

Michael Wimmer, Iva Kovacic, Peter Ferschin, Florian Rist, Michael Hensel, Kristina Schi-  
negger, Stefan Rutzinger, Hannes Kaufmann, Martin Kilian, Christian Müller, Ivan Izmestiev,  
Georg Nawratil, Josef Füssl, Milena Stavric, David Hahn, Georg Suter

# Advanced Computational Design - Digitale Methoden für die frühe Entwurfsphase

Im SFB „Advanced Computational Design“ werden Entwurfswerkzeuge und -prozesse durch multi- und interdisziplinäre Grundlagenforschung entwickelt. Das Ziel ist, durch eine neue Generation von Computational Design Methoden höhere Entwurfsqualität und effizientere Prozesse in Architektur und Bauwesen zu ermöglichen.

Die Forschung wird in drei Bereichen durchgeführt: Entwurfsmethodik (A1), visuelle und haptische Entwurfsinteraktion (A2) und Formfindung (A3). Der Bereich A1 umfasst die konzeptuelle Grundlage für neuartige digitale Entwurfsmethoden basierend auf Lernmethoden. Zudem werden die in den Bereichen A2 und A3 entwickelten Computational-Design Werkzeuge und Methoden in einer Plattform verknüpft. Der Bereich A2 ermöglicht Designer:innen neuartige Feedback-Kanäle in digitalen Werkzeugen durch Lichtsimulation und haptisches Feedback. Im Bereich A3 werden die Randbedingungen im Formfindungsprozess hinsichtlich Geometrie, Material, Mechanik und Statik untersucht. Die Schwerpunkte liegen in der Unterteilung von komplexen Flächen in Paneele, der Analyse von formaktiven Strukturen, sowie der Modellierung und experimentellen Analyse von neuartigen Kompositmaterialien. Die Exploration von Entwürfen in Interaktion mit intelligenten Materialmodellen und Algorithmen zur Bewertung der Tragstruktur dient einerseits der Entwicklung eines methodischen Ansatzes für die Entdeckung von neuen Möglichkeiten in der Formfindung, und ermöglicht die experimentelle Validierung andererseits.

**Stichworte** Entwurfsmethodik; Entwurfsinteraktion; Formfindung; Digitalisierung; Simulation

## **Advanced Computational Design**

*The SFB “Advanced Computational Design” addresses the research question how to advance design tools and processes through multi- and interdisciplinary basic research. We will develop advanced*

*computational design tools in order to improve design quality and efficiency of processes in architecture and construction. The proposed research is structured in three areas: Design Methodology (A1), Visual and Haptic Design Interaction (A2) and Form Finding (A3).*

*A1 focuses on the conceptual basis for new digital methods of design based on machine learning. A1 also acts as a platform for integrating and evaluating the computational tools and methods developed in A2 and A3. A2 investigates real-time global-illumination and optimization algorithms for lighting design, as well as a new method for large-scale haptic interactions in virtual reality. In A3, form finding will be explored regarding geometric, mechanical and material constraints, in particular: paneling of complex shapes by patches of certain surface classes while optimizing the number of molds; algorithms for finding new transformable quad-surfaces; mechanical models for an efficient simulation of bio-composite material systems. Furthermore, new ways of form finding will be explored through physical experiments, which will allow for reconsidering model assumptions and constraints, validating the developed algorithmic approaches, and finding new ones.es.*

**Keywords** design methodology; design interaction; form finding; digitalization; simulation

## 1 Einleitung

Architektur und Bauwesen gehören zu den Branchen mit den größten Auswirkungen auf Gesellschaft und Umwelt. Sie sind ein wichtiger Faktor des BIP, und auch des globalen Energie- und Ressourcenverbrauchs. Darüber hinaus tragen Architektur und Bauwesen wie keine andere Branche zur Befriedigung menschlicher Grundbedürfnisse, zum Wohlstand und zur Kultur bei. Andererseits wird in Architektur und Bauwesen im Vergleich zu anderen Branchen wenig in Forschung und Entwicklung investiert, was zu geringer Innovationskraft führt – tatsächlich fehlt es vor allem auch an der durchgängigen Digitalisierung.

Dieses Problem kann nicht aus der Domäne selbst heraus gelöst werden, da die Entscheidungsträger dort immer noch in sogenanntem “Silodenken” verhaftet sind. Designprozesse finden oft in sequentieller Reihenfolge und ohne Integration statt, wodurch wertvolle Daten verloren gehen können und die Entwurfsqualität leiden kann. Die Entwicklung neuer Entwurfswerkzeuge und deren Integration in den Entwurfsprozess hat dadurch großes Potential die Prozess- und Entwurfs-Qualität signifikant zu erhöhen und allgemein die Digitalisierung in Architektur und Bauwesen voranzutreiben.

Obwohl bereits zahlreiche digitale Entwurfswerkzeuge am Markt erhältlich sind, entsprechen diese – wegen fehlendem domänenspezifischem Fachwissen – selten den Bedürfnissen der Architekt\*innen und Ingenieur\*innen und finden somit keine breite Akzeptanz.

In diesem Artikel wird der Spezialforschungsbereich „Advanced Computational Design“ (<https://acd.tuwien.ac.at>) vorgestellt, der es sich zum Ziel gesetzt hat, dieses Problem zu lösen. Dieses Projekt wird vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) als SFB F 77 finanziert. Unterstützt durch ein multi- und interdisziplinäres Forschungsteam<sup>1</sup> aus drei Universitäten (TU Wien, TU Graz, Universität Innsbruck) sollen Brücken zwischen den Forschungsgebieten Architektur, Bauwesen, Mathematik und Informatik geschlagen werden um digitale Entwurfswerkzeuge zu entwickeln, die sich an Problemen der Entwurfs-Praxis orientieren. Konkret werden einerseits im Forschungsfeld der IKT neue algorithmische Lösungen für Entwurfsprobleme entwickelt, während im Forschungsfeld der Architektur und des Bauwesens eine neue digitale Entwurfsmethodik, die sowohl implizites als auch explizites Entwurfswissen integriert, aufgebaut wird.

Aufgrund dieser Ziele haben wir drei Hauptforschungsfelder identifiziert: Entwurfsmethodik (A1), visuelle und haptische Entwurfsinteraktion (A2), und Formfindung (A3). In A1 werden neue digitale Entwurfsmethoden entwickelt, die als Integrationsplattform für die Algorithmen und Methoden aus A2 und A3 dienen können. Unser Projekt ist insgesamt in 8 Teilprojekte gegliedert (Abbildung 1), die in der Folge im Kontext des jeweiligen Forschungsfeldes beschrieben werden.

---

<sup>1</sup> Autoren nach Teilprojekten: SP2 (Kovacic, Hensel, Ferschin), SP3 (Schinegger, Rutzinger, Rist), SP4 (Wimmer, Hahn, Suter), SP5 (Kaufmann), SP6 (Kilian, Müller), SP7 (Izmestiev, Nawratil), SP8 (Füssl), SP9 (Stavric)

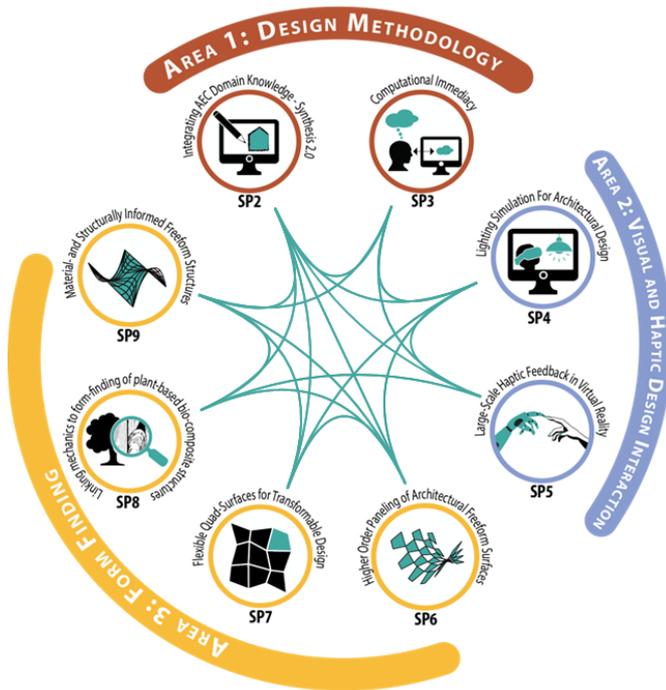


Abbildung 1: Die Bereiche und Teilprojekte des SFB Advanced Computational Design und ihre Vernetzung.

## 2 A1 Entwurfsmethodik

Der Bereich „Entwurfsmethodik“ fokussiert auf Ideenfindung und Vorentwurf und entwickelt neue hybride Workflows, die explizite Entwurfskriterien und implizites bzw. „stilles“ Entwurfswissen [1,2,3] in die Erstellung von direkt bearbeitbaren Skizzen und Konzeptmodellen integrieren. Architekten und Designer arbeiten oft mit indirekten Methoden, um ihre Ideen im Team zu kommunizieren, etwa durch skizzenhafte Zeichnungen oder Modelle, Referenzbilder oder abstrakte „Moodboards“. Die Lesbarkeit der darin enthaltenen Informationen ist jedoch oft eingeschränkt, weil spezifisches Entwurfswissen fehlt oder individualisierte Darstellungsweisen die Kommunikation der Ideen an Außenstehende erschweren.

Auf diese ersten Ergebnisse der Ideenfindung kann daher nicht direkt aufgebaut werden; wichtige Aspekte des Vorentwurfs wie etwa die Entwicklung von Struktur- und Materialisierungskonzepten werden oft parallel zu den räumlich-gestalterischen Konzepten bearbeitet. Obwohl sich integrative Methoden international zunehmend etablieren, ist der Vorentwurf noch immer ein fragmentierter und langwieriger Prozess in dem gestalterische und technische Überlegungen in digitalen Modellen synthetisiert und anschließend evaluiert werden. Hier setzt der Fokus im Bereich Entwurfsmethodik an: Mithilfe von maschinellem Lernen werden neuartige Workflows erarbeitet, welche die Übersetzung und Synthetisierung von expliziten und impliziten Entwurfsintentionen in digitale Formate erleichtern und von dem Entwerfer kein Vorwissen in

Modellierungsprogrammen voraussetzen. Um die große Bandbreite an möglichen Entwurfsansätzen zu adressieren, werden zwei Schwerpunkte verfolgt: die Erarbeitung eines Workflows, welcher sich einer 4D Mixed-Reality Sketching App als Integrationsplattform für Daten und Modelle bedient (SP2), und eines hybriden (physisch-digitalen) Workflows für die Erstellung von Konzeptmodellen (SP3). Maschinelles Lernen bildet dabei die Querschnittstechnologie um die Erkennung, Übersetzung und Interpretation der Geometrie zu unterstützen.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Entwicklung von Interfaces und Entwurfsumgebungen, die auf die Bedürfnisse kreativer Prozesse zugeschnitten sind. Die Integration von „Virtual Reality“ und „Virtual Haptics“ führt zu anschaulichen Ergebnissen im Vorentwurf und ermöglicht ein unmittelbares Feedback bezogen auf räumliche Wirkung (z.B. Lichtstimmung), materielle Beschaffenheit oder strukturelle Performanz.

Zudem werden die Ergebnisse der anderen Bereiche (A2, A3) in die Entwurfsmethodik integriert, um in Echtzeit erste Evaluationen in Hinblick auf strukturelle, technische, ökologische oder ökonomische Aspekte durchführen zu können.

SP2 „Integrating AEC Domain Knowledge – Synthesis 2.0“ bildet hier die Plattform um die unterschiedlichen digitalen Werkzeuge und Methoden der anderen Teilprojekten zu integrieren, wodurch die digitale dreidimensionale Skizze mit Tragwerks-analytischen Berechnungs- und Optimierungswerkzeugen, mathematischer Optimierung der Geometrie, Simulation der Beleuchtung. Diese durch Maschinelles Lernen gestützte Kopplung ermöglicht kurze Iterationszyklen und eine höhere Entwurfsqualität.

Dieser Workflow basiert auf der innovativen, semantischen 4D Sketching Applikation (siehe Abbildung 2), welche das traditionelle Skizzieren im dreidimensionalen Raum mittels Tablet und Stylus durch sogenannte 3D Canvases simuliert. Die zeitliche Daten der Skizzenerstellung werden als vierte Dimension gespeichert, damit der Prozess des Skizzierens durch Maschinelles Lernen rekonstruiert werden kann. Da die Skizze nur ein Set der 3D Polylinien ist, kann diese von Folgesimulationen nicht genutzt werden. Somit wird durch die Algorithmen ein rekonstruiertes Netzflächenmodell generiert, wodurch die Übertragung als auch Bearbeitung der reinen Geometrie in weiteren analytischen Werkzeugen ermöglicht wird.

In dieser Umgebung kann der Workflow zwei große Herausforderungen ansprechen – die intuitiv entstandene Skizze einer Entwurfs-Intention kann in die entsprechende parametrische Geometrie übersetzt und in weiteren Programmen genutzt werden ohne zusätzlichen

Modellierungsaufwand. Zweitens, das schnelle Feedback, beispielsweise zum Tragverhalten, ist in frühesten Entwurfsphasen möglich, wo der Entwurf mit wenig Aufwand noch alterniert werden kann.

Letztendlich wird eine Ontologie entwickelt, um die automatisierte Beschreibung und Verwaltung unterschiedlicher Attribute der Geometrie im gesamten SFB zu ermöglichen, mit dem Hauptfokus auf der digitalen Charakterisierung der mechanischen, optischen und haptischen Charakteristiken der Entwurfsmaterialität.

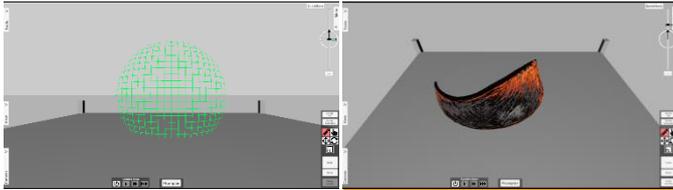
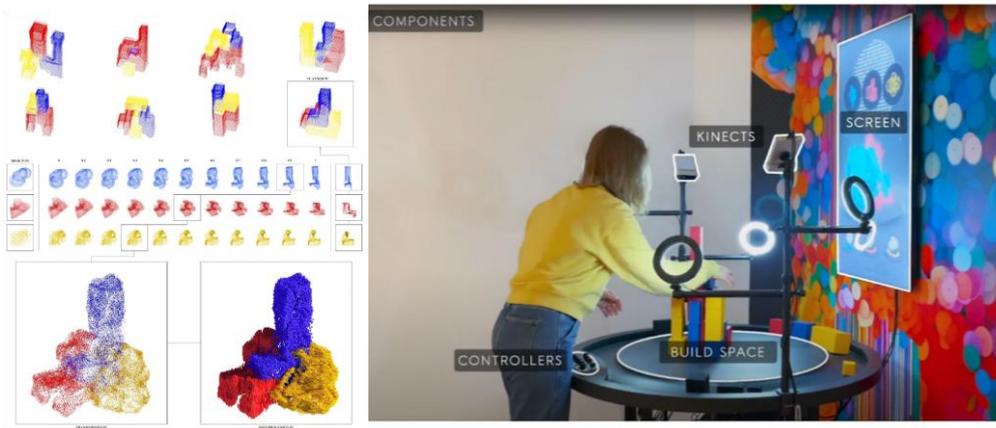


Abbildung 2: 4D Sketching App mit 3D Canvases

SP3 „Computational Immediacy“ fokussiert auf die Erstellung von Konzeptmodellen in interaktiven hybriden Modellierungsumgebungen [4] auf Basis von Punktwolken und maschinellem Lernen. Im Entwurfsprozess sind Punktwolken trotz ihrer großen Bedeutung für die Vermessung und Dokumentation ein eher ungewohntes Geometrieformat. Sie haben die besondere Eigenschaft, sowohl Oberfläche als auch den inneren Aufbau von Objekten über „Tiefe“ und Dichte repräsentieren zu können. Das ermöglicht es eine „volumetrische“ Design-Strategie zu verfolgen und Objekte mit ihrer inneren Struktur zu entwerfen [5].

Mittels Maschinellen Lernen werden metrische Eigenschaften von Punktwolken verarbeitet mit dem Ziel diese auf ein gescanntes physisches bzw. digital erstelltes Konzeptmodell zu übertragen. Dadurch können Designer sehr schnell Variationen einer dreidimensionalen Skizze herstellen und z.B. Strukturen oder räumliche Muster erzeugen, welche von Referenzbildern inspiriert sind.

In einer ersten Anwendung (Abbildung 3) aggregiert der Benutzer farbcodierte Baublöcke, welche gescannt und in ein digitales 3D Punktwolken Modell übersetzt werden. Dabei kann aus einer Sammlung von Referenz-Punktwolken mit spezifischen architektonischen Eigenschaften ausgewählt werden. Deren Metriken werden mittels Autoencoder auf die ursprüngliche Punktwolke entsprechend der Farbkodierung übertragen. Dem Anwender stehen verschiedene Skalierungs-, Gewichtung- und Darstellungsmöglichkeiten zur Verfügung.



**Abbildung 3:** „Clouder“ ist eine erste Anwendung für eine hybride und interaktive Echtzeit-Entwurfsumgebung.

In einem weiteren Schritt soll durch die Zusammenarbeit mit SP5 die Interaktion mit punktwolkenbasierten Konzeptmodellen um das haptische Feedback in Virtual Reality ergänzt werden. Der Entwerfer kann dadurch z.B. strukturelle oder materielle Eigenschaften seiner Modelle unmittelbar erfahren.

Weiters werden Methoden zur volumetrischen Übersetzung von Punktwolken in tektonische Modelle erprobt. Gemeinsam mit SP9 wurden dazu erste Materialisierungsstrategien in einem “3D-Point Printing” Workshop getestet (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Ergebnisse des gemeinsamen „Point Printing“ Workshops an der TU Graz von SP3 und SP9.

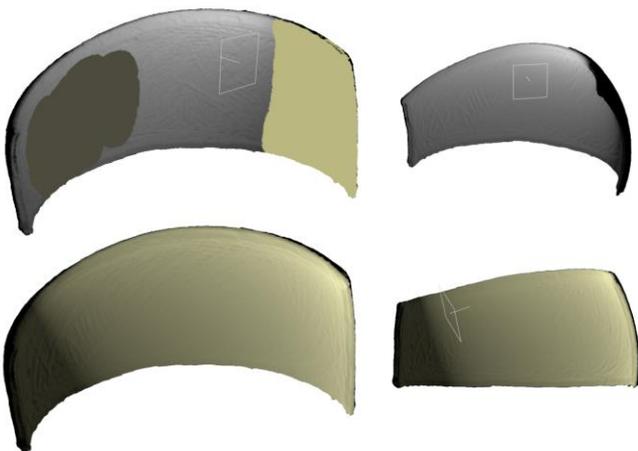
### 3 A2 Visual and Haptic Design Interaction

Der zweite Forschungsbereich dieses SFB-Projekts behandelt die visuelle und haptische Interaktion in der Entwurfsphase. Die Art, wie ein Objekt vor allem durch Seh- und Tastsinn wahrgenommen wird hat einen großen Einfluss auf den Entwurfsprozess. Traditionellerweise müssen langwierige Computersimulationen durchgeführt werden, um eine realistische Simulation dieser Eindrücke zu erreichen. Dies führt zu langen Entwicklungszyklen, wenn beispielsweise Beleuchtungspositionen oder die Anordnung von Objekten verändert werden. Unser Ziel ist es hier,

schon in frühen Entwurfsstadien aussagekräftige visuelle und haptische Eindrücke zu vermitteln, was es den Architekten ermöglichen kann, völlig neue Lösungen in Betracht zu ziehen.

Ein für den visuellen Nutzerkomfort wesentlicher Teil der Gebäudeplanung ist die Lichtplanung, die aber aufgrund der notwendigen technischen Expertise erst nach der Entwurfsplanung, nämlich in der Ausführungsplanung stattfindet. Im Teilprojekt SP4 werden Methoden entwickelt, um die Lichtplanung schon in der frühen Entwurfsphase praktikabel zu machen. Dabei werden drei komplementäre Ansätze verfolgt.

Unser erster Ansatz besteht aus einer *automatisierten Lichtplanung*: Ausgehend von einem Grobentwurf und vom Planer vorgegebenen Beleuchtungszielen berechnet das System optimale Positionen und Typen von Lichtquellen oder passende Positionen von geometrischen Objekten. Mögliche Beleuchtungsziele sind z.B. die gleichmäßige Ausleuchtung von Arbeitsflächen, die Minimierung der für Beleuchtung eingesetzten Energie sowie gestalterische Vorgaben. Um diese Optimierung in einen interaktiven Planungsprozess einzubinden, entwickeln wir neue Methoden, um effiziente gradientenbasierte Optimierungsverfahren wie L-BFGS [6] oder ADAM [7] für die automatisierte Lichtplanung einsetzen zu können. Durch eine hochparallele Implementierung kann moderne Grafikhardware für die Simulation und Gradientenberechnung eingesetzt werden, was zu Optimierungslaufzeiten von nur wenigen Sekunden führt. Abbildung SP4 zeigt ein Beispiel für die Optimierung einer quadratischen Flächenleuchte, die an skizzierte Beleuchtungsvorgaben angepasst wird.



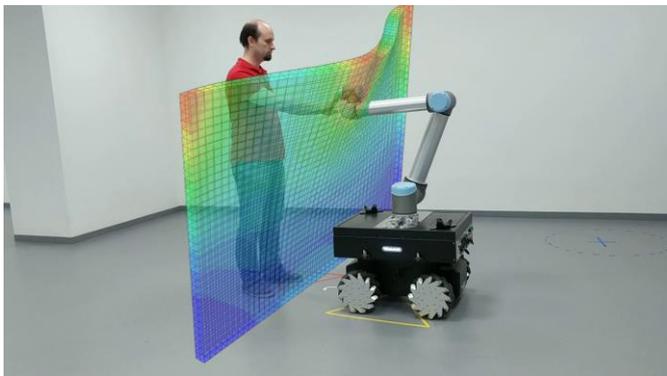
**Abbildung 5:** Beleuchtungsoptimierung einer in der Sketching App erstellten „Wand“. Oben: Ursprüngliche Beleuchtung (und skizzierte gewünschte Beleuchtung links); unten: Neue Beleuchtung (automatisch optimierte Position, Orientierung, Helligkeit und Farbe der Lichtquelle).

Um den Designer bei Lichtplanungsaufgaben ohne klar definierte Beleuchtungsvorgaben zu

unterstützen, entwickeln wir zusätzlich eine *interaktive Lichtsimulation*, in der sowohl die Geometrie als auch die Leuchtmittel in Echtzeit verändert werden können. In dieser Interaktionsform hat der Designer die größtmögliche gestalterische Freiheit. Sie soll bereits in der frühen Planungsphase basierend auf einem geometrischen Grobmodell durchgeführt werden können. Mittels hardwaregestütztem Ray Tracing kann ein besonderes Augenmerk auf *indirekte* Beleuchtungseffekte geworfen werden sowie auf die Einstrahlung von Tageslicht. Außerdem können Beleuchtungsziele definiert werden, deren Erfüllungsgrad oder Gradienten interaktiv visualisiert werden.

Ein dritter Ansatz, die sogenannte *suggestive Lichtplanung*, vereint die vorigen Herangehensweisen: ausgehend von einer bestehenden (interaktiv oder automatisch erstellten) Lichtplanung nimmt der Planer Veränderungen vor (z.B. Veränderung der Position von Lichtquellen und Objekten). Das Optimierungsmodul schlägt anschließend eine Reihe von Varianten vor, die diese Veränderungen so fortsetzen, dass Beleuchtungsvorgaben möglichst gut erfüllt werden.

Zusätzlich zum visuellen Eindruck beschäftigt sich SP5 mit dem Tastsinn. Konkret wird eine Roboterplattform entwickelt, die haptisches Feedback für elastische Materialien in großen, begehbaren virtuellen Realitäten (VR) bietet (Abb. SP5). Das entwickelte System basiert auf einem kollaborativen Roboter (kurz Cobot), bestehend aus einer omnidirektionalen, mobilen Plattform und einem Roboterarm. Sobald die Benutzer mit einem virtuellen Objekt interagieren möchten, stellt der Cobot ein physisches Requisite an der richtigen Position bereit. Im Gegensatz zu existierenden Ansätzen ist das haptische Feedback nicht auf einen Finger oder eine Hand beschränkt, was eine realitätsnahe Interaktion mit echten Berührungsempfindungen ermöglicht.



**Abbildung 6:** Darstellung elastischer struktureller Reaktionen eines virtuellen Objekts mit haptischem Feedback.

Eine besondere Herausforderung stellt insbesondere die Sicherheit dar, denn es existieren zwar etablierte Industrienormen für Mensch-Roboter-Arbeitsplätze, jedoch sind eine Reihe von

Aspekten im Zusammenhang mit VR weder anwendbar noch gelöst. Da Benutzer beim Tragen einer VR-Brille ihre Umgebung nicht wahrnehmen und sich häufig unerwartet bewegen, können etablierte Normen das System unbrauchbar machen oder sogar Gefahren ergeben. Z.B. wäre die vorgeschriebene Reaktion eines Cobots auf die Nähe von Benutzern, sich sehr langsam zu bewegen oder sogar anzuhalten [8], was aktive haptische Interaktionen verhindern oder eine Stolperfalle darstellen würde. Stattdessen ist es besser wenn sich der Cobot sofort zu einem bereits vorberechneten Fluchtpunkt bewegt.

Interaktive Objekte, wie sie etwa in anderen Teilprojekten entworfen werden, werden durch 3D-Finite-Elemente-Simulationen mechanisch analysiert. Die Ergebnisse werden in einer Datenbank zusammengeführt auf welche während der VR-Erfahrung nahezu in Echtzeit zugegriffen werden kann. Dieses System ermöglicht es, realistisches mechanisches Feedback zu simulieren (z.B. angemessener Widerstand entsprechend der Struktursteifigkeit). Weiters können Verschiebungs-, Spannungs- oder Dehnungsfelder auf der Oberfläche dargestellt werden. Dieses neue Level an immersiver VR eröffnet, zusammen mit der beschriebenen Beleuchtungssimulation, besonders in frühen Entwurfsstadien neue Anwendungsbereiche in architektonischem Design.

#### 4 A3 Form Finding

Aktuelle Prozesse in der Formfindung, dem Design von Gebäudestrukturen, verlaufen überwiegend unidirektional. Geometrisches, strukturelles und mechanisches Design erfolgen sequentiell und getrennt voneinander. Eine hohe Interaktion zwischen diesen Feldern ist daher nicht möglich und Lösungsansätze können nicht effizient adaptiert und optimiert werden. Um dies zu verändern müssen Designprozesse erweitert und verbessert werden um letztendlich eine sinnvolle Verknüpfung zu ermöglichen.

Eine dieser Designprozesse sind Algorithmen zur Paneelisierung von architektonischen Freiformflächen, wie in SP6 behandelt. Der Lösungsraum des Paneelisierungsproblems wird wesentlich durch die zur Verfügung stehende Fertigungstechnik bestimmt. Wesentliches Qualitätsmerkmal einer Paneelisierung ist deren ästhetisches Erscheinungsbild. Aus wirtschaftlicher Sicht sucht man statt der ästhetischsten Lösung die effizienteste Lösung, die bei gegebenem Budget die visuelle Qualität maximiert. Wesentlicher Faktor zur Kostenreduktion ist die optimale beziehungsweise wiederholte Nutzung zur Verfügung stehender Formwerkzeuge.

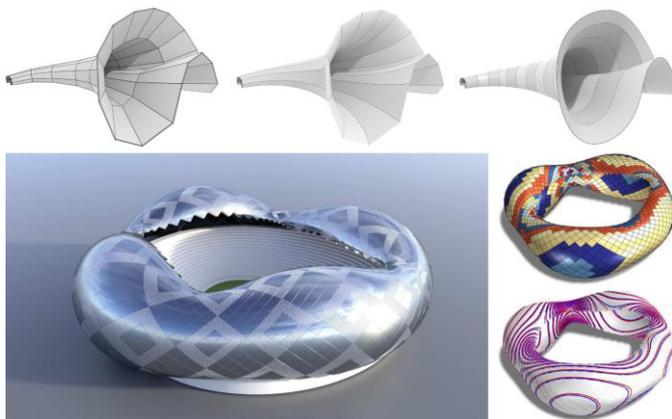
Aus differentialgeometrischer Sicht ist dieser Ansatz bei Flächen mit sich wiederholendem

Krümmungsverhalten besonders effizient. Dabei unterscheidet man zwischen extrinsischer und intrinsischer Wiederholung. Im ersten Fall kommen an verschiedenen Stellen der Entwurfsfläche kongruente Paneele zum Einsatz. Im zweiten Fall erhält man Paneele durch isometrische Verformung, also durch Biegen ohne Stauchen oder Strecken.

Der Fokus von SP6 liegt auf Methoden zur Erkennung und Ausnutzung extrinsischer und intrinsischer Wiederholung sowie auf Verfahren, die durch minimale Eingriffe in die Gestalt der Entwurfsfläche die entsprechende Situation herstellen.

In Verallgemeinerung ebener und zylindrischer Paneele liegt ein Schwerpunkt der Betrachtungen auf Kegelstreifen. Hier werden im Sinne der diskreten Differentialgeometrie konjugierte Netze betrachtet, die aus einer Familie diskreter Kegelstreifen bestehen, siehe Abbildung 7 oben.

Zur Rationalisierung von Freiformflächen wird die Approximation mittels sogenannter Weingarten-Flächen untersucht, siehe Abbildung 7 unten und [9]. Per Definition besitzt diese Flächenklasse einen hohen Grad extrinsischer Wiederholung. Ersten experimentellen Ergebnissen zufolge weisen sie sehr gute Approximationseigenschaften auf.



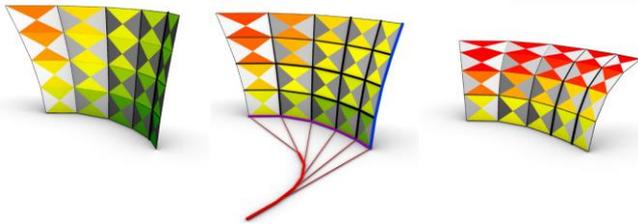
**Abbildung 7:** Ein Kegelnetz samt Varianten (oben). Eine Weingarten-Fläche und deren Einteilung in kongruente Paneele (unten).

Den Übergang zu dynamischen Strukturen stellt SP7 dar, indem Algorithmen zum Design von faltbaren Oberflächen entwickelt werden, welche aus ebenen Viereckspaneeelen bestehen, die entlang der Kanten über Drehgelenke gekoppelt sind, wobei in jeder Ecke deren vier zusammenstoßen. Derartige Vierecksflächen sind im Allgemeinen starr und erlauben nur für spezielle Geometrien eine einparametrische Verknüpfung der Fläche längs der Kanten ohne jegliche Verformung der Paneele selbst. Somit kann die räumliche Gestalt allein durch den Antrieb eines Drehgelenks gesteuert werden.

Da neben funktionalen Aspekten (z.B. Belichtung/Beschattung, Belüftung, Akustik, etc.) die

Flächen und deren Verformungen auch ästhetischen Ansprüchen genügen müssen, liegt ein Fokus von SP7 darin einen intuitiven Zugang zum Lösungsraum der beweglichen Vierecksflächen zu ermöglichen. Die Schwierigkeit dabei besteht in dem Umstand, dass die Beweglichkeit keine Eigenschaft der äußeren Geometrie darstellt, sondern eine der inneren, welche alleine durch die Winkel in den Vierecken bestimmt ist. Jedoch erlauben einige Klassen wie z.B. die sogenannten T-Fläche und V-Fläche, welche erstmals von Sauer und Graf [10] beschrieben wurden, einen direkten Zugriff auf die räumliche Gestalt mittels Kontrollpolygonen. Auf diesem Designzugang basiert das von uns entwickelte Rhino/Grasshopper Plug-in „Scutes“ (siehe Abb. SP7).

Weitere anwendungsorientierte Schwerpunkte von SP7 liegen im Studium von beweglichen konjugierten semi-diskreten Flächen, da diese aus abwickelbaren Streifen zusammengesetzt werden können, sowie in der Erforschung von beweglichen Rohrstrukturen, welche als Grundbausteine vieler Metamaterialien fungieren.



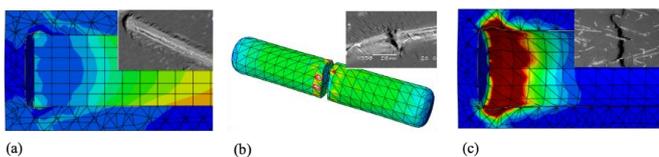
**Abbildung 8:** Drei Konfigurationen eines T-Flaches, welches mit dem Rhino/Grasshopper Plug-in „Scutes“ [11] aus einem Profilpolygon (blau), Bahnpolygon (lila) und Leitpolygon (rot) generiert wurde (Mitte). Die Flächenfärbung gibt Auskunft über die Nähe zu den Grenzen der Beweglichkeit und die Kantendicke über die Fähigkeit der Kraftübertragung. Weiters kann die Verformung in Echtzeit berechnet werden dank einer rekursiven Parametrisierung der Eckpunkte [12].

Neben der Geometriefindung ist die Auswahl geeigneter Materialien und Tragstrukturen ein essentieller Teil der Formfindung. Idealerweise werden computergestützte Methoden der Geometrieoptimierung (SP6 und SP7) mit mechanischen Modellen von zukunftssträchtigen Materialklassen, wie es pflanzenbasierte Biokomposite darstellen, in Verbindung gebracht.

SP8 trägt zu diesem Thema bei, indem mechanische 3D-Modelle konzipiert werden, in Analogie zu [13,14], die anschließend zur Formfindung komplexer Verbundwerkstoffstrukturen verknüpft werden können. In einem ersten Schritt wurde ein Mehrskalmodell im Rahmen der Kontinuums-Mikromechanik für pflanzenbasierte Biokomposite entwickelt. Dieses Modell umfasst vier Betrachtungsebenen, welche die Morphologien von Biokompositen von der Nanometer-Längenskala bis hin zum makroskopischen Werkstoff abbilden. Dieses Modell haben wir anhand von Steifigkeits- und Festigkeitswerten von 26 der am häufigsten verwendeten

Pflanzenfasern erfolgreich validiert. Nun können damit relativ zuverlässig Steifigkeitstensenoren und elastische Grenztraglasten in Abhängigkeit der Mikrostruktur (Faserausrichtung, Faserlänge, Ligninanteil, Porenanteil, etc.) von unterschiedlichen Biokompositen in effizienter Art und Weise prognostiziert werden.

Mechanische Nichtlinearitäten, wie z.B. Grenzflächenversagen zwischen Zellulosefaser und Lignin, plastische Zonen oder auch quasi-spröde Versagensmechanismen können im Rahmen der Kontinuums-Mikromechanik nur sehr begrenzt beschrieben werden. Diese Effekte werden mittels finite-elemente-basierten Methoden [15,16] untersucht (siehe Abbildung 9) und über ein hybrides Konzept mit dem Mehrskalmodell verknüpft. Letztendlich soll ein Modellierungsansatz entstehen der das 3D-mechanische Verhalten von pflanzenbasierten Biokompositen, den potentiellen Baumaterialien der Zukunft, ausreichend genau vorhersagen kann, inklusive essentieller Versagensmechanismen unter Berücksichtigung der Materialvariabilität. Diese Information kann in weiterer Folge durch Metamodellierung [17] mit unterschiedlichsten Algorithmen / Werkzeugen zur Formfindung verknüpft werden.



**Abbildung 9:** Beispielhafte Ergebnisse numerischer Modelle zur Beschreibung der Hauptversagensmechanismen zwischen Pflanzen-/Holzfaser und Matrixmaterial (Lignin) im Vergleich zu SEM-Bildern [18]. (a) Faserablösung, (b) Faserbruch, (c) Matrixerweichung.

Letztendlich werden neuartige Materialien, sowie deren Formbarkeit, Verarbeitbarkeit und Tragverhalten durch einen ganzheitlichen Ansatz in SP9 untersucht. Dies soll Probleme und Einschränkungen bei der Umsetzung von architektonischen Designs [19,20,21] entgegenwirken. Diese treten auf, weil vom Architekten definierte Freiformen oft losgelöst von ihrer statischen Funktion und ihrer Materialität betrachtet werden.

Durch aktives Biegen wird in SP9 eine neue kontrollierte Formgebungsmethode für dünnwandige Tonelemente vorgeschlagen. Eine Tonschicht wird auf ein Trägermaterial aufgebracht, um das Schrumpfungsverhalten von Ton als Formgebungsmittel zu nutzen. Dieser Formgebungsprozess nutzt die Änderung des Verhältnisses von Adhäsionskräften (Abbildung 10) durch die Verbindung eines flächigen Trägermaterials mit einer nassen Tonschicht auf seiner Oberfläche und Kohäsionskräften im Ton während des Trocknungsprozesses.

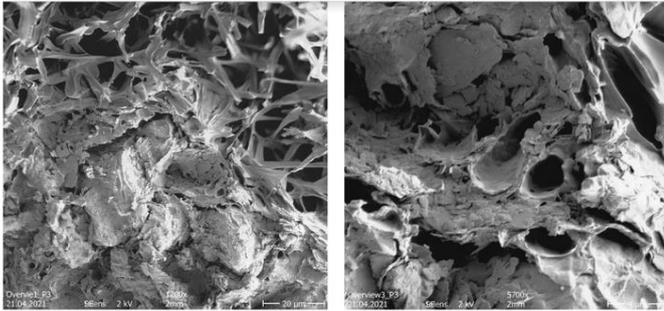


**Abbildung 10:** Formgebungsmethode durch aktives Biegen.

Anschließend kann die Geometrie des Tons von einfach gekrümmten bis hin zu doppelt gekrümmten dreidimensionalen Formen reichen, die die Möglichkeit eröffnen, dieses Verfahren zur Schaffung räumlicher Strukturen einzusetzen. Der Hauptvorteil der vorgeschlagenen Methode gegenüber herkömmlichen Methoden zur Formgebung von Tonelementen, ist die Nutzung der während des Trocknens entstehenden van-der-Waals-Anziehungskräfte als aktive und kontrollierte Akteure. Dieser Ansatz ermöglicht die Herstellung dreidimensionaler Formen ohne jede Art von Guss, Schalung oder aufwändigem Gerüst.

Im zweiten Forschungsbeitrag werden wir einen digitalen Arbeitsablauf demonstrieren, der ein lebendes Material, Myzel, in den Designprozess einbezieht. Unsere interdisziplinäre Forschung kombiniert die digitale Fertigung mit dem Einsatz von Myzelwachstum. Wir haben eine Kompositstruktur entwickelt, die materialinformierte Werkzeugpfade für die pastenbasierte Extrusion verwendet, die auf der Grundlage von Experimenten zum Vergleich von Materialeigenschaften und Wachstumsbeobachtungen aufgebaut sind (Abbildung 11). Anschließend wurde die Zugfestigkeit von 3D-gedruckten ungebrannten Tonelementen durch die Verwendung von Myzel als intelligent orientierte Faserverstärkung erhöht.

Dieser Verbundwerkstoff weist strukturelle Eigenschaften auf, die eine Anwendung in der Bauindustrie ermöglicht. Er erlaubt den Entwurf und die effiziente Herstellung von keramischen Leichtbaukonstruktionen, was mit herkömmlichen Keramikherstellungsmethoden nicht möglich gewesen wäre.



**Abbildung 11:** SEM des Myzelwachstums durch den Ton-Sägemehl-Verbundstoff, Maßstab = 4 µm (links) und 10 µm (rechts).

Durch die vier Teilprojekte in diesem Forschungsbereich werden also Schlüsselverbindungen zwischen mathematischen, geometrischen, mechanischen und experimentellen Methoden entwickelt, um computergestützte Entwurfsprozesse effizienter zu gestalten. Unsere Forschung wird dazu beitragen, Lösungsräume zu erweitern und auf diese Weise neue Gestaltungsmöglichkeiten zu eröffnen und den Handlungsspielraum des Designers zu vergrößern.

## 5 Schlussfolgerungen

Der Spezialforschungsbereich „Advanced Computational Design“ hat zum Ziel, Kommunikationsbarrieren in der frühen Entwurfsphase zu reduzieren. Dies ermöglicht einerseits eine höhere Entwurfsqualität, und andererseits auch eine Reduktion des Ressourcenverbrauch und der Emissionen im Lebenszyklus. Anstelle eines sequentiellen Prozesses, in dem die Beiträge der einzelnen Disziplinen auf abgeschlossenen vorangehenden Schritten aufbauen müssen, tritt ein interaktiver Prozess, bei dem die Planungsbeteiligten der verschiedenen Disziplinen mithilfe der beschriebenen interaktiven digitalen Werkzeuge schon früh kommunizieren können und frühzeitig Entwurfsoptimierungen vornehmen können.

Dieser Artikel hat die ersten Ergebnisse und weiteren Pläne für einen neuen, integrativen und interaktiven Entwurfsprozess beschrieben, und außerdem die ersten Forschungsergebnisse präsentiert, die in den einzelnen Disziplinen notwendig sind, um einen interaktiven, digitalisierten Arbeitsablauf in der jeweiligen Domäne zu ermöglichen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen das große Potential der neuen Methodik, um durch interaktives Feedback die Entscheidungsfindung im Entwurfsprozess zu unterstützen, als auch darüber hinaus, durch den Einsatz von neuen digitalen Werkzeugen, wie z.B. einer semantischen 4D Mixed-Reality Sketching App, innovative Entwurfslösungen generieren zu können.

## Literatur

- [1] Michael Polanyi, *The tacit dimension*. London: Routledge & K. Paul, 1967.
- [2] Dillenburger, Benjamin, "Raumindex. Ein datenbasiertes Entwurfsinstrument," Ph.D. dissertation 2016.
- [3] Nigel Cross, *Designerly Ways of Knowing.*: Springer-Verlag GmbH, June 2006. [Online].  
[https://www.ebook.de/de/product/8900269/nigel\\_cross\\_designerly\\_ways\\_of\\_knowing.html](https://www.ebook.de/de/product/8900269/nigel_cross_designerly_ways_of_knowing.html)
- [4] Mette Ramsgaard Thomsen and Martin Tamke, "The Active Model: a calibration of material intent," in *Persistent Modelling*, Phil Ayres, Ed.: Routledge, 2012.
- [5] Christoph Bader, Dominik Kolb, James C. Weaver, and Neri Oxman, "Data-Driven Material Modeling with Functional Advection for 3D Printing of Materially Heterogeneous Objects," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 3, pp. 71–79, June 2016.
- [6] Jorge Nocedal, "Updating quasi-Newton matrices with limited storage," *Mathematics of Computation*, vol. 35, pp. 773–782, 1980.
- [7] Diederik P. Kingma and Jimmy Ba, "Adam: A Method for Stochastic Optimization," *arXiv:1412.6980*, December 2014.
- [8] ISO/TC 299: Robotics, ISO/TS 15066:2016: Robots and robotic devices — Collaborative robots, 2016.
- [9] Davide Pellis, Martin Kilian, Helmut Pottmann, and Mark Pauly, "Computational design of Weingarten surfaces," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 40, pp. 1–11, August 2021.
- [10] R. Sauer and H. Graf, "Über Flächenverbiegung in Analogie zur Verknickung offener Facettenfläche," *Mathematische Annalen*, vol. 105, pp. 499–535, December 1931.
- [11] K. Sharifmoghaddam, G. Nawratil, A. Rasoulzadeh, and J. Tervooren, "Using Flexible Trapezoidal Quad-Surfaces for Transformable Design," in *Proc. of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures*, 2021.
- [12] I. Izmestiev, A. Rasoulzadeh, and J. Tervooren, "Isometric Deformations of Discrete and Smooth T-Surfaces," *in preparation*, 2022.

- [13] Thomas Buchner, Thomas Kiefer, Markus Königsberger, Andreas Jäger, and Josef Füssl, "Continuum micromechanics model for fired clay bricks: Upscaling of experimentally identified microstructural features to macroscopic elastic stiffness and thermal conductivity," *Materials & Design*, vol. 212, p. 110212, December 2021.
- [14] Thomas Buchner, Markus Königsberger, Andreas Jäger, and Josef Füssl, "A validated multiscale model linking microstructural features of fired clay brick to its macroscopic multiaxial strength," *Mechanics of Materials*, vol. 170, p. 104334, July 2022.
- [15] J. Füssl, M. Li, M. Lukacevic, J. Eberhardsteiner, and C. M. Martin, "Comparison of unit cell-based computational methods for predicting the strength of wood," *Engineering Structures*, vol. 141, pp. 427–443, June 2017.
- [16] Sebastian Pech, Markus Lukacevic, and Josef Füssl, "A hybrid multi-phase field model to describe cohesive failure in orthotropic materials, assessed by modeling failure mechanisms in wood," *arXiv:2203.12291*, March 2022.
- [17] Thomas Most and Johannes Will, "Metamodel of Optimal Prognosis - An automatic approach for variable reduction and optimal meta-model selection," *Weimar Optimization and Stochastic Days 5.0*, 2008.
- [18] A. Bourmaud, G. Ausias, G. Lebrun, M.-L. Tachon, and C. Baley, "Observation of the structure of a composite polypropylene/flax and damage mechanisms under stress," *Industrial Crops and Products*, vol. 43, pp. 225–236, May 2013.
- [19] Martin Bechthold, *Innovative Surface Structures: Technologies and Applications.*: Taylor & Francis, 2008.
- [20] Achim Menges, *Material Performance: Fibrous Tectonics & Architectural Morphology.*: Harvard University Graduate School of Design, 2016.
- [21] Branko Kolarevic and Kevin Klinger, *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture.*: Routledge, 2008.

## Autoren

Prof. Michael Wimmer (Korrespondenzautor)

[wimmer@cg.tuwien.ac.at](mailto:wimmer@cg.tuwien.ac.at)

TU Wien

Institut für Visual Computing & Human-Centered Technology

Favoritenstr. 9-11

1040 Wien

Prof. Iva Kovacic

[iva.kovacic@tuwien.ac.at](mailto:iva.kovacic@tuwien.ac.at)

TU Wien

1040 Wien

Prof. Peter Ferschin

[peter.ferschin@tuwien.ac.at](mailto:peter.ferschin@tuwien.ac.at)

TU Wien

1040 Wien

Dr. Florian Rist

[florian.rist@kaust.edu.sa](mailto:florian.rist@kaust.edu.sa)

KAUST

Thuwal, SA

TU Wien

1040 Wien

Prof. Michael Hensel

[hensel@iemar.tuwien.ac.at](mailto:hensel@iemar.tuwien.ac.at)

TU Wien

1040 Wien

Prof. Kristina Schinegger

[Kristina.Schinegger@uibk.ac.at](mailto:Kristina.Schinegger@uibk.ac.at)

Universität Innsbruck

Innsbruck, AT

Prof. Stefan Rutzinger

[Stefan.Rutzinger@uibk.ac.at](mailto:Stefan.Rutzinger@uibk.ac.at)

Universität Innsbruck

Innsbruck, AT

Prof. Hannes Kaufmann

[hannes.kaufmann@tuwien.ac.at](mailto:hannes.kaufmann@tuwien.ac.at)

TU Wien

1040 Wien

Dr. Martin Kilian

[kilian@geometrie.tuwien.ac.at](mailto:kilian@geometrie.tuwien.ac.at)

Review

Kommentare

Kommentare

TU Wien  
1040 Wien

Prof. Christian Müller  
[cmueller@geometrie.tuwien.ac.at](mailto:cmueller@geometrie.tuwien.ac.at)

TU Wien  
1040 Wien

Prof. Ivan Izmestiev  
[izmestiev@dmg.tuwien.ac.at](mailto:izmestiev@dmg.tuwien.ac.at)

TU Wien  
1040 Wien

Dr. Georg Nawratil  
[nawratil@geometrie.tuwien.ac.at](mailto:nawratil@geometrie.tuwien.ac.at)

TU Wien  
1040 Wien

Prof. Josef Füssl  
[josef.fuessl@tuwien.ac.at](mailto:josef.fuessl@tuwien.ac.at)

TU Wien  
1040 Wien

Prof. Milena Stavric  
[mstavric@tugraz.at](mailto:mstavric@tugraz.at)

TU Graz  
Graz, AT

David Hahn, PhD  
[david.hahn@tuwien.ac.at](mailto:david.hahn@tuwien.ac.at)

TU Wien  
1040 Wien

Prof. Georg Suter  
[georg.suter@tuwien.ac.at](mailto:georg.suter@tuwien.ac.at)

TU Wien  
1040 Wien

Review

Kommentare

Kommentare