

Heike Matcha / Rüdiger Karzel

Lehre als Praxis als Forschung

1:1 Entwicklung von Messeständen unter Einsatz parametrisierter Software und computergesteuerter Herstellung

Einleitung

Wir stellen eine Seminarreihe vor, die die übliche Trennung von Lehre, Praxis und Forschung aufhob und den Umfang herkömmlicher Lehrveranstaltungen in zweierlei Hinsicht wesentlich erweiterte: Zum einen entwarfen Studierende nicht nur Projekte und stellten sie dar, sondern sie stellten das Entworfenen auch selbst her und betrieben es. Zum anderen lernten sie währenddessen computergestützte parametrisierte Entwurfs- und Herstellungsmethoden kennen und erforschten deren Potentiale. Dabei durchliefen die Studierenden innerhalb von drei Monaten alle Phasen der Entstehung eines kleinen Gebäudes: eines Messestandes, mittels dessen sich der Fachbereich Architektur der TU Darmstadt auf einer Schülermesse potentiellen Studierenden vorstellte. Darüber hinaus übten die Studierenden sich in Gruppenarbeit, dem Dialog mit Fachleuten und der Zusammenarbeit mit Fachbetrieben. Wir erläutern zunächst die Struktur des Seminars, vergleichen dann die bislang gelaufenen drei Veranstaltungen und ziehen zuletzt ein Fazit daraus.

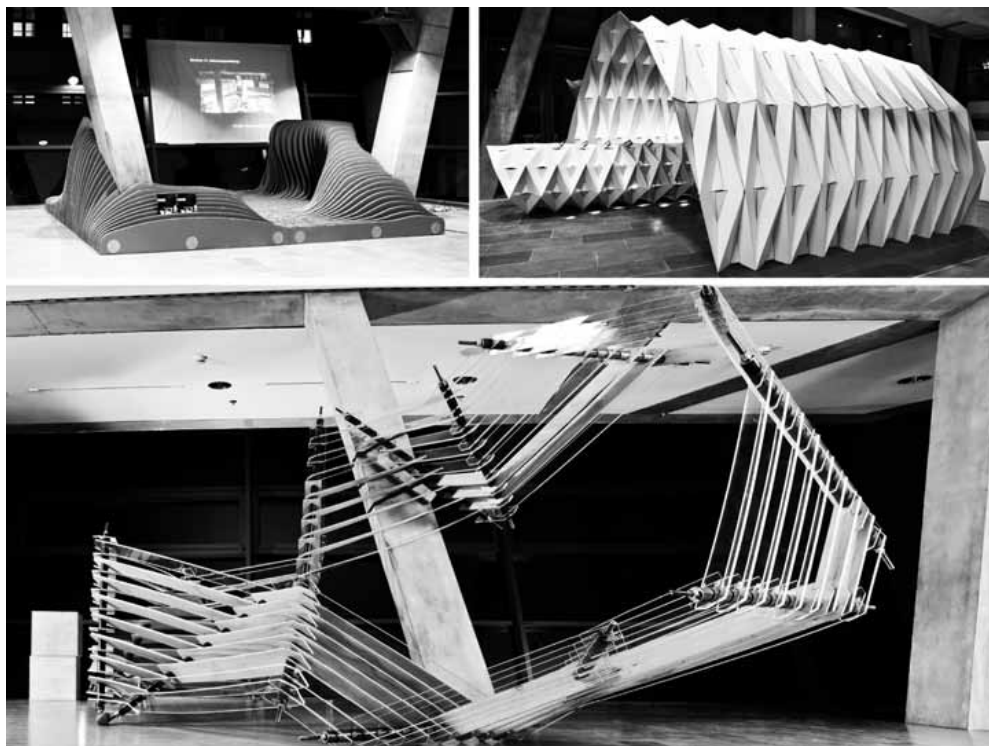


Abb. 1: Die 3 Messestände WellPappWelle, Digital Origami und Möbiusband (im Uhrzeigersinn)

Struktur und Inhalt des Seminars

Das Seminar gliederte sich in vier Teile: Zunächst wurden die Studierenden mit den Grundzügen parametrischen Entwerfens und Herstellens vertraut gemacht (insbes. Varianz familienähnlicher Teile und individualisierte Massenherstellung). Sie hatten dann innerhalb von vier Wochen in Zweiergruppen einen Entwurf für einen Messestand anzufertigen, der nicht nur ein Behälter für Exponate war, sondern durch seine Gestalt bereits selbst als attraktives Exponat fungieren konnte - und dafür die Möglichkeiten der Parametrisierung nutzt. Aus den so entstandenen 10-40 Arbeiten wurden durch eine unabhängige Jury vier bis sechs zur Weiterbearbeitung und Realisierung ausgewählt. Nun wurden parametrische Entwurfswerkzeuge und Herstellungsverfahren genauer eingeführt, mittels derer und auf die hin die Studierenden in den nächsten vier Wochen die ausgewählten Entwürfe in Fünfer- bis Achtergruppen weiterentwickelten.



Abb. 2: Auswahl Wettbewerbsentwürfe für den 1. Messestand

Daraufhin tagte die Jury erneut, um nun einen einzigen Entwurf zur Realisierung auszuwählen. Die Studierenden arbeiteten in den verbleibenden vier Wochen als Großgruppe zusammen. Sie recherchierten CNC-Fertigungstechnologien, -werkstätten und Materialien, organisierten das Sponsoring und entwickelten den ausgewählten Entwurf auf die verfügbaren Möglichkeiten hin weiter. In dieser Phase kamen Fachleute für Statik, Materialien, Fertigungstechnologien und nicht zuletzt Softwarefragen hinzu, mit denen die Studierenden in Dialog traten und dann die Diskussionsergebnisse in den Entwurf einarbeiteten. Schließlich fertigten sie die Bauteile weitestgehend selbstständig an, lieferten sie zunächst zur Universität, wo sie einen Probeaufbau durchführten, und schließlich zur Messehalle, um dort den Pavillon aufzubauen.

Der vierte und letzte Teil des Seminars bestand darin, den Messestand während der einwöchigen Messe zu betreiben, also Exponate einzusetzen, zu beaufsichtigen, und vor allem mit den Besucherinnen und Besuchern zu sprechen. Lernen, Anwenden, Austesten neuer Techniken und aufbereiten-des Reflektieren des Gelernten waren eng miteinander verwoben, informierten einander und trieben sich gegenseitig an.



Abb. 3: Die 4 Seminarteile: Parametrischer Entwurf, digitale Planung, CNC Fertigung, Messestandsbetrieb (gegen den Uhrzeigersinn)

Drei Messestände: „WellPappWelle“, „Möbiusband“ und „Digital Oriami“

Messestand 1: „WellPappWelle“

Planung: 10/07 - 12/07; Umsetzung: 12/07 - 01/08; Produktion / Bau ca. 5 Wochen

Der erste der realisierten Messestände, die „WellPappWelle“, basiert auf der Idee eines ergonomisch und funktional informierten multifunktionalen Möbels, das begangen, betreten und besessen werden und an verschiedenen Stellen auf unterschiedliche Art verschiedenste Exponate aufnehmen kann. Zunächst als ein vollständig umschlossener Tunnel geplant, wurde der Entwurf im Zuge der Bearbeitung zu einer Art Miniaturlandschaft vereinfacht. Unterschiedliche Nutzungssituationen werden mit Schnittformen assoziiert. Diese können unterschiedlich kombiniert werden, und die Gesamtform ergibt sich durch Interpolation zwischen ihnen.

Parametrik fließt in zweierlei Hinsicht in diesen Entwurf ein: zum einen lässt sich durch unterschiedliche Anordnung der Schnittformen eine große Zahl familienähnlicher Entwurfsvarianten erzeugen - je nach den Details der angestrebten Ausstellungsnutzung. Zum anderen besteht die herzustellende Struktur aus einer großen Anzahl wiederum familienähnlicher aufeinander folgender aber unterschiedlicher Schnittformen, die sich mittels CNC Technologie automatisiert herstellen lassen. Diese Adaptierbarkeit wurde jedoch nur auf konzeptioneller Ebene erreicht - das digitale Modell beinhaltet sie noch nicht; es beschreibt lediglich eine feststehende Geometrie. Da wir die 3D Modelling Software Rhino erst innerhalb des Kurses einführten, war eine Parametrisierung des Modelles innerhalb der kurzen Zeit nicht zu erreichen.

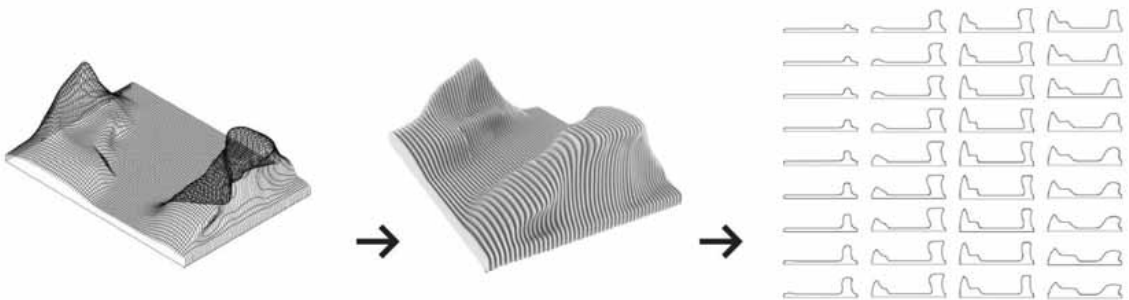


Abb. 4: Digitale Datenerstellung für die Produktion: Vom Volumenmodell zur Segmentierung in den 2D Produktionsdatensatz

Bei der „WellPappWelle“ hatten wir das Glück, mit einem sehr eigenständigen studentischen Team zusammenzuarbeiten. Es wurden unterschiedliche Prototypen im Modellmaßstab 1:20 erstellt, an denen sowohl ergonomische Aspekte, sowie das Ausstellungskonzept als auch die Detail-Konstruktion durchgespielt wurden. Der finale Prototyp wurde mit einem CNC-Laser hergestellt, auf dem die Integrität der Produktionsdaten und die Fügungsdetails überprüft wurden. Somit wurde bereits die vollständige digitale Kette, von der Planung in Rhino bis zum Zuschnitt auf dem Laser, simuliert. Anhand von Teilmodellen im Maßstab 1:1 wurden Belastungs- und Abnutzungstests durchgeführt, die dem Team die Sicherheit für den Start der realen Produktion gaben.



Abb. 5: CNC-Fertigung der Segmente mittels Wasserstrahlschneiden und Detail der Segmente des Messestands

Das Projekt stand unter einem großen Termindruck. Um den Eröffnungstermin halten zu können, mussten die vollständige Fertigung und der Aufbau in acht Tagen erfolgen. Für den Zuschnitt der Pappelemente wurden drei unterschiedliche CNC-Technologien untersucht: Fräsen, Lasern und Wasserstrahlschneiden. Das Fräsen hat unsaubere und das Lasern verrußte Kanten produziert, sodass sich das Wasserstrahlschneiden als die tauglichste Methode herausgestellt hat. Damit wurden sämtliche Segmente an einem Tag produziert. Die Vormontage erfolgte an der Fakultät für Architektur, sodass die eigentliche Montage im Ausstellungsgebäude nur noch sechs Stunden in Anspruch nahm. Die vertikal gestellte Wellpappe zeigte sich als erstaunlich widerstandsfähig und hat dem Ausstellungsbetrieb gut Stand gehalten.

Messestand 2: „Möbiusband“

Planung: 04/08 - 11/08; Umsetzung: 11/08 - 01/09; Produktion / Bau ca. 8 Wochen

Der zweite realisierte Messestand, das „Möbiusband“, sollte räumlicher werden als die „WellPappWelle“ - eine räumliche Struktur, die die Besucher komplett umgibt. Die Idee eines auf Raummaße vergrößerten Möbiusbandes schien uns aus der ersten Bearbeitungsphase dafür besonders geeignet, und von den verschiedenen Realisierungsmethoden, die die Studierenden in der zweiten Bearbeitungsphase vorschlugen, die des in gleiche ebene Polygone zerlegten Bandes. Die ebenen Polygone würden leicht transportierbar sein und in verschiedener Art Informationen und Exponate aufnehmen können. In der dritten Bearbeitungsphase stellte es sich heraus, dass die Zerlegung der nichtorientierbaren Fläche des Möbiusbandes in identische ebene Polygone ein alles andere als triviales geometrisches Problem war, an dem sich die Studierenden wochenlang die Zähne ausbissen. Abhilfe schaffte eine Kollaboration mit den universitätseigenen Mathematikern: unter ihnen fand sich glücklicherweise ein Spezialist für nichtorientierbare Flächen, der auch bereits Erfahrung mit Studierenden der Architektur hatte. Was für diese, obwohl im Masterkurs, kaum lösbar war, gelang einem Mathematikstudenten des zweiten Bachelorstudienjahres an einem Wochenende, und mehr: er programmierte in der Mathematiksoftware Matlab eine interaktive Anwendung, die es erlaubt, Möbiusbänder in der gewünschten Weise geometrisch zu zerlegen. Dabei lassen sich vielerlei Parameter interaktiv verändern und so die Gestalt des Bandes variieren. Darüber hinaus exportiert die Anwendung 3D Daten, die sich mit in der Architektur gebräuchlichen CAD Programmen direkt weiterverwenden lassen.

Die Weiterarbeit wurde dadurch nicht nur enorm erleichtert, sondern eigentlich erst ermöglicht. An dieser Stelle wurde für die Architekturstudierenden überaus eindrücklich klar, wie produktiv der Dialog mit anderen Disziplinen sein kann.

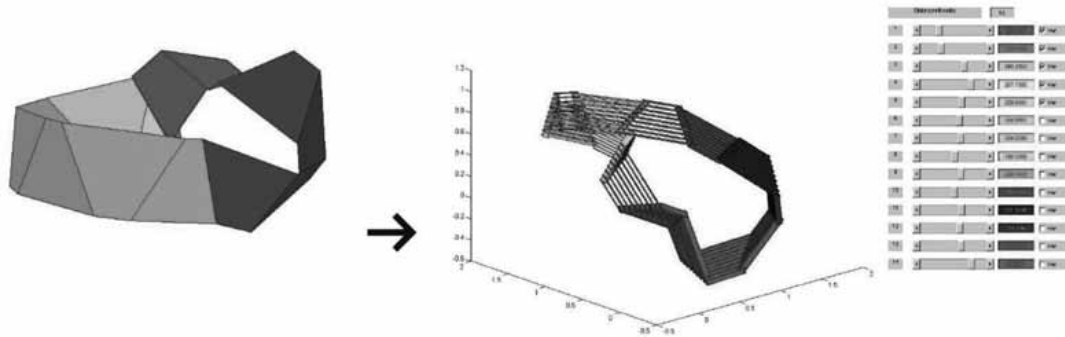


Abb. 6: Im Mathematikprogramm MatLab hergestelltes 3D-Modell mit Trapezflächen (links) und den gebauten Spanten (rechts)



Abb. 7: Transfer der digitalen Geometriedaten zu 2D-Daten für die Spanten und 3D-Daten für die Abstandshalter der Knoten

Beim „Möbiusband“ haben wir mit einem deutlich jüngeren und damit unerfahreneren Team Studierender zusammengearbeitet. Der Koordinationsaufwand und die Redundanzen waren deutlich grösser als bei der „Well-PappWelle“ – allerdings war das Projekt auch wesentlich anspruchsvoller. Die digitale Kette umfasste beim „Möbiusband“ zwei Komponenten – die Spanten und die Abstandshalter der Knoten; alle Komponenten waren in sich vollkommen unterschiedlich und damit zwingend mit CNC Technik zu konzipieren und herzustellen. Die Spanten wurden aus der 3D Anordnung zu 2D Fräspfaden aufbereitet, die jeweils eine spezifische Codierung erhielten. Die Abstandshalter wurden als 3D Geometrie ausgelesen und an einen Hersteller mit einer Fünf-Achs CNC-Fräse übergeben. Die Codierung erfolgte in diesem Fall über eine manuelle Beschriftung. Auch das „Möbiusband“ haben wir im Modellmaßstab 1:5 simuliert; die Integrität der Produktionsdaten für die Spanten wurde am Laser überprüft, allerdings war es praktisch nicht möglich, die Abstandshalter der Knoten mit der notwendigen Präzision herzustellen, sodass in diesem Punkt eine Unwägbarkeit blieb. Den Knoten selbst simulierten wir im Maßstab 1:1 und führten Belastungstests durch, die erwiesen, dass er die notwendige Steifigkeit und Haftreibung hatte. Der Probeaufbau erfolgte zwei Tage vor Messebeginn an der Fakultät für Architektur.

Der mit Nulltoleranz konzipierte Knoten erwies sich als extrem anspruchsvoll in der Praxis; trotzdem wurde das „Möbiusband“ an einem Tag errichtet. Beim „Möbiusband“ bestand die Herausforderung primär darin, die Geometrie handhabbar zu machen; die Umsetzung war dann eine Anwendung der bereits bei der „WellPappWelle“ praktizierten Techniken. Das Team eignete sich umfassende Kenntnisse in der digitalen Planung und auch in der Bauumsetzung (Logistik und Toleranzen) an.

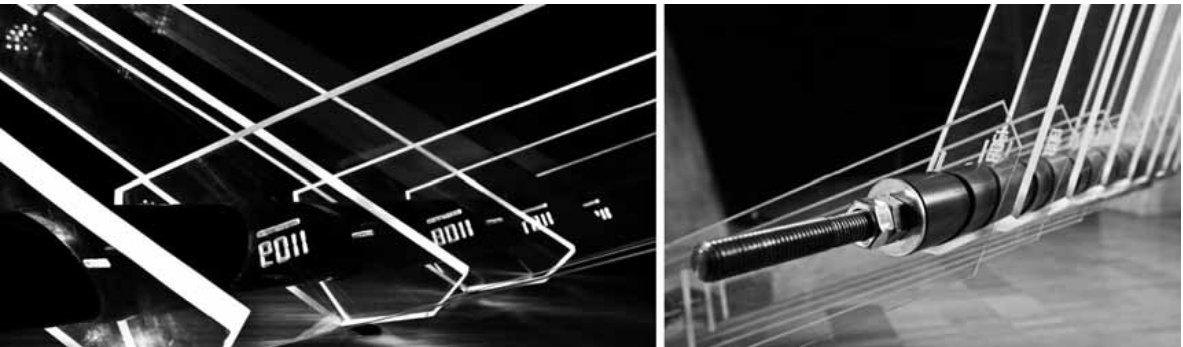


Abb. 8: Details der gefrästen Spanten an den Knotenpunkten

Messestand 3: „Digital Origami“

Planung: 10/09 - 12/09; Umsetzung: 12/09 - 01/10; Produktion / Bau ca. 6 Wochen

Der dritte realisierte Messestand „Digital Origami“ trieb die im Möbiusband gelungene Verräumlichung noch einen Schritt weiter in Richtung einer Art Miniaturgebäude, das als kleinmaßstäblicher Prototyp größerer Gebäude verstanden werden kann. Er besteht aus einer Art Tonnengewölbe, das aus einer Yoshimura Flächenfaltung entwickelt wurde. Yoshimuras Faltung wurde um ein Element erweitert, das das ansonsten plastische räumliche Gebilde aussteifte. Nachdem die „WellPappWelle“ noch ein nichtparametrisiertes 3D Modell war, und das „Möbiusband“ auf das architekturfremde MatLab angewiesen war, gelang es den Studierenden nun selbst, ein adaptierbares Modell in Rhino/Grasshopper zu erstellen. Somit lässt sich durch Variation einiger Parameter eine Vielzahl von Varianten digital erstellen und auf verschiedene Nutzungssituationen und Kontexte anpassen.

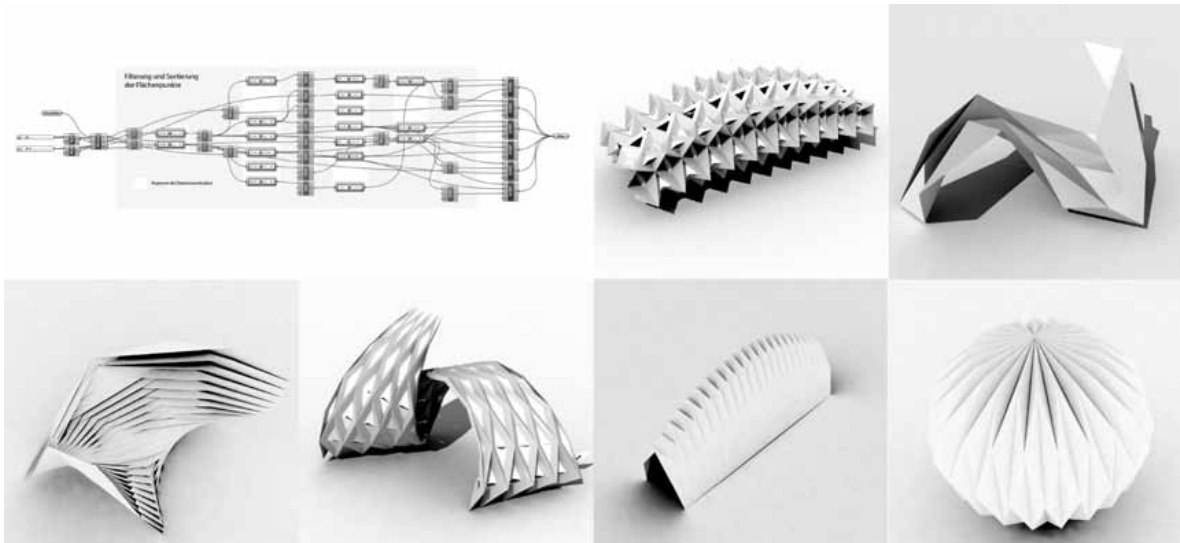


Abb. 9: Programmierung in Grasshopper und Spektrum der Variantenbildung durch die Programmierung

Der enge Zeitrahmen ließ nicht zu, dass wir die digitale Kette im Modellmaßstab simulieren konnten; da wir aber bei diesem Objekt „nur“ mit zehn unterschiedlichen Segmenten gearbeitet haben, war das Fehler-Wiederholungs-Risiko geringer. Produktionsbegleitend wurde ein erstes Segment erstellt, das die Tauglichkeit der Daten und der Konstruktion bewies. Wir hatten das Glück, ähnlich wie bei der Wellpapplandschaft mit einem Teil-Team zu arbeiten, das sehr eigenständig war, sodass der Koordinationsaufwand geringer war. Die Herstellung erfolgte bei unserem Sponsor aus der Wellpappindustrie, der uns einen CNC-Schneidplotter zur Verfügung stellte, auf dem die Pappen hochpräzise und sehr schnell geschnitten wurden. Die vollständige Produktion der Pappen erfolgte an einem Tag. Es folgte die geometrische Ausfaltung der Segmente, die der Origamistruktur die eigentliche Stabilität verleiht. Die Fixierung der Segmente erfolgte durch Klebstoff; eine nicht reversible Methode, die sich jedoch als am besten geeignet erwies.



Abb. 10: Aufbau der Origamistruktur aus Wellpappsegmenten

„Digital Origami“ ist unser am weitesten entwickeltes Konzept. Die digitale Kette war vollständig geschlossen, die Struktur war hocheffizient und die Qualität der Ausführung hochwertig. Die Teilnehmer erkannten die Potenziale digitaler Variantenbildung und die Effizienz der direkten Kopplung mit der Herstellung.

Fazit

Ein konventionelles Entwurfsprojekt im Architekturstudium beschränkt sich im Ergebnis auf die Darstellung eines von einer Person oder zwei Personen erstellten Entwurfes in Zeichnung und Modell und gibt sich meist mit der Anwendung bekannter Techniken und Methoden zufrieden. In der architektonischen Praxis sind jedoch die tatsächliche Herstellung von physisch erfahrbaren Objekten und das fortwährende Erlernen neuer Techniken sowie das Arbeiten im Team von essentieller Wichtigkeit. Diese Aspekte in ein Projekt der Lehre zu integrieren, war Ziel der vorgestellten Seminarreihen. Das dreifache Ziel wurde mehrmals hintereinander erreicht. Nicht nur bauten die Studierenden Messestände selbst und betrieben sie eigenständig, sondern sie eigneten sich dabei auch noch neue Werkzeuge und Kenntnisse über Produktionsmethoden an. Darüber hinaus erlebten sie, wie Nutzer - d. h. Messebesucher - auf ihre - wenn auch kleinen - Gebäude reagierten und mit ihnen umgingen. Zudem agierten die Studierenden mit zunehmender Seminardauer mehr und mehr im Team, teilten sich die Arbeit auf und brachten Talente und Interessen ein, die im konventionellen Architekturstudium nicht selten brach liegen: Organisationsfähigkeit, handwerkliches Geschick, Logistik, Motivation einer Gruppe, Fähigkeit zur Koordination. Wo ansonsten oft Konkurrenz gleicher Rollenverteilung herrscht, entwickelte sich hier arbeitsteilige Kollaboration. Auch die dialogische Zusammenarbeit mit unterschiedlichsten Fachleuten - für Software, Produktion, Materialien, Statik - wurde zum organischen Bestandteil von Lernen und Arbeiten.

Üblicherweise findet solche Kollaboration im Studium meist nicht statt; andere Disziplinen spielen allzu oft die Rolle derer, die etwas bereits entwickeltes realisierbar zu machen haben und nicht die von Partnern während einer Entwicklung. Im Zentrum der Realisierungen standen die neuartigen Möglichkeiten der Parametrik: den Studierenden wurde das Potential der neuen Entwurfswerkzeuge und Produktionsverfahren unmittelbar deutlich, denn mit ihrer Hilfe entwickelten und bauten sie Gebilde, die ohne entsprechende digitale Hilfsmittel kaum oder nur überaus mühsam realisierbar gewesen wären.



Abb. 11: Aufbau der drei Messestände und beleuchteter Messestand Möbiusband (rechts unten)

Wir hoffen, dass die von drei Studierendengenerationen erfahrenen Vorteile der Integration von Lehre, Praxis und Forschung ihr Handeln auch in Zukunft prägen und sie ihre Möglichkeiten stetig erweitern lassen wird.

Für alle 1:1 Projekte, die wir durchgeführt haben, war der Teamgedanke extrem wichtig. Eine hohe Eigenmotivation und eine gute Stimmung unter den Teilnehmern sind elementar für den Projekterfolg. Als Dozenten bzw. Projektleiter mussten wir die Kompetenzen und Kapazitäten der Teilnehmer realistisch einschätzen. Da wir durch die Einbindung in den normalen Lehrbetrieb das Team nicht kontinuierlich leiten konnten, bestimmten wir Teilprojektleiter, die klare Verantwortungsfelder hatten. Es ist wichtig, speziell für die unerfahreneren Teilnehmer klare Teilziele zu definieren. Den Terminplan haben wir realistisch, aber trotzdem straff getaktet, um die notwendige Dynamik zu unterstützen.

Bei allen Projekten haben wir versucht, den Eigenleistungsanteil der Studierenden maximal hoch zu halten und alle Möglichkeiten der "In-House" Pro-

duktion auszuschöpfen. Damit konnten wir den Finanzierungsrahmen überschaubar halten und waren größtenteils unabhängig von externer Fertigung. Die Finanzierung bleibt dennoch eine der größten Herausforderungen bei der Durchführung von Design-Build Projekten. Wir haben für unsere Projekte jeweils eine kleine Anschubfinanzierung der TU Darmstadt erhalten, da wir die Objekte als Messestände für die Außenwirkung der Fakultät für Architektur konzipierten. Jedoch deckte diese Summe nur zwischen 25 und 50% der Gesamtkosten. Ein Materialsponsoring von industriellen Partnern war vergleichsweise einfach zu erwirken, auch vergünstigte Maschinenlaufzeiten einiger externer Partner waren eine große Hilfe; ein Finanzsponsoring war nicht realistisch. Für die Finanzierung sollte ein ausreichender Vorlauf eingeplant werden. Um professionelle Partner für ein Projekt zu gewinnen, ist es wichtig, sie durch Publikationen und Veranstaltungen in den Ablauf einzubinden. Idealerweise hat die Arbeit einen Forschungs- und Innovationsaspekt, der einen langfristigen Mehrwert für alle Beteiligten generiert.

Bleibende Planungs-, Team- und Lebenserfahrung

Die drei Projekte hatten jeweils einen anders gelagerten Fokus. Das übergreifende Lehr- und Lernziel, den Studierenden ein Grundverständnis zur parametrischen Methodik zu vermitteln, wurde jedoch immer erreicht. Die „WellPappWelle“ war strukturell einfach, da sie „aus dem Vollen“ modelliert wurde. Dadurch konnte sie sehr gut auf ergonomische Anforderungen reagieren. Diese graduelle Varianz ist eines der Hauptpotenziale der parametrischen Planung. Die größte Herausforderung beim „Möbiusband“ war das digitale Handling und die Baubarkeit der komplexen Geometrie. Die Vernetzung zwischen unterschiedlichen Programmen in Planung und Fertigung vermittelte den Teilnehmern ein übergreifendes Verständnis für die Potentiale der digitalen Kette. Die Faltung des parametrischen Origami verursacht starke systeminhärente Abhängigkeiten, die sich nur begrenzt variieren lassen. Durch die Weiterentwicklung der Software Rhino / Grasshopper von 2007 bis 2009 waren wir in der Lage, das „Digital Origami“ Projekt vollständig „In House“ zu programmieren und die Programmdateien der digitalen Fertigung zuzuführen. Die Teilnehmer haben dabei ein umfassendes Verständnis des digital vernetzten Planens und Produzierens erhalten.

Wir halten die Methode 1:1 für sehr geeignet zur nachhaltigen Vermittlung architektonischen Wissens. Sie ist mit einer hohen Intensität für die Lernenden und die Lehrenden verbunden – das Resultat entschädigt jedoch immer für die durchlebten Anstrengungen. Aus einzelnen Studierenden wird ein

großes Team, dessen Mitglieder ihre unterschiedlichen Anlagen, Interessen und Fähigkeiten einzubringen lernen und sich dabei selbst weiterentwickeln. Dies ist im Durchlaufen sämtlicher Projektphasen verbunden mit dem Kennenlernen neuer Werkzeuge und Verfahren weit besser möglich als in sonst üblichen Entwurfsprojekten, die auf Einzel- oder Kleingruppenarbeit in Konzeption und Darstellung fokussieren.

Literatur zu den beschriebenen Projekten

Matcha, Heike; Karzel, Rüdiger 2010, Expo 15.3: Experimental Parametric Object: Messestand für den Fachbereich 15: Digital Origami, Technische Universität Darmstadt

Matcha, Heike; Karzel, Rüdiger 2009, Expo 15.2: Experimental Parametric Object: Messestand für den Fachbereich 15: Möbiusband, Technische Universität Darmstadt

Matcha, Heike; Karzel, Rüdiger 2008, Expo 15.1: Experimental Parametric Object: Messestand für den Fachbereich 15: Wellpappwelle, Technische Universität Darmstadt

Matcha, Heike; Ljubas, Ante 2010, „Parametric Origami“, in: Proceedings der eCAADe Konferenz, Zürich

Matcha, Heike; Karzel, Rüdiger 2009, „Experimental Design-Build“, in: Proceedings der eCAADe Konferenz, Istanbul 2009

Matcha, Heike; Karzel, Rüdiger; Quasten, Gero 2008, „Architectural Design with Parametric Modeling and Customized Mass Production“, in: ISSEI 2008 Konferenz, Helsinki

Matcha, Heike; Barczik, Günter 2011, „Mass Diversity: Individualized housing via parametric typology“, in: Structuralism Reloaded? Rule-Based Design in Architecture and Urbanism; Tomás Valera, Tom Avermaete, Georg Vrachliotis (eds.), Edition Axel Menges

Matcha, Heike 2010, „Regelbasierte Planung - Parametrik“, in: Digitale Prozesse: Planung, Gestaltung, Fertigung; Moritz Hauschild, Rüdiger Karzel, Detail Praxis

Matcha, Heike; Barczik, Günter 2009, „Produktive Prozesse: Mehr Vielfalt, Komplexität und Kreativität im Entwerfen mittels parametrisierter generativer Algorithmen“, in: Modulare Strukturen in Architektur und Entwurf; Asterios Agkathidis, BIS Publishers

Matcha, Heike; Bokowski, Jürgen 2011, „Möbius Strip Segmented into Flat Trapezoids: Design-Build Project by the Departments of Architecture and Mathematics of the Technische Universität Darmstadt“, in: Nexus Network Journal, Architecture and Mathematics, Vol.1 No. 3, Birkhäuser / Springer 2011

Abbildungsnachweis

Alle Bilder und Grafiken haben Copyright der TU Darmstadt mit Ausnahme folgender Photos:
Abb. 1 oben links; Abb. 5 rechts: Photograph Thomas Ott
Abb. 1 oben rechts u. unten; Abb. 8 links u. rechts; Abb. 11 rechts unten: Photograph Stefan Daub