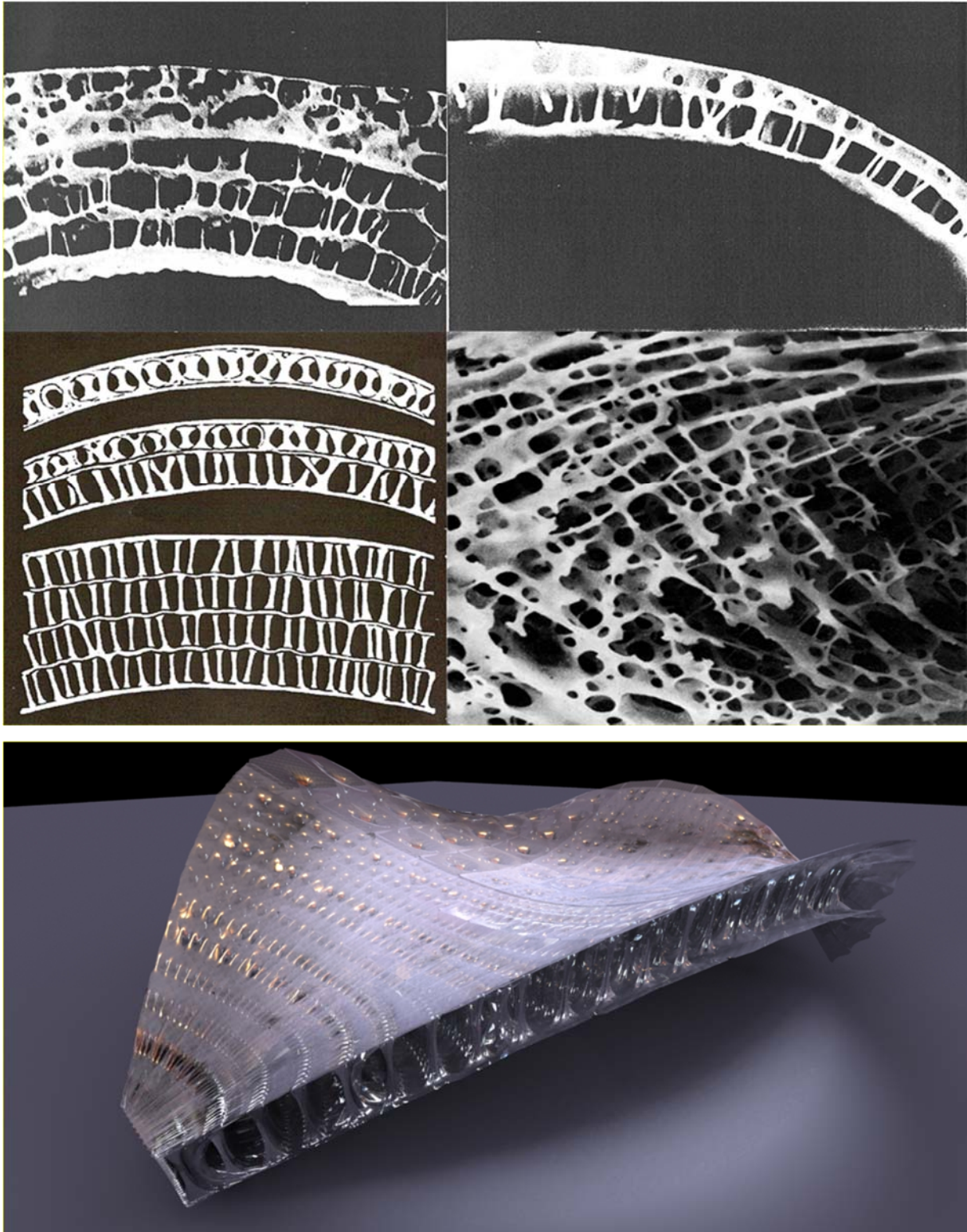


Abbildung 3: Studie über Strukturoptimierung - Cancellous Bone Tissues: High Strength to Weight ratio © Andres Harris, London (Quelle: <http://www.andres.harris.cl/about/32-2/>)

4.1.2. Parametrische Design- und Produktentwicklung

Computer Aided Design (CAD) Software, kombiniert mit parametrischen Analyse- und generischen Optimierungsalgorithmen, ermöglicht die Entwicklung von Bauformen und Bauteilen, die einer Aufgabe individuell und materialoptimiert angepasst werden können, um letztendlich ohne aktive Energiesysteme auszukommen – also Low-Tech Kriterien zu erfüllen. Die Kenntnisse aus der Bionikforschung unterstützen hierbei die Nutzung der spezifischen Materialeigenschaften und die Integration der gewünschten Funktion in die Form-/Strukturentwicklung. Hierzu können die bionischen Forschungspavillons der Universität Stuttgart als Beispiel dienen: Über die Kooperation mehrerer Forschungsinstitute (ICD

Institut für Computational Design, ITKE Institut für Tragswerkslehre und Konstruktives Entwerfen) der Universität Stuttgart und Industriepartner werden in prototypischen Versuchreihen unterschiedliche neuartige (robotische) Fertigungsmethoden und Forschungsentwicklungen im Materialbereich mit Bionik verknüpft und in bionischen Pavillons umgesetzt. Die Ausgangspunkte der bionischen Pavillons bilden jeweils bionische Analysen von biologischen Vorbildern (z.B. Schalentragwerke in der Natur, Abbildung 4), welche über parametrische Designmethoden in bautechnische Lösungen transferiert werden.

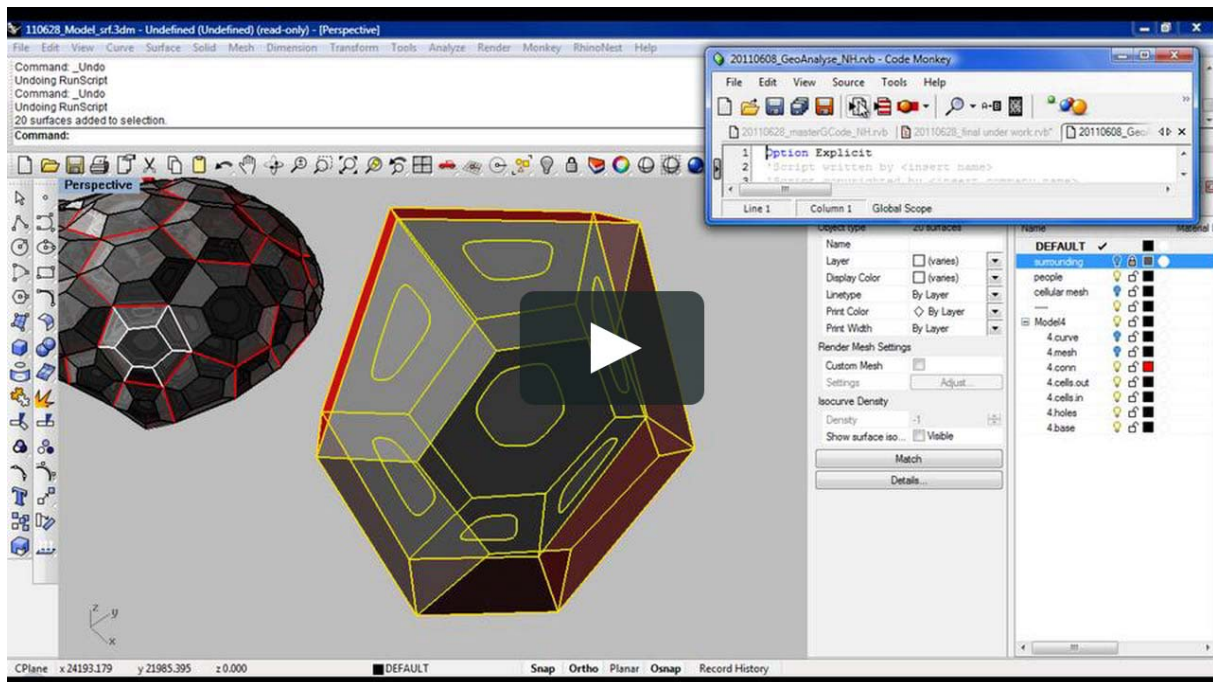


Abbildung 4: ICD / ITKE Forschungspavillon 2011 – NC code generation © Oliver David Krieg, ICD, Universität Stuttgart (Quelle: <https://vimeo.com/32754714>)

Digitale Designtools bieten auch in allgemeineren Aufgaben oder in Frühstadien der bionischen Designentwicklung gute Unterstützung an: Formstudien von evolutionstechnisch optimierten Organismen können parametrisch untersucht werden und mithilfe der Tools mit den jeweiligen standortbezogenen Umgebungskriterien verknüpft werden. Dies ermöglicht das Verstehen und Lernen der lokalen Formentwicklungen, und die Verknüpfung traditioneller Bauweisen mit den Erkenntnissen aus bionischen Studien (Abbildung 5).

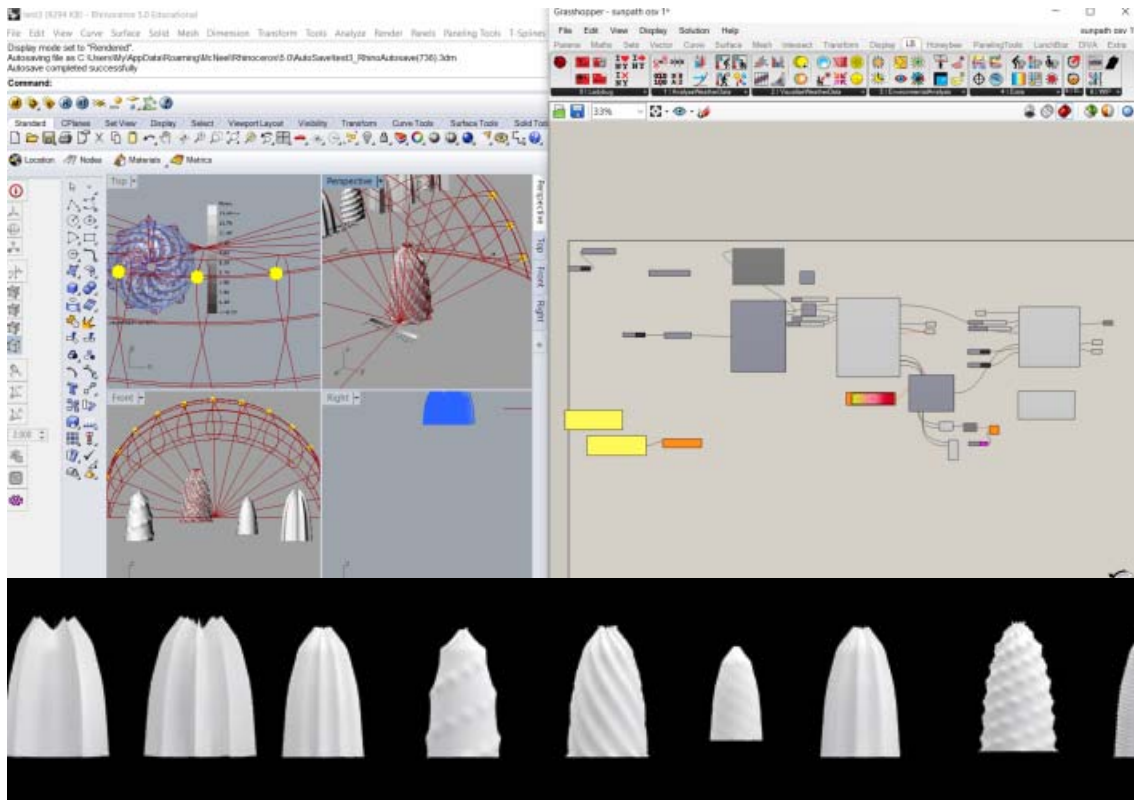


Abbildung 5: Parametrische Studien zur Kaktusform über Software „Rhinoceros“, „Grasshopper“ im Rahmen des Masterkurses „Spatial Experiments 2“, Architektur, Lund Universität (2016) © My Brandt, LTH, 2016 (Quelle: <https://spatialexperiments.wordpress.com/2016/02/03/plants-in-desert-climate/>)

4.2. Methoden für Produktionsprozesse

4.2.1. Additive Manufacturing

Eine grosse Hürde war bislang die Realisierung der digital erstellten Designs, da herkömmliche Fertigungsverfahren damit schlicht überfordert waren. Hier fällt dem Additiven Manufacturing (AM) die entscheidende Rolle in der Weiterentwicklung und Umsetzbarkeit von bionischen Produkten zu.

Die Qualität von schichtweise aus einem Grundmaterial, wie z.B. Kunststoff, Metall oder mineralische Stoffe, aufgebauten AM Produkten ist bereits auf einem sehr hohen und ausgereiften Niveau. Sie haben das Potenzial zur wirtschaftlichen Umsetzbarkeit von vorgefertigten, modularen Lösungen, welche architektonisch flexiblere Konstruktionen im Bauwesen erlauben. Zu berücksichtigen ist der Aufwand und die Größe des Produkts. AM Techniken bzw. Rapid Prototyping eignen sich heute vor allem zur Herstellung komplexer Einzelteile, wie z.B. der komplexe dreidimensionale Fassadenknoten *Nematox II* von Holger Strauß (Strauß, H., 2013), welcher im Rahmen seiner Forschungsarbeit an der TU Delft entstand (Abbildung 6), oder zur schnellen Umsetzung von Prototypen in kleinen Skalierungen.

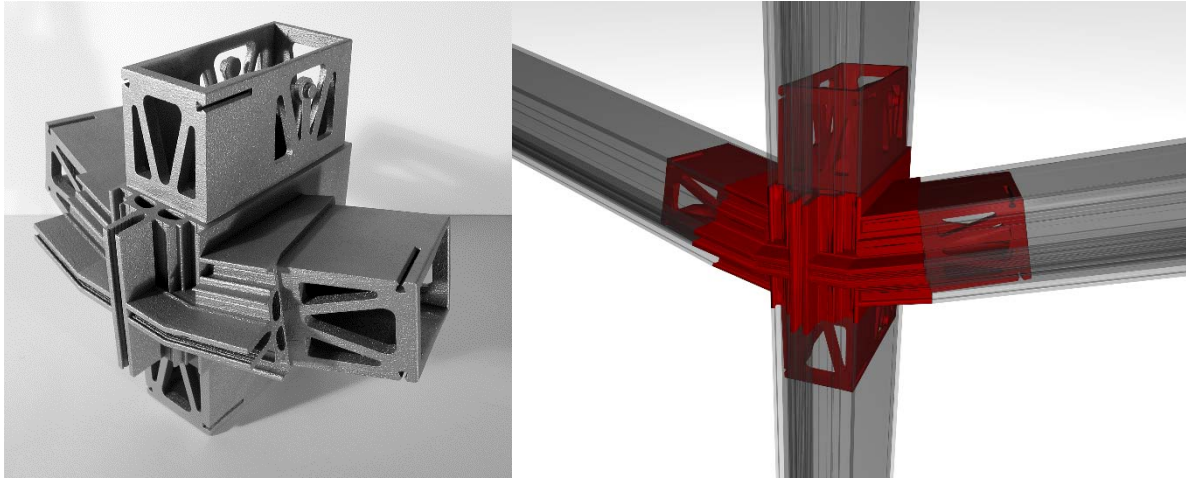


Abbildung 6: Nematox II, 3D-Fassadenknoten, Dr.-Ing. Holger Strauß, Hochschule OWL, TU Delft, mit Kawneer Alcoa. Bildquelle © H. Strauß, 2013

4.2.2. Dynamische Materialstrukturen

Die dynamischen Spezifika biologischer Strukturen, wie z.B. die Reaktionsfähigkeit von z.B. anisotropen, hygroskopischen Materialien, können mithilfe computerbasierter Entwicklungstools mit den modernen Anforderungen seitens Bauwerk, Komfort und Effizienz verbunden werden und mithilfe moderner Fertigungstechniken als smarte „Low-Tech“ Materialien realisiert werden. Nachwachsende Rohstoffe, wie Zellulose, können so als Baustoff neu interpretiert werden – und sind dann nicht nur Low-Tech, sondern auch Low-Cost und recycelbar. Die Entwicklung von bionischen Materialstrukturen bietet daher auch die Chance, High-Tech Funktionen und Nachhaltigkeit innovativ zu verbinden.

Dass auch traditionelle und/oder ökologische Rohstoffe, wie Holz oder Lehm, für die Entwicklung von aktiven Materialstrukturen herangezogen werden können, zeigen die Prototypen von *emerging objects™*: Deren „Cool Brick“ ist z.B. ein digital gedruckter, poröser Keramikziegel, der das Prinzip der Verdunstungskühlung nutzt. Er nimmt wie ein Schwamm Wasser auf und ermöglicht Kühlung durch die dreidimensionale, offenporige Gitterstruktur, die Luft durchlässt (Abbildung 7). Auch die Arbeiten von Peter Brian (Brian, 2014) können in diesem Zusammenhang genannt werden, der in seinem Design Lab Workshop ‚digital modelling and parametric scripting‘ einsetzt, um Low-Tech Ziegel („Building Bytes“) zu entwickeln.

Weitere Institutionen, wie das amerikanische Bionik-Forschungszentrum WYSS (WYSS Institute, 2016), das MIT Media Lab (MIT Media Lab, 2016), oder die ‚Plant Biomechanics Group Freiburg‘ der Universität Freiburg (Plant Biomechanics Group Freiburg, 2016) arbeiten an smarten Materialien, die als passive Sensoren nicht nur Bedingungsänderungen orten, sondern auch darauf reagieren können – ohne aktiver Technik oder externer Energie.

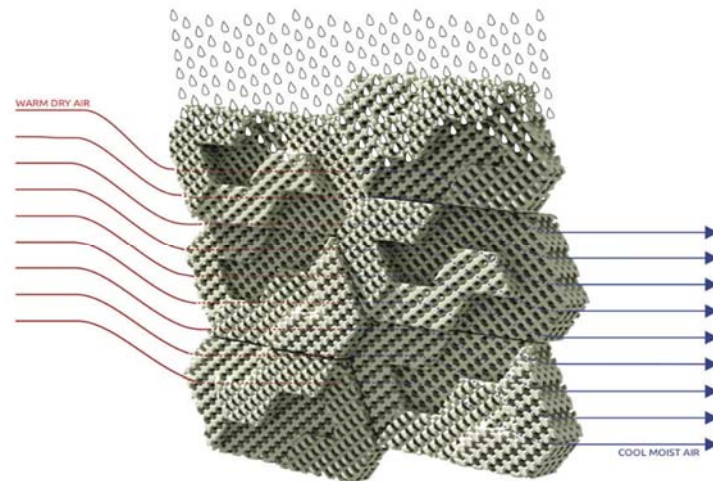


Abbildung 7: 'Cool Brick', digital brick development, emerging objects © emerging objects, Virginia San Fratello & Ronald Rael, 2014 (Quelle: <http://www.emergingobjects.com/2015/03/07/cool-brick/>)

Manche dieser bionisch inspirierten Materialstrukturen wurden auch bereits für Praxisanwendungen getestet, wie z.B. das elastische Biegeverhalten von Holzfaserwerkstoffen in Bezug auf den relativen Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung im Zuge des Forschungsprojekts *HygroSkin* vom ICD, Universität Stuttgart (Menges, Reichert, & Mihaylov, 2013). Dabei wurde das morphogenetische Funktionspotenzial des Holzes ausgeschöpft, durch welches der bewährte Werkstoff in eine neue Dimension der intelligenten adaptiven Materialien gehoben wird (Abbildung 8). Und ganz nebenbei erfüllt Holz auch die Kriterien von Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz.

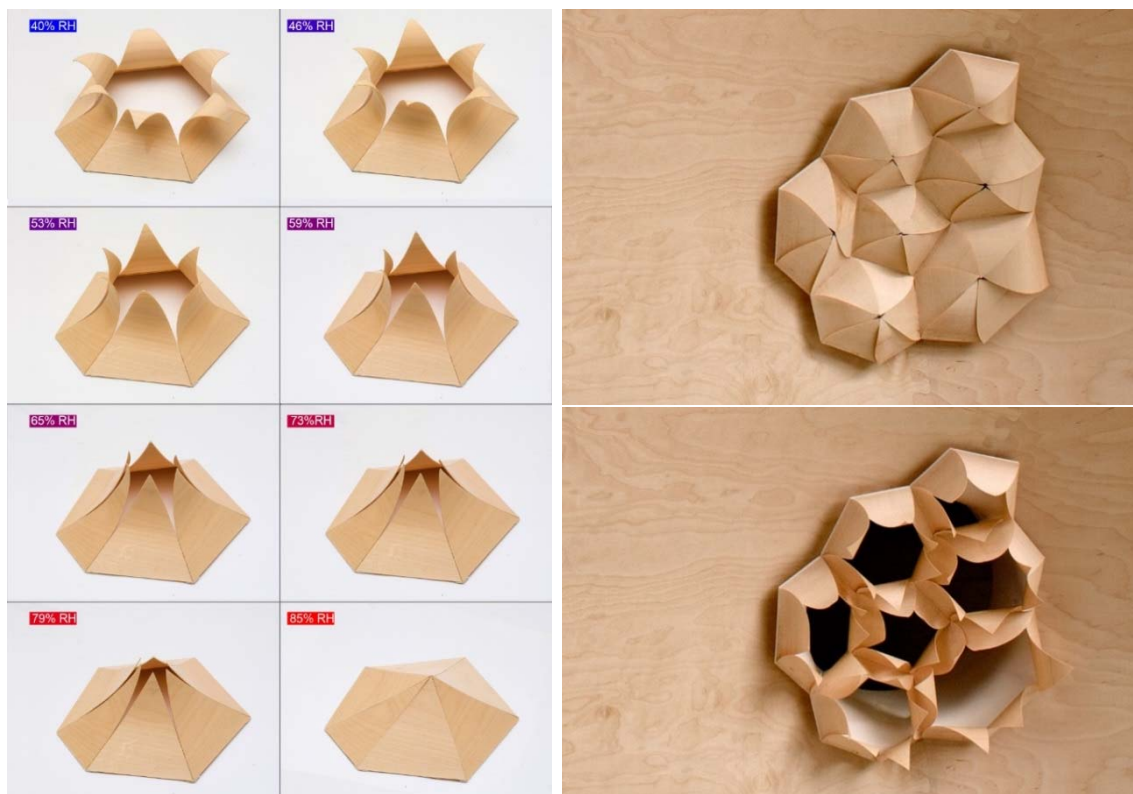


Abbildung 8: HygroSkin - Meteorosensitiver Pavillon (Permanent Collection, FRAC Centre Orléans), ICD Uni Stuttgart. Bionische Prototypentwicklung eines adaptiven, formverändernden Furnier-Verbundelements aus Ahorn, welches sich je nach Feuchtegrad der Umgebung selbstregulierend elastisch verbiegt. Bildquelle © ICD Universität Stuttgart, 2013

Ein weiteres marktreifes Produkt in der Reihe bionischer Bauelemente ist das bionische Verschattungssystem Flectofin® des Forschungsteams ITKE Universität Stuttgart, Plant Biomechanics Group Universität Freiburg, ITV Denkendorf (Lienhard, et al., 2011).

Die Produktion von bionischen Low-Tech Produkten, welche High-Tech Funktionen ausführen können, ist derzeit meist noch im Vorentwicklungsstadium. Es darf aber angenommen werden, dass in naher Zukunft derartige Produkte verstärkt auf den Markt kommen werden. Exemplarisch für die rasche Entwicklung in diesem Bereich kann z.B. Airbus genannt werden, welche bionische Methoden und AM anwenden, um Leichtbau und hohen Belastungen neu zu interpretieren (Additive Manufacturing. Amazing AM, LLC, 2016).

Auch sind digitale Produktionsmethoden, wie das 3D Printing, für die Prototypenentwicklung neuer Funktionsmaterialien von Vorteil, da die Erstellung von digital erzeugten Prototypenserien im Vergleich zu konventionellen Prototypenbau sehr zeit- und kosteneffizient vonstatten geht. Biologische Funktionsweisen können damit über unterschiedliche Modelle getestet und sondiert werden (Abbildung 9).

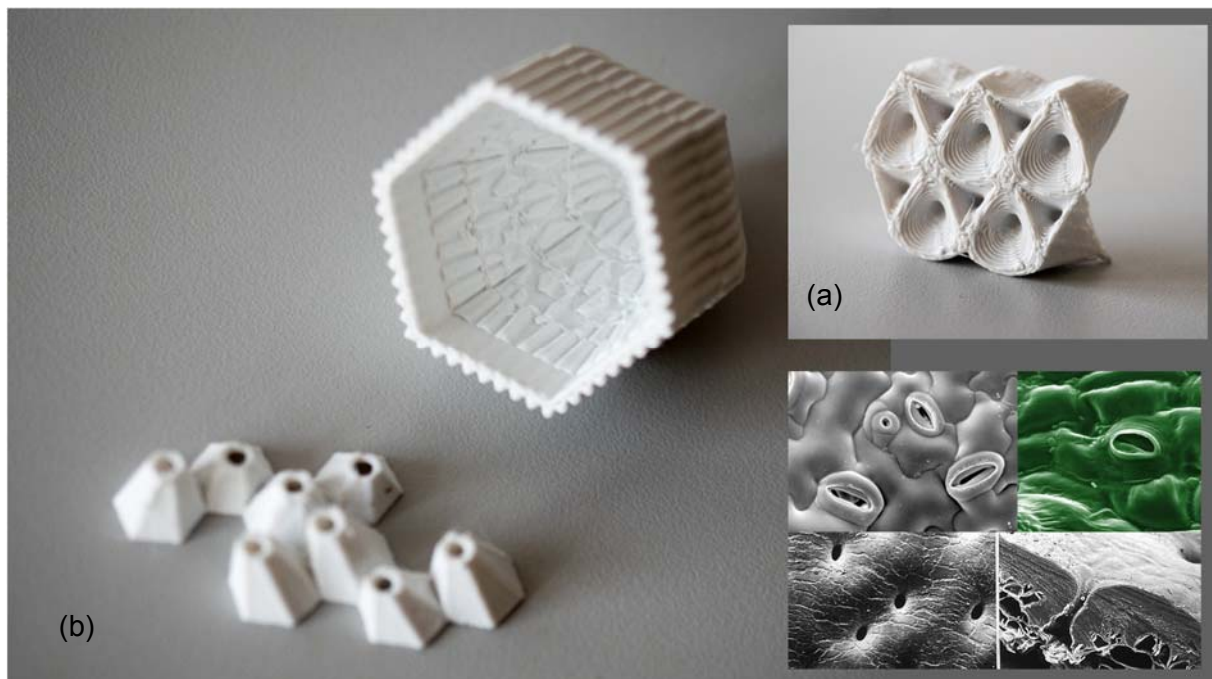


Abbildung 9: Bionisch-architektonische Abstraktion der pflanzlichen Stomata als permeable Ziegelstrukturen (a) oder akustische Ziegelamplituden (b), Parametrische Studien, Prototypen im Rahmen des Masterkurses „Spatial Experiments 2“, Architektur, Lund Universität (SS2016) © Polina Moroz and Matthew Wilson, LTH, 2016 (Quelle: <https://spatialexperiments.wordpress.com/2016/02/03/plants-in-desert-climate/>)

4.3. Robotik

Der Einsatz von Robotik in Bauprozessen ausserhalb der klassischen Produktentwicklungskette wird manchmal als eine sogenannte „dritte industrielle Revolution“ bezeichnet. Automatisierte Produktion im Bauwesen bleibt hierbei nicht bei der Design- oder Produktentwicklung stehen, sondern nutzt die Vorteile von Robotersystemen zur digital gesteuerten Umsetzung von Bauwerken. Dieser Form der Automatisierung des Bauprozesses ist weitgehend noch in der Prototypen- bzw. Entwicklungsphase.

Das Ziel ist, Architektur vor Ort, also auf der Baustelle selbst, individuell und effektiv umzusetzen – ohne auf die hohe Präzision und Qualität einer komplexen Planungsvorgabe

verzichten zu müssen. Durch den Einsatz von Industrierobotern kann die Präzision und Qualität erreicht werden, welches über traditionelle Wege nicht möglich ist. Bisher kam die Vorfertigung von Bauteilen und –elementen in Werkshallen diesen Kriterien am nächsten. Die In-situ Fabrikation von Bauwerken ist derzeit noch umstritten, und hat durchaus auch technische Grenzen. Einige der Hürden konnten jedoch bereits genommen werden, wie jüngste Entwicklungen im sogenannten „Contour crafting“ zeigen: Gesamte Bauwerke werden dabei mithilfe von digitalen Druckmethoden hergestellt, vorwiegend derzeit aus Beton. Bauten aus diesem Werkstoff können durch AM bei erheblicher Einsparung von Material und Konstruktionszeit gleiche Funktions- und Tragfähigkeit gewährleisten. Ein aktuelles Beispiel bietet dazu das chinesische Bauunternehmen HuaShang Tengda, welches in 45 Tagen eine Villa von 400m² realisiert hat (3DPrint.com, 2016).

4.3.1. Robotik im Produktentwicklungsprozess

Die vielerorts entstandenen *FabLabs*, ursprünglich als offene Werkstatt für Personen gedacht, die mittels industrieller moderner Produktionsverfahren (Rapid Manufacturing, 3D-Printer, CNC Maschinen, etc.) neue Ideen ausprobieren oder sich mit den Prozessen vertraut machen wollen, rücken immer stärker in die Rolle als Produktentwicklungszentren. Beispielgebend dafür ist, unter vielen ähnlichen Institutionen, z.B. das DTU Skylab der Technischen Universität Dänemark (DTU Skylab, 2016) – ein voll ausgestattetes Prototypenentwicklungslabor, welches als Drehscheibe zwischen Forschung und Wirtschaft fungiert und sowohl Studenten in der Ausbildung als auch Start-Ups oder etablierten UnternehmerInnen die Möglichkeit bietet, Ideen in Produkte umzusetzen. Initiativen, wie „smart geometry“ (sg2016:Hybrid Domains, 2016), die jedes Jahr ein globales Event umsetzen, bei welchem die kollaborative Zusammenarbeit zwischen Architektur, Design und Ingenieurwesen im Vordergrund steht, nutzen verstärkt AM Prozesse und Robotik.

Im Kontext mit Low-Tech wären die Entwicklungen mit ökologischen Basistoffen zu erwähnen, wie z.B. der Printer „FabClay“, welcher Architekturelemente aus Lehm „druckt“: Eine CNC Fräse wurde hierzu „gehackt“ und mit einem Arduino-gesteuerten Kopf versehen und an einen Industrieroboter angeschlossen (Abbildung 10, links). Der Roboter ermöglicht es, lehmartige Materialien aller Formen in begrenzter Grösse zu drucken. Die Entwicklung des Roboters war eine Studienarbeit am Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) in Barcelona, welches die Potenziale der AM in der Architektur auslotet (IAAC, 2016).



Abbildung 10: Beispiele digital gesteuerter Produktionstechniken und Industrierobotik im Bauwesen/Architektur, v.li. n. re.: FabClay, IAAC (Quelle: <https://iaac.net/fab-labs/>, <https://vimeo.com/49450015>); WASP 3D Printing mit Lehm, In-Situ Roboter (Quelle: <http://www.wasproject.it/w/en/stampiamo-insieme-la-prima-casa-di-terra/>)

Diese Beispiele könnten um viele ähnliche Aktivitäten ergänzt werden, stehen hier jedoch vor allem beispielhaft dafür, dass AM Techniken und Robotik in der Produktion und Prototypenentwicklung in der Architektur bereits angekommen sind.

4.3.2. Robotik am Bau

Industrierobotik als Unterstützung an der Baustelle selbst ist ein sehr junges Feld, welches schnell Raum erobert. Z.B. wurde das niederländische Unternehmen MX3D 2015 mit der Idee, eine Stahlbrücke mittels Roboter 3D-Druckverfahren herzustellen, weltweit bekannt (MX3D, 2016). Die mobilen mehrachsigen Industrieroboter werden mit 3D Druckköpfen und einer speziellen Software ausgestattet, um komplexe dreidimensionale Strukturen einer Brücke aus Metall umsetzen zu können (Abbildung 11, links). Diese Technik verspricht Kosteneffizienz und ist beliebig skalierbar. Die Brücke soll 2017 gebaut werden.

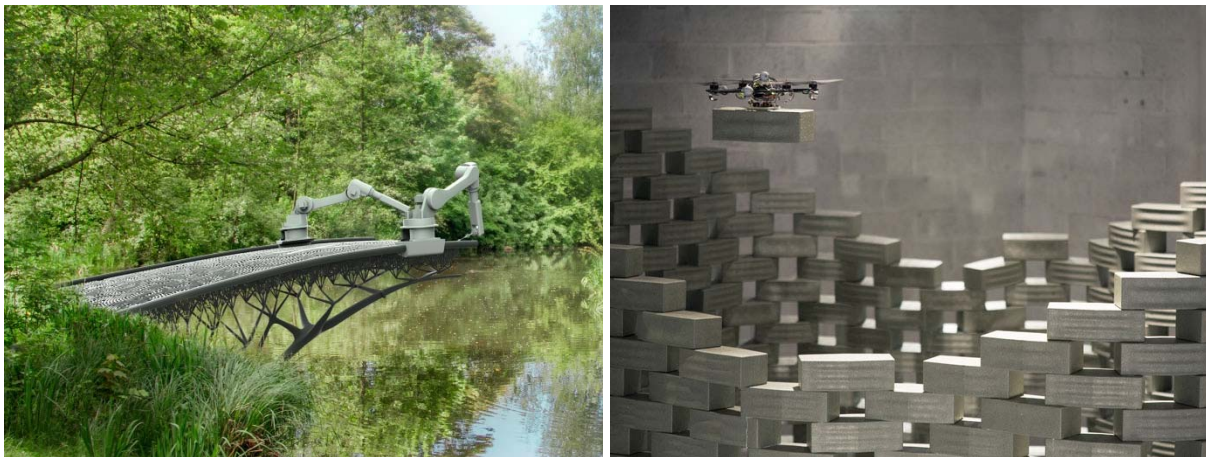


Abbildung 11: Beispiele von In-Situ Robotik im Bauwesen/Architektur, v.li. n. re.: MX3D – Metallbrücke, Amsterdam, NL (Quelle: <http://mx3d.com/news/mx3d-to-3d-print-steel-bridge/>); Gramazio Kohler Research, Flight Assembling Architecture (Quelle: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/209.html>)

Die Forschungsgruppe Gramazio Kohler an der ETH Zürich beschäftigt sich ebenso mit den Einsatzmöglichkeiten von Robotik direkt an der Baustelle und im Allgemeinen mit den Herausforderungen verändernder Design- und Produktionsbedingungen in der Architektur durch digitale Methoden und Tools (Gramazio Kohler Research, Robotik, 2016). Eines ihrer Forschungsprojekte nutzte mobile, fliegende Roboter, *Quadrocopter*, welche komplexe dreidimensionale Strukturen aus Ziegelsteinen zusammensetzen können (Abbildung 11, rechts).

4.3.3. Contour Crafting – digitaler Hausbau

Bereits am Markt getestet sind Contour Crafting Methoden, computergestützte Verfahren zur Errichtung von grossvolumigen Produkten, im Bauwesen also ganze Gebäude. Vollautomatische Portalroboter werden hierzu eingesetzt, um – meist - Beton über Printtechniken in die gewünschte, digital eingegebene Form zu bringen. Derartige Entwicklungen sind vor allem derzeit in den USA (Khoshnevis, 2016) und in China (3DPrint.com, 2016) zu verfolgen. Die treibende Motivation hinter diesen Projekten ist nicht nur die Zeit- und Kosteneffizienz, sondern auch die Optimierung gewisser statischer

Funktionen durch ein exaktes Druckverfahren – in China z.B. zielt man hierbei auf die Entwicklung von kosteneffizienten, erdbebentauglicher Bauten ab.

Ein weiterer Antrieb für grossvolumige 3D gedruckte Gebäude ist das Potenzial, erschwingliche, ökologische Häuser herstellen zu können. Der Entwickler von WASP (World Advanced Saving Project), Massimo Moretti, hat z.B. das Ziel, die Entwicklung von In-Situ Robotern für sogenannte „Zero-Miles“ Häuser, also Häuser die vor Ort ohne Transportwege hergestellt werden können, voranzutreiben. Die Idee ist, dass Häuser mit lokalen natürlichen Materialien, in diesem Fall Lehm, hergestellt werden – über digitale Designprozesse diese überdies noch hinsichtlich Klima und Komfort optimiert werden können unterstützen (Abbildung 10, rechts). Die Gebäude sollen so wenig Energie wie möglich benötigen, schnelle und kostengünstige Hilfe für Katastrophengebiete anbieten oder die Bedürfnisse einer schnell wachsenden Weltbevölkerung in armen Regionen.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die angeführten Beispiele zeigen die unterschiedlichen Bandbreiten und Potenziale auf, die die Verknüpfung von Bionik und digitalen Design- und Produktionsmethoden für Low-Tech ermöglichen. Da zu „Low-Tech“ keine eindeutige Definition existiert, könnte ein Kriterium sein, materialsparende aber funktionsoptimierte nachhaltige Lösungen zu entwickeln – dabei muss High-Tech nicht unbedingt in Widerspruch zu Low-Tech stehen.

5.1. Ist „High-Tech“ und „Low-Tech“ ein Widerspruch?

Der Kontrapunkt zu Low-Tech Gebäuden, das „intelligente Haus“, welches mit intelligenter Gebäudetechnik vollautomatisiert auf klimatische Änderungen und Nutzerwünsche reagiert, oder das „hochtechnisierte Haus“, das High-Tech Materialien und Systeme nutzt um höchstmöglichen Komfort und Energieeffizienz zu gewährleisten, bedeutet nicht unbedingt eine Abkehr von nachhaltigen und sozial-/umweltverträglichen Zielen. Die Einbettung von „Intelligenz“ in den Baustoff selbst, ermöglicht durch ein besseres Anwenden von Rohstoffeigenschaften wie die Natur vorgezeigt, und ist nur über High-Tech Design und Produktion realisierbar. Diese smarten Produkte ermöglichen selbst-reagierendes Verhalten ohne auf fehleranfällige Technikteile oder Steuerungssysteme angewiesen zu sein.

Die Komplexität hinter der Reaktionsfähigkeit smarter Produkte, egal ob High-Tech oder Low-Tech, ist für NutzerInnen meist unsichtbar und löst oft Unbehagen aus. Die Frage, ob der Mensch das selbsttätige Steuern und Regulieren des Gebäudes akzeptieren kann, ob über materialinherente oder additives Verhalten, ist daher viel komplexer als die Diskussion über eine mögliche Reduktion von Technik eines Baukonzepts. Selbst wenn Materialien mechanische, sensorische Funktionen übernehmen können, dabei material- und energieeffizient produziert wurden und im Betrieb hohe Energieeffizienz- und Komfortziele erfüllen während die materialtechnische Einfachheit und Robustheit des Baus hoch ist, ist die Akzeptanz der BewohnerInnen eine Frage der persönlichen Bereitschaft. Umweltpsychologie und Humanpsychologie werden immer öfter in Forschungsvorhaben zu innovativen Technologien eingebunden, um diese vernachlässigte bzw. mangelhaft interpretierte Anforderung des Menschen, die subjektive Akzeptanz und sozialpsychologische Verträglichkeit, besser integrieren zu können. Low-Tech im Sinne der Intelligenz von modernen Gebäuden muss daher in einem ganzheitlicheren Rahmen diskutiert werden.

Low-Tech in einem technischen, prozessorientierten Zusammenhang hingegen kann mit den beschriebenen Methoden und Verfahrenstechniken umgesetzt werden.

5.2. Beitrag der Bionik für Low-Tech

Die Kombination von Bionik mit digitalen Design und Fertigungsverfahren verspricht nicht nur eine Optimierung der Produkte, sondern auch der Prozesse. Bionische Materialien können die Komplexität der Systemteile reduzieren ohne die Komplexität in der Funktion einbüßen zu müssen.

Ein „nachhaltig v4.0“ könnte in diesem Sinne bedeuten, dass Haustechnik, Regelung, Statik, usw. Bestandteil eines nachhaltigen (ökologischen) Baumaterials werden, geschaffen durch die kollaborative Nutzung von multikriteriellen, parametrischen Tools, von Wissen aus der Bionik, von Bautechnik- und Rohstoffwissen, Umweltfaktoren, physikalischen Wirkzusammenhängen und Interaktionszielen mit NutzerInnen.

6. REFERENZEN

- 3DPrint.com. (2016). *Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 Days*. Abgerufen am 04. 07 2016 von <https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/>
- Additive Manufacturing. Amazing AM, LLC. (2016). *Airbus Group – Pioneering Bionic 3D Printing; Learning from Nature*. Abgerufen am 13. 05 2016 von <http://additivemanufacturing.com/2016/01/27/airbus-group-pioneering-bionic-3d-printing-learning-from-nature/>
- ARCH+157. (2001). *Sobeks Sensor oder Wittgensteins Griff?* (157 Ausg.). ARCH+.
- Bar-Cohen, Y. (2006). Biomimetics - using nature to inspire human innovation. *Bioinspiration & Biomimetics*, 1, P1-P12.
- Baumschlager & Eberle. (2013). *baumschlager eberle: 2226*. Abgerufen am 12. 05 2016 von <http://www.baumschlager-eberle.com/projekte/projektetails/project/buerogebaeude.html>
- Brian, P. (2014). *Building Bytes*. Abgerufen am 20. 01 2016 von Building Bytes - 3D printed bricks: <http://buildingbytes.info>
- DTU Skylab. (12. 06 2016). *Labs and Workshops*. Von Technical University of Denmark - DTU Skylab: http://www.skylab.dtu.dk/facilities/labs_and_workshops abgerufen
- Foster + Partners. (2004). *Foster and Partners: 30 St Mary Axe London, UK (1997-2004)*. Abgerufen am 16. 06 2016 von <http://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe/>
- Gosztonyi, S., Gruber, P., Judex, F., Brychta, M., & Richter, S. (2013). *BioSkin - Forschungspotenziale für bionisch inspirierte energieeffiziente Fassadentechnologien*. Vienna: BMVIT, Schriftenreihe 46/2013.

- Gosztanyi, S., Schinagl, C., Siegel, G., Haslinger, E., & R., K. (2014). *Baubionik Potenziale - Interdisziplinäre Identifikation und Aufbereitung von innovativen bionischen Schlüsseltechnologien für "Plus-Energie Gebäude der Zukunft"*. Wien: BMVIT, Schriftenreihe 25/2014.
- Gramazio Kohler Research. (2016). *Gramazio Kohler Research: Aktuelle Forschungsprojekte*. Abgerufen am 16. 06 2016 von <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/index.html>
- Gramazio Kohler Research, Robotik. (12. 07 2016). *Flight Assembled Architecture, 2011-2012*. Von ETH Zürich, Gramazio Kohler Research: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/209.html> abgerufen
- Gruber, P. (2011). *Biomimetics in Architecture. Architecture of Life and Buildings*. Vienna: Springer Verlag.
- Harris, A. (2011). *1.0 Biomimetics: Structure Optimisation_Cancellous Bone Tissues*. Abgerufen am 12. 06 2016 von <http://www.andres.harris.cl/about/32-2/>
- Hensel, M., & Menges, A. (31. 07 2008). Material und Struktur: Form- und Materialwerdung. *ARCH+ 188: Form Follows Performance*, S. 18-25.
- IAAC. (12. 07 2016). *Fab Labs*. Von IAAC - Institute for advanced architecture of Catalonia: <https://iaac.net/> abgerufen
- ITKE Stuttgart, U. F., ITKE Stuttgart, Universität Freiburg, Plant Biomechanics Group, ITV Denkendorf, & claus Markissen. (6. 6 2013). *flectofin(R) - A Hinge-less Flapping Mechanism Inspired by Nature*. Von ITKE Universität Stuttgart: http://www.itke.uni-stuttgart.de/flectofin/flectofin_brochure.pdf abgerufen
- James Stevens Curl. (2016). *"Low Tech." A Dictionary of Architecture and Landscape Architecture. Encyclopedia.com*. Abgerufen am 28. 07 2016 von <http://www.encyclopedia.com/doc/1O1-LowTech.html>
- Khoshnevis. (12. 07 2016). *Behrokh Khoshnevis*. Von USC Viterbi School of Engineering: <http://www.bkxhoshnevis.com/> abgerufen
- KIT - IAM Institut für Angewandte Materialien. (2012). *Strukturmechanik - Bauteiloptimierung nach dem Vorbild der Natur*. Abgerufen am 13. 07 2016 von <https://www.iam.kit.edu/wbm/496.php>
- Knippers, J., & Speck, T. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspir. Biomim.*(7), 10pp.
- Lienhard, J., Schleicher, S., Popping, S., Masselter, T., Milwich, M., Speck, T., & Knippers, J. (2011). Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature. *Bioinspiration & Biomimetics*, 6(4), 045001.
- materialsgate (R). (2014). *Bionik: Neue bioinspirierte Materialien für innovative Anwendungen*. Abgerufen am 14. 05 2016 von <https://www.materialsgate.de/de/mnews/53182/Bionik+Neue+bioinspirierte+Materialien+f%C3%BCr+innovative+Anwendungen.html>
- McDonough, W.; Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle, remaking the way we think things*. new York: North Point Press.

- Menges, A., Reichert, S., & Mihaylov, B. (2013, - -). *HygroSkin. Meteorosensitive Pavilion*. (ICD Universität Stuttgart) Retrieved 02 18, 2014, from www.achimmenges.net
- Mick Pearce. (1996). *Eastgate Development Harare*. Abgerufen am 13. 04 2016 von <http://www.mickpearce.com/works/office-public-buildings/eastgate-development-harare/>
- MIT Media Lab. (25. 01 2016). *MIT media lab, MIT School of Architecture and Planning*. Von Mediated Matter - Designing for, with, and by nature: <https://www.media.mit.edu/research/groups/mediated-matter> abgerufen
- MX3D. (25. 01 2016). *3D print steel bridge*. Von MX3D: <http://mx3d.com/news/mx3d-to-3d-print-steel-bridge/> abgerufen
- Nachtigall, W., Pohl, G. (eds.). (2013). *Bau-Bionik. Natur - Analogien - Technik* (2. Ausg.). Springer Verlag.
- Plant Biomechanics Group Freiburg. (25. 01 2016). *Plant Biomechanics Group Freiburg*. Von Botanischer Garten, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: <https://www.botanischer-garten.uni-freiburg.de/forschung> abgerufen
- René Schmid Architekten AG. (2012). *Umweltarena, Spreitenbach (2012)*. Abgerufen am 16. 06 2016 von <http://reneschmid.ch/projekte/weitere-projekte/detail/umweltarena>
- sg2016:Hybrid Domains*. (10. 4 2016). Von smart geometry: <http://smartgeometry.org> abgerufen
- Shigeru Ban Architects. (1998). *Paper Tube Architecture from Rwanda to Kobe*. Japan: Chikuma shobo Publishing Co., Ltd.
- Strauß, H. (2013). AM Envelope, The potential of Additive Manufacturing for façade construction. In *Architecture and the Build Environment #01/2013*. Delft University of Technology.
- Stricker, H. (2006). *Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens* (PhD thesis Ausg.). Munich: Technische Universität München.
- Superuse studios. (03. 09 2009). *Superuse Studios. (No) Flat Future project*. Abgerufen am 14. 02 2016 von <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2009/09/03/no-flat-future>
- VDI 6224-2. (2012). *Bionische Optimierung - Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturemechanischen Optimierung technischer Bauteile*. Berlin: VDI-Gesellschaft.
- VDI 6226-1. (2015). *Biomimetics - Architecture, civil engineering, industrial design. Basic principles*. Berlin: VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences (TLS), Fachbereich Bionik.
- Vincent Julian F.V. et al. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3, 471-482.
- von Gleich, A., Pade, C., Petschow, U., & Pissarskoi, E. (2007). *Bionik - Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale*. Berlin/Bremen: Universität Bremen, BMBF.
- WYSS Institute. (25. 01 2016). *Novel 4D printing method blossoms from botanical inspiration*. Von WYSS Institute, Harvard University: <http://wyss.harvard.edu/viewpressrelease/239/> abgerufen

Zimmermann, M. (2003). *Handbuch der passiven Kühlung. Rationelle Energienutzung in Gebäuden*. Fraunhofer IRB Verlag.

6.1. Abbildungen

Abbildung 1: Was bedeutet Low-Tech? Kreislaufwirtschaft und Potenzialfelder für Low-Tech Massnahmen

Abbildung 2: Funktionsorientiertes Design von Materialstrukturen mit eingebetteten Leitkanälen und Leichtbaustruktur. Bildquelle @ Dr. Marcel Bilow, TU Delft, 2014

Abbildung 3: Studie über Strukturoptimierung - Cancellous Bone Tissues: High Strength to Weight ratio © Andres Harris, London (Quelle: <http://www.andres.harris.cl/about/32-2/>)

Abbildung 4: ICD / ITKE Forschungspavillon 2011 – NC code generation © Oliver David Krieg, ICD, Universität Stuttgart (Quelle: <https://vimeo.com/32754714>)

Abbildung 5: Parametrische Studien zur Kaktusform über Software „Rhinoceros“, „Grasshopper“ im Rahmen des Masterkurses „Spatial Experiments 2“, Architektur, Lund Universität (2016) © My Brandt, LTH, 2016 (Quelle: <https://spatialexperiments.wordpress.com/2016/02/03/plants-in-desert-climate/>)

Abbildung 6: Nematox II, 3D-Fassadenknoten, Dr.-Ing. Holger Strauß, Hochschule OWL, TU Delft, mit Kawneer Alcoa. Bildquelle © H. Strauß, 2013

Abbildung 7: ‘Cool Brick’, digital brick development, emerging objects © emerging objects, Virginia San Fratello & Ronald Rael, 2014 (Quelle: <http://www.emergingobjects.com/2015/03/07/cool-brick/>)

Abbildung 8: HygroSkin - Meteorosensitiver Pavillon (Permanent Collection, FRAC Centre Orléans), ICD Uni Stuttgart. Bionische Prototypentwicklung eines adaptiven, formvariierenden Furnier-Verbundelements aus Ahorn, welches sich je nach Feuchtegrad der Umgebung selbstregulierend elastisch verbiegt. Bildquelle © ICD Universität Stuttgart, 2013

Abbildung 9: Bionisch-architektonische Abstraktion der pflanzlichen Stomata als permeable Ziegelstrukturen (a) oder akustische Ziegelamplituden (b), Parametrische Studien, Prototypen im Rahmen des Masterkurses „Spatial Experiments 2“, Architektur, Lund Universität (SS2016) © Polina Moroz and Matthew Wilson, LTH, 2016 (Quelle: <https://spatialexperiments.wordpress.com/2016/02/03/plants-in-desert-climate/>)

Abbildung 10: Beispiele digital gesteuerter Produktionstechniken und Industrierobotik im Bauwesen/Architektur, v.li. n. re.: FabClay, IAAC (Quelle: <https://iaac.net/fab-labs/>, <https://vimeo.com/49450015>); WASP 3D Printing mit Lehm, In-Situ Roboter (Quelle: <http://www.wasproject.it/w/en/stampiamo-insieme-la-prima-casa-di-terra/>)

Abbildung 11: Beispiele von In-Situ Robotik im Bauwesen/Architektur, v.li. n. re.: MX3D – Metallbrücke, Amsterdam, NL (Quelle: <http://mx3d.com/news/mx3d-to-3d-print-steel-bridge/>); Gramazio Kohler Research, Flight Assembling Architecture (Quelle: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/209.html>)