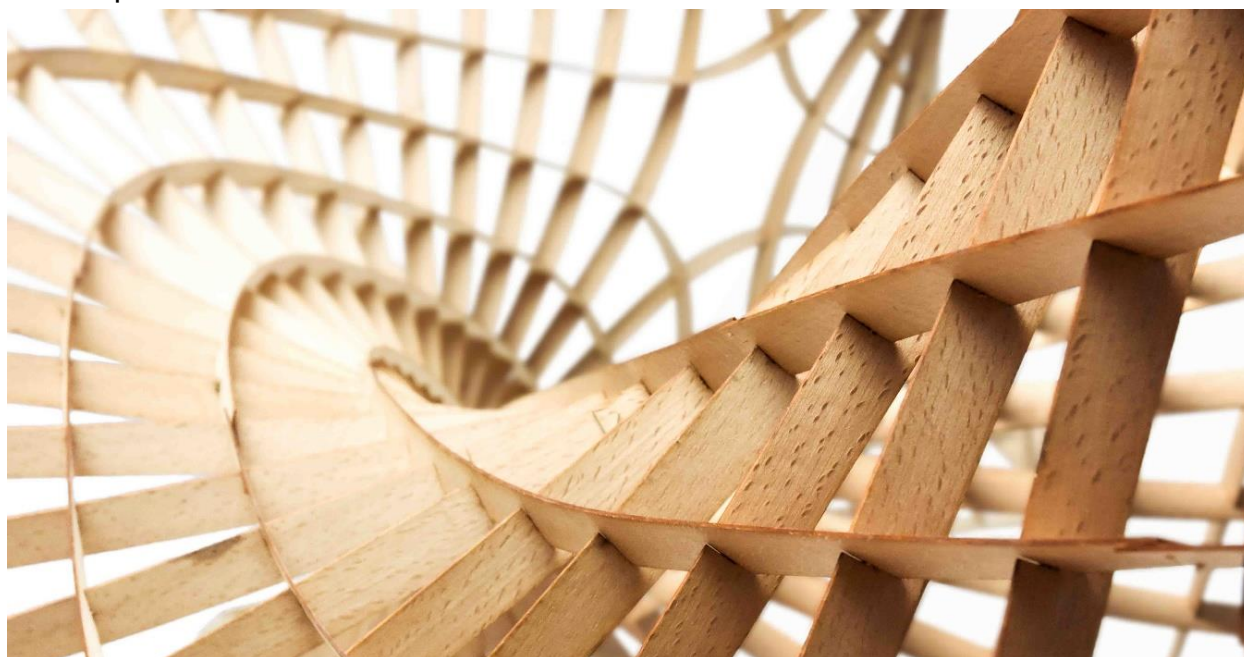




### **Inside/Out: Forschungspavillon am Stammgelände der TUM**

*Im Oktober 2017 wurde im M&T-Ratgeber Produktivität ein Beitrag mit dem Thema „Aufwendiges einfacher planen“ veröffentlicht. Darin wurde eine neue Konstruktionsweise für gebogene Gitterschalen vorgestellt. Am 6. November 2017 wurde nun der Forschungspavillon Inside/Out am Stammgelände der Technischen Universität München eröffnet. Der Versuchsbau zeigt eindrucksvoll, welche Formen und Spannweite mit einfachstem Mitteln erstellt werden können.*

Das Forschungsprojekt am Lehrstuhl für Tragwerksplanung untersucht die Möglichkeit eine zweifach gekrümmter Gitterschalen mit einfachen und gleichen Bauteilen zu erzeugen. Der Pavillon ist aus **geraden Blechstreifen** und **gleichförmigen, rechtwinkligen Knoten** gefertigt. Die Entwurfsmethode beruht auf so genannten „Asymptotischen Linien“ die entlang einer Minimalflächen zu einem quadratischen Netz verbunden werden.



*Erstes Entwurfsmodell eines asymptotischen Netzwerkes auf Basis einer Minimalfläche.*

*Design & Foto: Denis Hltrec*

### **Geometrie und Modellierung**

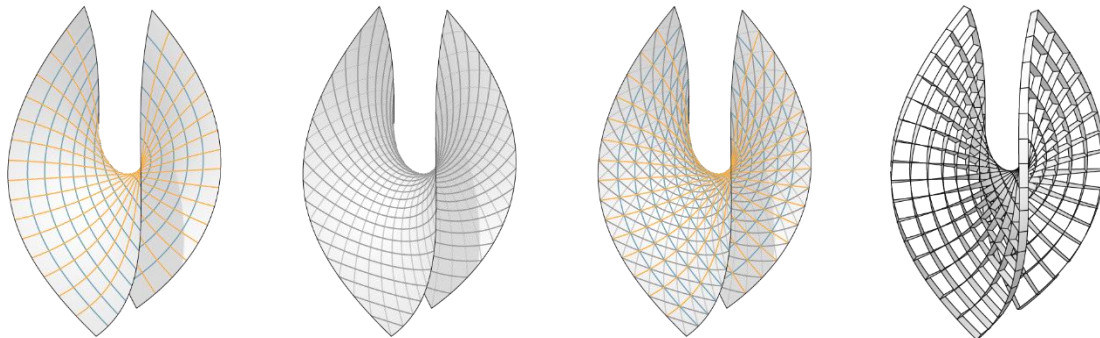
In der ersten Phase des Forschungsprojektes die asymptotischen Linien, und ihre geometrischen Eigenschaften als streifenförmige Elemente untersucht. Hierfür wurde ein eigener Algorithmus entwickelt. Schritt für Schritt wird damit auf einer Sattelfläche der Pfad der geringsten Krümmung gefunden, entlang diesem Pfad findet keine Verdrehung um die lokale y-Achse statt. Konstruiert man eine Gitterstruktur entlang diesen Kurven, so lassen sich die einzelnen Elemente aus geraden Streifen herstellen.



Für den Entwurf des Pavillon wurde eine spezielle Minimalfläche generiert. Ähnlich wie eine Seifenhaut bildet diese Form die kleinstmögliche Fläche zwischen den Rändern ab. Dadurch hat der Pavillon nicht nur eine sehr effiziente Grundgeometrie, die oben genannten asymptotischen Linien treffen auf solch einer Minimalfläche immer im neunzig Grad Winkel aufeinander. Das bedeutet, alle Knotenpunkte lassen sich gleichförmig und im rechten Winkel fertigen. Das vereinfacht die Herstellung und Logistik und senk die Kosten.

### **Statische Berechnung**

Das Gitter wurde auf seine Tragfähigkeit untersucht. Das hierfür erzeugte FE-Modell berücksichtigt nicht nur Eigengewicht und externe Lasten, wie Wind oder Schnee. Es berechnet außerdem die Spannungszustände der gebogenen Blechstreifen, die durch die elastische Verformung im Bauprozess entstehen. Damit kann das Tragverhalten sehr genau vorhergesagt werden. Die Struktur ist erstaunlich steif. Die aufrechtstehenden Lamellen nehmen Lasten gut über ihre starke Achse auf. Das gekrümmte Gitter ermöglicht zudem eine räumliche Lastabtragung. Es stellt sich eine Schalentragwirkung ein, die die Lasten über Druck und Zug in die Auflager leitet.



*Testfläche mit homogenem asymptotischen Netz, Überlagerung mit einem Hauptkrümmungsnetz und Streifengeometrie*

### **Prototypen**

In der zweiten Projektphase wurde die neue Entwurfsmethode in einer Reihe von physischen Versuchen getestet. Anhand dieser Modelle lässt sich die Verhaltensweise der Struktur und der einzelnen Bauteile gut nachvollziehen. Es wurden zwei Prototypen gebaut, einer in Holz, einer in Stahl, um die Herstellung, den Bauablauf und die Tragfähigkeit zu vergleichen. Dabei wurden praktische Detaillösungen für beide Materialien entwickelt. Auf Basis dieser Prototypen wurde eine präzises Fertigungs- und Konstruktionsverfahren für den großmaßstäblichen Experimentalbau festgelegt.



Zuerst wurde ein Prototyp aus drei Millimeter dicken Holzlamellen gebaut. Die beiden Scharen verlaufen in zwei Ebenen und sind durch Quadratbolzen miteinander gekoppelt.  
Foto: Eike Schling

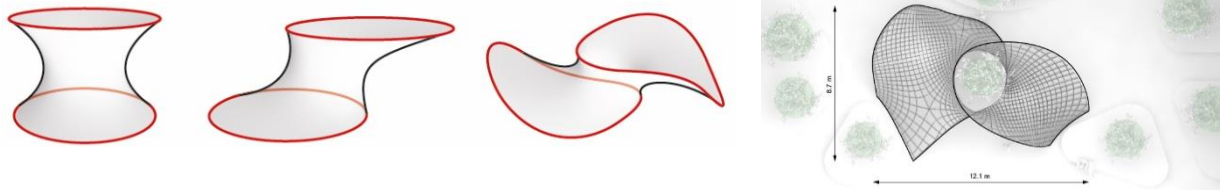


Der zweite Prototyp wurde aus 1,5 Millimeter dicken Blechstreifen gesteckt. Hierbei wurde das erste Mal „Bottom-Up“ Aufbauprozess angewandt, in dem das Gesamte Modell in seine dreidimensional Form gebogen wird.  
Foto: Eike Schling



### **Entwurf**

Schließlich wurden die Erkenntnisse aus Theorie und Praxis in einem architektonischen Projekt angewandt. Von dem Entwurf einer maßgeschneiderten Fläche bis hin zur Baugestaltung mussten alle Planungsphasen durchschritten werden.



*Die Entwurfsfläche entstand durch die Transformation eines Katenoiden (links). Sie passt sich so dem Bauplatz an.*

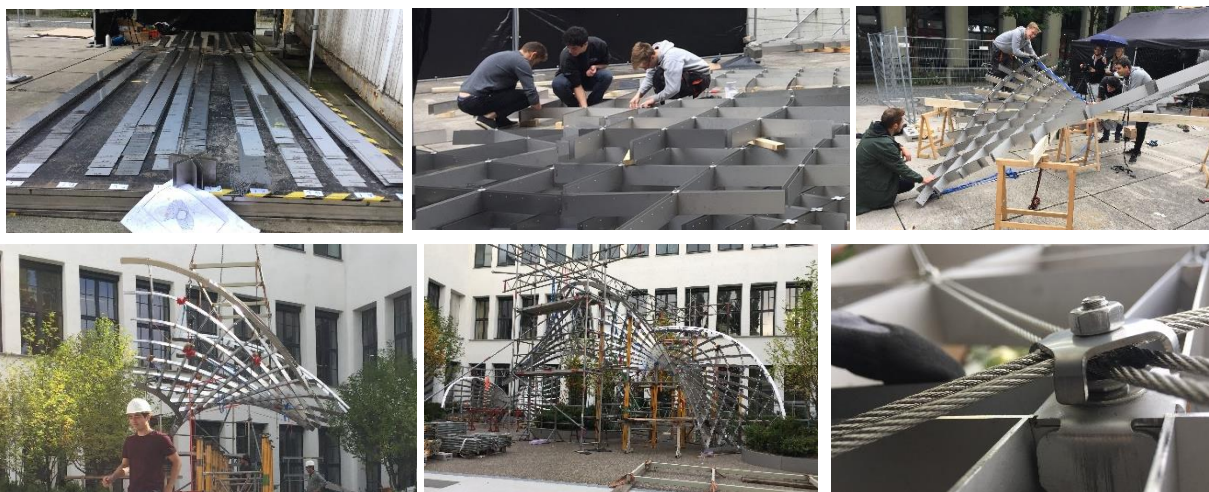
Der Inside/Out Pavillon ist eine frei entworfene Minimalfläche, die sich an die Umriss des begrünten Innenhofes am Stammgelände anpasst. Als Ausgangsform diente ein Katenoid - die Minimalfläche zwischen zwei Kreisen. Durch Manipulation der Ränder wurde eine skulpturale Fläche geschaffen, die sich von innen nach außen stülpt und daher den Namen Inside/Out erhielt. Das etwa neunzig Quadratmeter große Gitter schmiegt sich dabei um einen Baum, der im Zentrum des Hofes steht. Die Struktur ist aus einfachen 1,5 Millimeter dicken und hundert Millimeter hohen Edelstahlstreifen gefertigt und hat ein Flächengewicht von nur 18 Kilogramm pro Quadratmeter, ein Gesamtgewicht von etwa 1,6 Tonnen.

### **Planung**

Nachdem die Fläche und das Kurvennetz digital erzeugt wurden, ist die Erstellung der Werkplanung denkbar einfach. Ein automatisiertes Programm misst die Abstände zwischen jedem Knotenpunkt und zeichnet die Verbindungspunkte entlang den geraden Blechstreifen an. Die Edelstahlstreifen werden dann im Werk mit dem Laser zugeschnitten und verschickt.

### **Aufbau**

Der Aufbau selbst beruht auf einfachen Arbeitsschritten: Die geraden Blechstreifen werden mit der Hand ineinandergesteckt und zu ebenen Segmenten verschraubt. Dann wird das Gitter in seine dreidimensionale Form gebogen. Alle Knoten werden im rechten Winkel fixiert und die Segmente durch zusätzliche Randbleche verstärkt. Der Inside/Out Pavillon besteht aus neun solcher Segmente, die auf der Baustelle, wie ein großes 3D Puzzle zusammengesetzt wurden. Diagonallaufende Stahlseile sorgen für die ausreichende Steifigkeit der Gitterschale.



*Die geraden Blechstreifen werden mit der Hand ineinandergesteckt und anschließend in die dreidimensionale Form gebogen. Der Inside/Out Pavillon besteht aus neun vorgekrümmten Segmenten, die auf dem Bauplatz miteinander verschraubt wurden.*

Fotos: Eike Schling

### **Inside/Out**

Inside/Out ist die erste architektonische Struktur, die sich die Vorteile von asymptotischen Linien zu nutzen machen. Der Experimentalbau mit etwa zwölf mal neun Meter Spannweite zeigt, dass auch frei geschwungene Flächen und extravagante Formen einfach und günstig hergestellt werden können. Die räumliche Krümmung ermöglicht ein effizientes Tragverhalten als Gitterschale. Dem Einsatzgebiet der neuen Konstruktion sind keine Grenzen gesetzt.



*Untersicht des Inside/Out Pavillon. Das Gitter aus gebogenen Stahllamellen überlagert sich mit dem der Diagonalen Stahlseile.*

Foto: Felix Noe



*Der Pavillon wird im Jubiläumsjahr der TUM, 2018, als Veranstaltungsort dienen. Im Frühjahr soll hierfür eine Membrandeckung angebracht werden.*

*Foto: Felix Noe*

## **Interview Thomas Brandl**

### ***Warum haben Sie sich an der Umsetzung der spannenden Idee beteiligt?***

Die neuartige Konstruktionsmethode weckte bereits bei der Startbesprechung meine Begeisterung und Leidenschaft.

Als ich dann die erste Modelle und Entwürfe von möglichen Gitterstrukturen als 3D-Druck in den Händen gehalten habe, war ich beeindruckt von der besonderen Anmut dieser sog. Minimalflächen.

In der modernen Architektur sind heutzutage dreidimensionale Flächen keine Seltenheit mehr, jedoch fehlt diesen oftmals an Eleganz und Ästhetik oder besser gesagt, ein gleichmäßiger und durchweg harmonischer Linienverlauf.

Hinzu kommt natürlich noch die spannende Mathematik der Flächen, die uns als Ingenieure zusätzlich anspricht und fasziniert.

### ***Wo sehen sie als Stahlbauer die entscheidenden Vorteile der neuen Bauweise?***

Gerade Bauobjekte mit mehrfach gekrümmte Flächen und Geometrien stoßen aufgrund ihrer Komplexität an den Stoß- und Koppelpunkten oftmals an die Grenzen der Plan- und Kalkulierbarkeit und letztlich damit auch an die der wirtschaftlichen Produzierbarkeit.

Mit einer der faszinierenden Bestandteile des vorliegenden Konzepts ist sicherlich, dass sich die vorher berechnete Form zwangsläufig einstellt und für den Zusammenbau keine unzähligen Schablonen, Lehren oder Messpunkte erforderlich sind. Auch die entwickelte Fügetechnik mit den stets gleichen und rechtwinkligen



Knotenpunkten trägt in erheblichem Maß dazu bei den Aufwand für Fertigung und Montage zu reduzieren.

***Welches waren die größten Schwierigkeiten bei der stahlbautechnischen Umsetzung?***

Nachdem Herr Schling und wir eine geeignete Konstruktionsweise für den Knotenpunkt gefunden und die notwendigen Toleranzen für den Laserschnitt definiert hatten, war in der Tat der Pavillon schon zum größten Teil gebaut. Die Umsetzung an sich stellte für uns vergleichsweise keine große Schwierigkeit mehr da.

***Welche Marktchancen sehen Sie für die neue Stahlbauweise?***

Durch die Realisierung des Pavillons wurde eine neuartige Konstruktionsweise von gitterförmigen Tragstrukturen entwickelt und erprobt, welche ein extrem niedriges Flächengewicht mit hoher Tragfähigkeit und Eigenstabilität kombiniert. Die besonders geschwungene Form des hier realisierten Pavillons ist sicherlich mehr als ein Kunstwerk zu verstehen, soll aber auch aufzeigen, was mit dieser Konstruktionsart alles möglich ist. Ich persönlich sehe hier beispielsweise als selbsttragende und weitspannende Dachkonstruktion großes Potential für künftige Projekte.

**Interview Eike Schling**

***Wie kamen Sie auf die Idee mit der neuen Stahlbauweise?***

Man darf sich die Forschung nicht so vorstellen, als hätte da plötzlich jemand die zündende Idee. Wir haben uns über Jahre mit den Eigenschaften von Krümmung beschäftigt, im experimentellen Entwurf, im Gespräche mit Mathematikern und Ingenieuren. Ein wichtiger Schritt in dieser Entwicklung war aber die Phase in der die gebogenen Gitterschalen von Frei Otto untersucht wurden. Irgendwann stellte ich mir die Frage: Warum kann mal solche Gitterschalen eigentlich nicht aus hohen, tragfähigen Profilen bauen? Das war womöglich der Knackpunkt an dem sich das Forschungsziel seitdem orientiert.

***Welches waren die größten Probleme bei der Umsetzung der Idee?***

Erstmal ist da natürlich die Herausforderung ein geometrisch so komplexes Thema am Computer zu beherrschen. Am Anfang mussten wir erstmal unsere eigenen Werkzeuge entwickeln, um überhaupt in der Lage zu sein ein solches dreidimensionale Gitter zu planen. Dazu kam dann natürlich die Physik! Nur weil ich etwas am Computer zeichnen kann, heißt das noch lange nicht, das es in Wirklichkeit funktioniert. Und schließlich die Umsetzung als Bauwerk. Ich hatte alle Einzelteile perfekt geplant aber die Komplexität des Bauablaufes, die hatte ich bei weitem unterschätzt. Ein Glück hat sich da die Zusammenarbeit mit dem Büro Brandl bezahlt gemacht.



***Welche entscheidenden Vorteile ergeben sich durch die neue Bauweise: für den Kunden, für den Planer und für den Stahlbauer?***

Mit der neuen Konstruktionsweise lassen sich geschwungene Dächer wesentlich einfacher und kostengünstiger bauen. Die natürliche Ästhetik, die nur den Regeln der Geometrie folgt, gibt es sozusagen umsonst dazu!

In der Planung hingegen braucht man die richtigen Tools und muss die elastischen Eigenschaften des Materials beachten. Das ist erstmal ungewohnt, aber spätestens, wenn sich jeder Knoten im 90° Winkel trifft freut sich der Stahlbauer natürlich über die günstige Herstellung!

***Wo sehen Sie die besonderen Einsatzbereiche?***

Ich glaube, dass wir die vielen Potentiale noch gar nicht absehen können. Wir haben jetzt die Möglichkeit eine sehr effiziente, räumliche Tragstruktur aus geraden Blechen mit immer gleichen Knoten zu fertigen. Die Herstellung und der Aufbauprozess lassen sich soweit vereinfachen, dass selbst ohne professionelles Werkzeug eine weitgespannte Überdachung schnell aufgebaut werden kann. Das System könnte für Entwicklungsprojekte oder in Katastrophengebieten eingesetzt werden, hat aber gleichzeitig das Potential für Stadien-Dächer oder Solarstationen.

***Welches sind die nächsten Schritte in der Umsetzung der neuen Bauweise?***

Unsere Forschung läuft ständig weiter. Im Frühjahr wollen wir die ersten Prototypen zur Fassade aufbauen. Dabei untersuchen wir neben Lösungen mit Membranen auch die Eindeckung mit ebenen Glasscheiben. Und natürlich freuen wir uns schon auf das erste Bauprojekt außerhalb der Universität. Ein paar Anfragen haben wir zumindest schon!



**Projektbeteiligte:**

Technische Universität München  
Fakultät für Architektur  
Lehrstuhl für Tragwerksplanung  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

**Planung:**

Dipl.-Ing. Architekt Eike Schling  
Cand. Ing. Denis Hitrec  
M.Sc. Jonas Schikore

**Aufbau:**

Eike Schling, Denis Hitrec, Andrea  
Schmidt, Viktor Späth, Miquel Lloret  
Garcia, Maximilian Gemsjäger,  
Jonas Schikore und mehr ...

**in Zusammenarbeit mit:**

Brandl Metallbau  
Eitensheim

Technisches Zentrum, TUM  
Matthias Müller, Schlossermeister

**mit Unterstützung von:**

TeDa (Isogeometrische B-Rep Analyse)  
Lehrstuhl für Statik, TUM

Prof. Helmut Pottmann  
Institute of Applied Geometry, TU Wien

Evolute, The geometry experts  
Wien

Pfeifer, Seil- und Hebetchnik  
Memmingen

**gefördert von:**

Dekanat der Fakultät für Architektur

Dr. Marschall Stiftung

Leonhard Lorenz Stiftung

ARI / Architectural Research Incubator