

- Ermittlung der Schubeigenschaften von Sandwichkernen
- Geschlitzte Fassadenunterkonstruktionen
- Numerische Analyse von Zweifeld-Sandwichträgern unter Punktlasten
- Digitalisierung im Metalleichtbau
- Druckschachtpanzerungen mit mehreren Schubringen

# Digitalisierung im Metalleichtbau

Die Digitalisierung der Planung, Konstruktion und Bauausführung führt zu einer Transformation des Berufsbilds bei Architekten und Ingenieuren. In diesen Fachbereichen unterstützen digitale Werkzeuge schon seit vielen Jahren die Entwurfs- und Designprozesse, doch gerade in der heutigen Zeit wird der Einsatz effizienter, digitaler und innovativer Technologien auf allen Arbeitsbereichen als unabdingbar betrachtet. Das Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau an der RWTH Aachen University untersucht den Mehrwert des integrativen Einsatzes solcher Technologien im Metalleichtbau. Dieser Aufsatz gibt in diesem Kontext einen Einblick in Forschung und Lehre und stellt Projekte aus der Praxis vor.

**Stichworte** Digitalisierung; Computational Design; parametrische Planung; Metalleichtbau

## Digitalization in lightweight metal construction

Digitalization of planning, design and construction leads to a transformation among architects and engineers. Digital tools have been supporting the drafting and design processes in these specialist areas for many years. Today the use of efficient, digital and innovative technologies in all work areas is considered indispensable. The teaching and research area of sustainability in lightweight metal construction at the RWTH Aachen University examines the added value of the integrative use of such technologies in lightweight metal construction. In this context the article provides an insight into research and teaching and presents practical projects.

**Keywords** digitalization; computational design; parametric design; lightweight metal construction

## 1 Einleitung

Digitalisierung ist ein fortwährender Prozess, welcher Gesellschaft und Berufe annähernd aller Branchen inzwischen Jahrzehnte begleitet. Auch das Bauwesen befindet sich in einem kontinuierlichen technologischen Wandel. Besonders in der heutigen Zeit wird der Einsatz effizienter, digitaler und innovativer Technologien in allen Arbeitsbereichen als unabdingbar betrachtet. Digitale Technologien in Form von Hard- und Software tragen bei zur

- zeitlichen Beschleunigung der Hochbauplanung,
- Steigerung der Produktivität,
- Reduktion menschlicher Fehler,
- Verbesserung der Fertigungs- und Ausführungsgenauigkeit,
- Erleichterung bei Abwägung bzw. Bewertung von möglichen oder geeigneten Lösungen aus einem großen Lösungsraum.

Digitale Bauwerksmodelle fördern integrierte Prozessketten, die Planung, Ausführung und Betrieb von Bauwerken verbessern. Herstellerunabhängige Datenaustauschformate erleichtern die interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Beteiligten am Bau.

Parametrische Planungswerkzeuge sind etablierter Stand der Technik in wesentlichen Bereichen der Hochbauplanung. Spezialisierte Fachbereiche wie das Fachgebiet Metalleichtbau und Bereiche des Stahlbaus können von Weiterentwicklungen und dem verbreiteteren Einsatz profitieren.

Verfügbare Hardwarelösungen wie präzise Messtechnik, z.B. Fotogrammetrie oder terrestrisches Laserscannen, als auch moderne Apparate wie tragbare holografische Computer, unbemannte Luftfahrzeuge oder autonome Systeme wie agile mobile Roboter bieten immenses Potenzial für das Bauwesen. Den Mehrwert für Metalleichtbau durch integrativen Einsatz solcher Technologien untersucht das Fachgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau der RWTH Aachen University.

Dieser Aufsatz stellt Projekte aus der Praxis vor in Verbindung mit einem Einblick in Forschung und Lehre. Vorangestellt ist ein Rückblick in die geschichtliche Entwicklung ausgewählter Planungswerkzeuge.

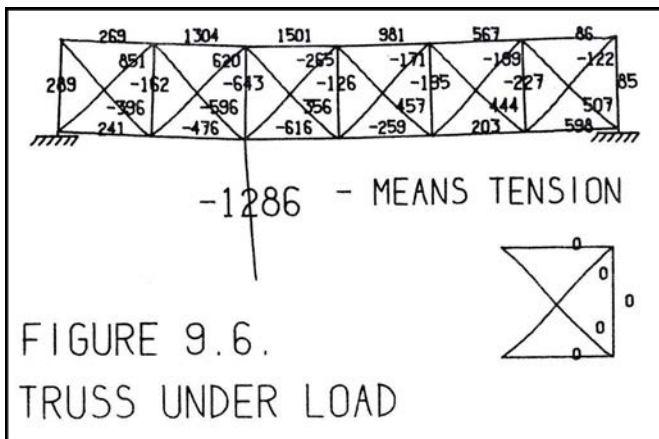
## 2 Digitale Planungswerkzeuge

### 2.1 Entstehung digitaler Planungswerkzeuge

Konstruktionsbranchen allgemein betreffend, entstanden bereits in den 60er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts elektronische Datenverarbeitungssysteme, deren Zweck die Unterstützung der Planungstätigkeit ist. Bereits 1957 stellte Dr. Patrick J. Hanratty das numerisch gesteuerte Zeichensystem PRONTO vor. Die konzeptionelle Vision, wie ein Bauwerk am Computer durch Spezifikation von Bauteilen erstellt wird, beschrieb 1962 Douglas C. Engelbart [1]. Bedeutender Pionier war Ivan Edward Sutherland mit seinem im Jahr 1963 vorgestellten Programm Sketchpad: A man-machine graphical communication system (Bild 1) [2].



**Bild 1** Sketchpad in Benutzung [2]  
Sketchpad in use [2]



**Bild 2** Beispiel einer parametrischen Tragwerkszeichnung unter Last in Sketchpad, von Ivan E. Sutherland [2, S. 128]  
Sketchpad example of parametric drawing of truss under load, by Ivan E. Sutherland [2, p. 128]

Das Sketchpad Forschungssystem, welches auf einem TX Computer des Lincoln Laboratory am MIT lief, wurde u. a. mit einem Leuchtstift bedient. Das Beispiel in Bild 2 zeigt eine parametrische 2D-Skizze einer Fachwerkbrücke unter Last.

Kommerzielle Computer-Aided-Design-Systeme setzten sich zunächst im Maschinen- und Fahrzeugbau durch. Um Kurven und Flächen mit Krümmungsverlauf mathematisch präzise zu dokumentieren, entwickelte 1968 Pierre Bézier bei Renault das 3D-CAD-Programm UNISURF [3].

Im Bauwesen etablierten sich in den letzten Jahrzehnten Softwarelösungen wie das allgemeine Computer Aided Design (CAD) sowie das fachspezifischere Computer Aided Architectural Design (CAAD) und weitere Spezial-Softwarelösungen bspw. für die Tragwerksberechnung und bauphysikalische Simulationen.

Bei der Wandlung vom analogen Zeichenbrett zu digitalen Werkzeugen entstanden Zeichenprogramme mit prin-

zipiell unterschiedlicher Funktionsweise. Die Anwendungen, denen eine Seitenbeschreibungssprache zugrunde liegt, bilden – vereinfacht ausgedrückt – die geometrischen Zeichnungselemente in Entstehungs- bzw. Bearbeitungsreihenfolge ab. Objektorientierte Modelliersoftware speichert geometrische Entitäten und Attribute in gegliederter Weise, vergleichbar mit zusammenhängenden Tabellen. Parametrische Konstruktionsprogramme dokumentieren hierarchisch die einzelnen Bearbeitungsschritte der Modellierung, wodurch die Historie der Konstruktion nachträglich veränderbar bleibt. Beispielsweise können Anpassungen an frühzeitig definierten Daten und Aktionen des abstrakt dargestellten Konstruktionsverlaufs weitreichende Änderungen am Modell hervorbringen.

Programme für Gebäudedatenmodellierung bzw. Building Information Modeling liegen üblicherweise Datenbanken zugrunde, in welchen die Eigenschaften der Bauteile abgelegt sind. Zeichnungsansichten in BIM-Anwendungen sind effektiv Abbildungen, gerendert bzw. wiedergegeben aus ebendiesen Datenbanken.

Im Jahr 1975 beschrieb Charles Eastman das Konzept des Building Design Systems (BDS), welchem die Planung eines Bauwerks als interaktives Definieren von (Bau-) Elementen über deren Form, Eigenschaften und Anordnung zugrunde liegt [4].

RUCAPS (Really Universal Computer Aided Production System), von Dr. John Davison und John Watts, war in den 1970er-Jahren eines der frühen Softwaresysteme für den Hochbau, in dem 3D-Objekte in einer Datenbank angelegt wurden, aus der 2D-Ansichten und Listen abgeleitet wurden [5].

Den Übergang vom computergestützten Zeichnen zum Modellieren von Bauwerken erläuterte Simon Ruffle 1986 in *Architectural Design Exposed: From Computer-Aided-Drawing to Computer-Aided-Design* [6].

Mehrere Planungsdisziplinen, wie Architektur und Ingenieurwesen, in einer integrierten Building-Modeling-Anwendung zusammenzuführen, welche mittels strukturiertem Datensatz sowohl geometrische Repräsentation als auch symbolische Abbildung kombiniert, beschrieb 1986 Robert Aish als Konzept [7].

Zu den in Deutschland kommerziell verbreiteten BIM-Programmen zählen (ohne Wichtung der Reihenfolge) u. a. ArchiCAD (Graphisoft, Gábor Bojár), Revit (Autodesk (davor Charles River Software), Leonid Raiz, Irwin Jungreis), Allplan (Nemetschek), Tekla Structures (Trimble) und weitere.

Obwohl die theoretischen Vorteile eines von allen Parteien des Planungsprozesses gemeinsam bearbeiteten zentralen Modells offenkundig sind, verwenden Planungsbüros je nach Fachrichtung sehr unterschiedliche Branchenlösungen. Projektbeteiligte müssen für eine rei-

burgslose Zusammenarbeit ihre Daten verlustfrei importieren und exportieren können, um deren Teil- bzw. Fachmodelle in ein Gesamt- oder Koordinationsmodell zu übertragen.

Diesen Datenaustausch zu normieren, ist Ziel der seit 1996 existierenden Industry Foundation Classes, welche von buildingSMART International definiert werden [8]. Die aktuelle IFC-Version 4 ist ein offizieller ISO-Standard mit der Nummer ISO 16739-1:2018 [9].

## 2.2 Direktes Modellieren und parametrisches Modellieren

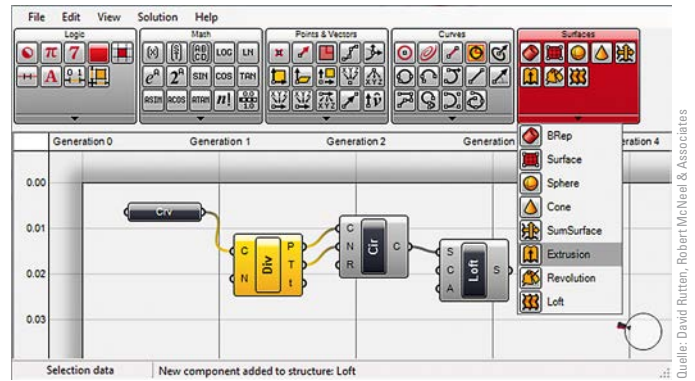
Direktes Modellieren und parametrisches Modellieren sind zwei sich ergänzende Paradigmen im Bereich des räumlichen Konstruierens. Beim direkten Modellieren wird Geometrie erzeugt und bearbeitet, ohne dass der zusammenhängende Verlauf von Bearbeitungsvorgängen abgespeichert bzw. dem Benutzer zur nachträglichen Modifikation zugänglich ist. Hingegen beim parametrischen Modellieren werden Objekte mitsamt bearbeitbaren Eigenschaften und Entstehungsverlauf erstellt. Werden Veränderungen am Modell vorgenommen, welche die Entstehungslogik betreffen, wie bspw. durch Änderung von Zwischenschritten, Funktionswerten oder geometrischen Abhängigkeiten, werden anschließend auch Modell und Derivate wie Zeichnungen und Listen neu berechnet.

## 2.3 Entwicklung des Bereichs Design Computation

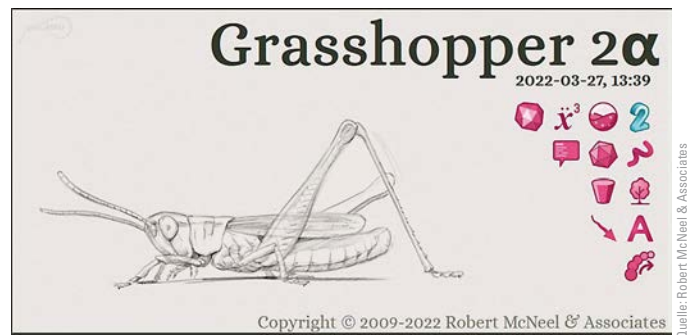
Als Einstieg kann die Stapelverarbeitung betrachtet werden – in kommandozeilenbasierten Programmen lassen sich mit einfachen Makros repetitive Zeichenvorgänge durchführen. Weiterführend ermöglichen in CAD-Standardsoftware eingebettete Programmiersprachen, dass Konstruktionsabläufe mittels Variablen, Methoden und Kontrollstrukturen programmatisch definiert werden. Über Programmierschnittstellen (Application Programming Interface) können Anwendungserweiterungen, sog. Plug-ins, geschrieben werden.

Obwohl universelle Programmiersprachen mächtige Steuerungswerkzeuge sind, haben sich in designorientierten Berufen domänenspezifische Programmierwerkzeuge etabliert. Anforderungen an Entwicklungsumgebungen für Architektur und Bauingenieurwesen liegen näher bei Geometriebearbeitung, Datenaustausch und Bedienbarkeit als konventionelle Softwareentwicklung.

Im Jahr 2003 erschien Generative Components (GC), entwickelt von Dr. Robert Aish bei Bentley Systems, als parametrisches und assoziatives Designsystem. Komponenten und Beziehungen zwischen diesen bilden in GC einen Graphen aus Knoten und Kanten. Neben vorgefertigten Bestandteilen besteht die Möglichkeit, benutzerdefinierte Module zu verfassen. Generative Components ist als modellorientierte Planungs- und Programmierumge-



**Bild 3** Explicit History (später Grasshopper)  
Explicit History (later Grasshopper)



**Bild 4** Grasshopper 2 Alpha  
Grasshopper 2 Alpha

bung zu verstehen, welche direkte geometrische Manipulation und herkömmliche Programmierung verbindet [10, 11].

Grafische Algorithmus-Editoren haben sich in designorientierten Berufen im vergangenen Jahrzehnt verbreitet. Ende 2007 veröffentlichten Robert McNeel & Associates das von David Rutten entwickelte Explicit History (Bild 3), bekannter unter der kurz nach Erscheinung geänderten Bezeichnung Grasshopper, welches sich insbesondere durch seine Erweiterbarkeit und die öffentlich zugänglichen API-Schnittstellen der zugrunde liegenden CAD-Plattform Rhinoceros als vielseitiges Planungswerkzeug anbietet. Bild 4 zeigt die im Jahr 2022 erschienene Alpha-Version des neu entwickelten Grasshopper 2.

## 2.4 Parametrische Planungswerkzeuge im Metallleichtbau

Anforderungen an Planungstools im Metallleichtbau befinden sich in der Schnittmenge von Entwurfs-, Ausführungs-, Werkplanung und Werkstatt- bzw. Fertigungsplanung. Eine Gebäudehülle entsteht i. d. R. als Komposition aus standardisierbaren Systembauteilen und aus Werkstücken, die für das jeweilige Bauwerk projektspezifisch zusammengestellt bzw. angefertigt werden. Im gebauten Zustand bilden Fassaden und Dächer auch bei Verwendung von Wiederholteilen im gebauten Zustand jeweils ein Unikat. Je nach Gebäudetypologie und Entwurfskonzept kann die Gebäudehülle aus Norm- oder Bibliotheks-

teilen konfiguriert werden oder stellt eine massenindividualisierte Baugruppe dar. Standard-Planungssoftware für die Entwurfs- und Ausführungsplanung berücksichtigt nur in begrenztem Umfang die Anforderungen an Herstellung und Montage von geometrisch anspruchsvollen Fassaden, Außenwänden und Dächern in Metallleichtbauweise.

In der Bauausführungsphase bedient sich der Metallleichtbau eines breiten Spektrums an Herstellungsverfahren, z. B. werden digital gesteuerte CNC-Maschinen und -Anlagen eingesetzt oder die Baukomponenten handwerklich mit analogen Werkzeugen angefertigt. Die dazugehörigen Werkplanungsvorgänge sind entsprechend den Prozessketten unterschiedlich aufzubereiten. Für Umformungswerkzeuge, wie sie im Metallbau verwendet werden, ist zugehörige Software näher am Maschinenbau als am Bauwesen.

Für die Hochbauplanung im Metallleichtbau zeigt sich damit der Bedarf an projektspezifischen und prozessspezifischen Modulen als Erweiterung bestehender Standardplattformen.

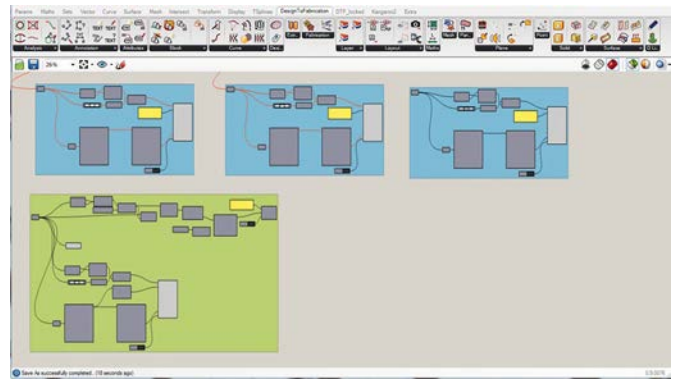
Durch Entwicklung und Programmierung wiederverwendbarer Module lassen sich Planungsaufgaben, welche der Vorplanung und Entwurfsplanung, sowie die Planungstätigkeiten, die der Ausführungsplanung und Werkplanung bis hin zur Fertigung angehören, in einem zentralen Steuerungsmodell lösen.

Die Module werden im grafischen Editor (Bild 6) einer CAD-Software zusammen mit Standard-Komponenten verwendet. Durch die lose Koppelung dieser Komponenten entsteht eine hohe Flexibilität. Spezialisierte Komponenten, wie die Custom Components in Bild 5, können bereits in der konzeptionellen Entwurfsphase eingesetzt werden, bspw. um den Wasserablauf auf einem doppelt gekrümmten Dach während der Modellierung zu simulieren, oder auch während der Ausführungsplanung, um eine referenzierte Außenwandfläche durch eine Komponente in diskrete Streifen zu unterteilen und von einer nachfolgenden Komponente in fertigbare Bauteile fortzuschreiben.

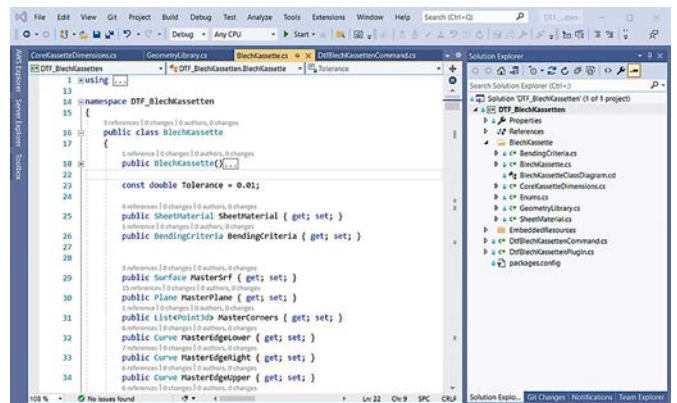
Die Komponenten werden in .NET-konformen Sprachen entwickelt (C#) und verwenden öffentlich verfügbare



**Bild 5** Custom Components für Planung von Gebäudehüllen  
Custom Components for building envelope design



**Bild 6** Graph (Auszug) einer Fassadenplanung in Grasshopper  
Graph (excerpt) of facade design conducted in Grasshopper



**Bild 7** Metallleichtbau-Kassette als Quellcode-Objekt  
Lightweight metal sidings as source code objects

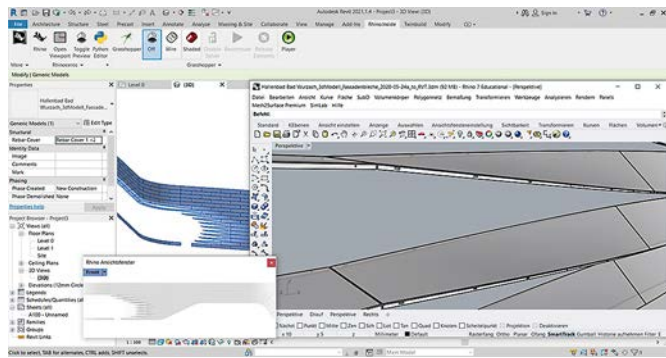
Geometrie-Bibliotheken der CAD-Plattform-Hersteller. Bei Bauprojekten mit hochgradig individualisiert entworfenen Baugruppen ist eine Option, die Gebäudehülle komplett als objektorientierten Code anzulegen (Bild 7), welcher neben der Entwurfsabsicht (design intent) ebenfalls die Produktionsdaten automatisch erzeugt.

### 3 Einsatz in Forschung, Lehre und Praxis

#### 3.1 Parametrische Fassadenplanung am Hallenbad Bad Wurzach

Zwischen Naturschutzgebiet Wurzacher Ried, Kurgebiet und Innenstadt Bad Wurzach entwarf das Architekturbüro Wolfgang Gollwitzer aus München ein modernes Hallenbad. Die Blickbeziehungen zwischen umgebender Landschaft und dem Neubau betont eine innovative Fassade mit dynamischen Öffnungen. Um die optimale Ausrichtung und das richtige Verhältnis zwischen natürlichem Licht und Schatten für diesen Entwurf zu erarbeiten, setzten die Architekten parametrische Designwerkzeuge ein.

Passend zum Entwurf wurde für die bandförmig gestaltete Metallfassade ein parametrisches Modell konstruiert (Bild 9). Die Fassade besteht aus 810 handwerklich geformten Aluminiumprofilen. Im Detail wird der Charakter der Streifen verstärkt durch schmale Stoßfugen. Aus



**Bild 8** Bildschirmfoto individualisierter Bleche in Rhino-Inside-Revit  
Screenshot of customized metal panels in Rhino-Inside-Revit

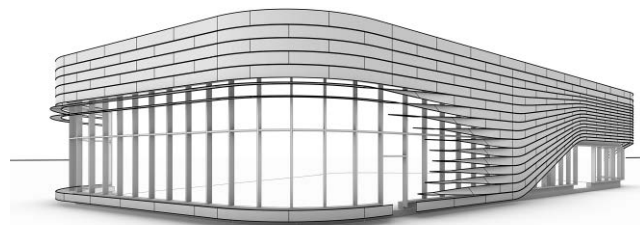
dem Modell wurden Ausführungsunterlagen wie Fassadenansichten für den Metallbauunternehmer als auch Fertigungsunterlagen für die Herstellung der individualisierten Einzelteile erzeugt.

Insbesondere die torsionsgebogenen und gerundeten Formen der gestaltgebenden Aluminiumbleche wurden in einem Mix aus digitaler Technik und Handwerk angefertigt: Konturenschnitt der Platinen, Löcher und Langlöcher sowie am Flansch eingravierte Bauteilnummern wurden im präzisen CNC-Laserverfahren hergestellt. Die Bördelung der Flansche sowie die Torsionsbiegung erfolgten handwerklich auf Blechbearbeitungsmaschinen nach generierten Zeichnungsschablonen. Bild 10 zeigt das fertiggestellte Hallenbad.

Da Flansche bzw. Bördelungen an gerundeten Blechen zu Stauchungen oder Streckungen im Material führen, können hier Standardfunktionen zur Abwicklung der Formen nicht verwendet werden. Die RWTH Aachen führt mit dem auf gerundete Bleche spezialisierten Fertigungsunternehmen [12] derzeit ein Forschungsprojekt zum Thema der zwei- und dreidimensionalen Umformung von runden Metallprofilen durch. Nach Erstellung der Produktionsunterlagen mit den beschriebenen Methoden wurde experimentell die Beta-Testfassung der Rhino-Inside-Revit-Technologie angewendet. Bild 8 zeigt die Erzeugung der produktionsfertigen Fassadenbleche direkt im BIM-Programm Revit, generiert von dem in Grasshopper implementierten Algorithmus.

### 3.2 Parametrische Punktwolkenverarbeitung, Freiformflächenplanung und digitale Fertigungsdaten am National Kaohsiung Center for the Arts, Kaohsiung, Taiwan

Das National Kaohsiung Center for the Arts ist ein Theaterkomplex im Wei-Wu-Ying Metropolitan Park, entworfen von Mecanoo architecten aus Delft. Inspiriert von den weitläufig auskragenden Baumkronen der Banyan-Bäume entstand die in Bild 11 abgelichtete wellenförmige Struktur aus Tragwerk und Dachhaut, welche Konzertsaal, Opernhaus, Schauspielhaus und Recital Hall (Kammermusiksaal) beherbergt. Verbunden werden die Veranstaltungstätten unter einem 35.000 m<sup>2</sup> großen Dach



**Bild 9** Fassadenmodell Hallenbad Bad Wurzach  
Facade model of swimming pool Bad Wurzach



**Bild 10** Hallenbad Bad Wurzach  
Swimming pool Bad Wurzach

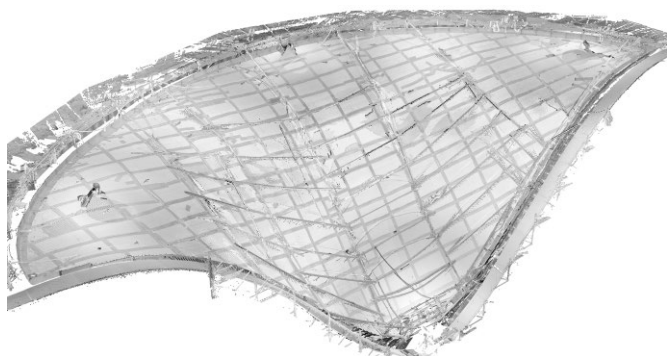
durch Banyan Plaza, einem großzügigen, vor Sonne und Regen schirmenden öffentlichen Raum. An der Südseite verknüpft ein Open-Air-Theater das Dach mit der Parklandschaft, während an der Nordseite eine skulpturale, trichterförmig anmutende Freiform das Dach mit der Umgebung gestalterisch verschmilzt.

Während der Bauausführung plante die Design To Fabrication GmbH als Subunternehmer eines Stehfalzprofilherstellers die parametrische Punktwolkenverarbeitung und Freiformflächenenerzeugung für den architektonisch anspruchsvollen Bereich des Funnels.

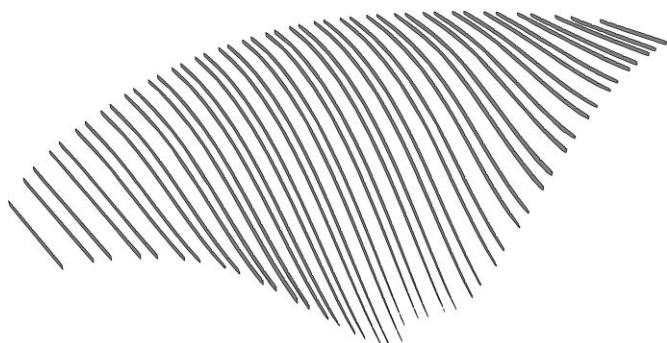
Über der gebogenen Stahlkonstruktion entstand durch lineare Tragprofile und mehrlagige Schall- und Brandschutzschichten eine facettierte Schicht, auf der ein Clus-



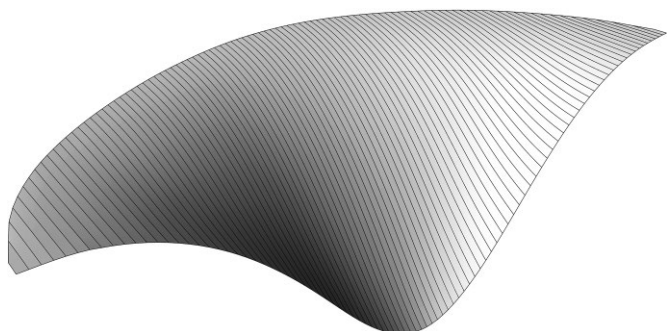
**Bild 11** National Kaohsiung Center for the Arts  
National Kaohsiung Center for the Arts



**Bild 12** Klassifizierte Punktwolke  
Classified point cloud



**Bild 13** Script-basierte Punktwolkensegmentierung  
Script-based segmentation of point cloud



**Bild 14** Parametrisch erzeugte Freiformflächen  
Parametric generated free-form surfaces

ter von 3D-Laserscans ausgeführt wurde. Bild 12 zeigt die zusammengeführte und klassifizierte Punktwolke nach Bereinigung von Baugerüsten und Absturzsicherungen.

Für eine auf der Baustelle anzufertigende Stahlunterkonstruktion wurde eine Serie von Schablonen konstruiert, die exakt von der polygonalen Tragstruktur zur glatten Rundung der Designfläche vermittelt. Bild 13 veranschaulicht Vertikalschnitte durch die Punktwolke der tragenden unteren Fläche und der zu errichtenden Dachhaut (Bild 14). Eine hieraus abgeleitete Leere wies eine Gitterstruktur auf, wodurch sie effizient vor Ort aus dünnem Schalungsmaterial im CNC-Wasserstrahl-Schneidverfahren hergestellt und einfach zusammengesetzt wurde. Durch die hohe Genauigkeit der Laserscans in Verbindung mit der parametrischen Planung ließen sich Abweichungen der facettierten Tragschale und Bautoleranzen



**Bild 15** National Kaohsiung Center for the Arts  
National Kaohsiung Center for the Arts

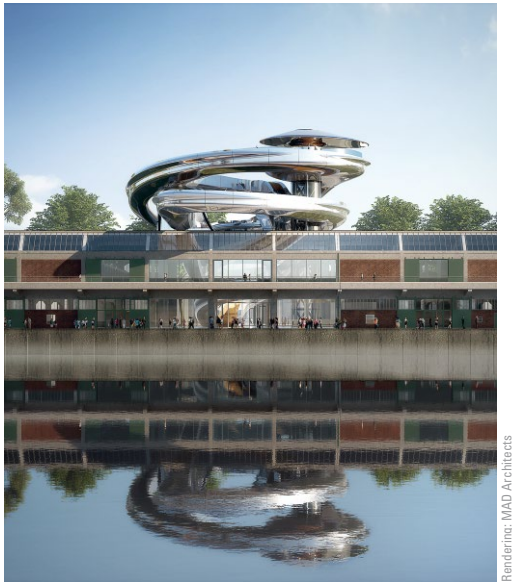
innerhalb der Dämmungsebene mit der Unterkonstruktion perfekt ausgleichen.

Die Gliederung der Dachhaut in feine Streifen ist Teil des architektonischen Konzepts des in Draufsicht rechteckigen Bauwerks. Um sicherzustellen, dass jedes einzelne der Metallpaneele minimales Gefälle zur Entwässerung aufweist, wurden in einem Grasshopper-Script die Custom Components aus Bild 5 verwendet, um krümmungsstetige Flächen zu berechnen. Die Herstellung der 4560 Stehfalzbahnen erfolgte auf einer mobilen, digital gesteuerten Rollformanlage anhand von Fertigungsdateien, welche mit einem in C# programmierten Produktionsdatengenerator direkt aus der 3D-NURBS-Geometrie erzeugt wurden. Montagezeichnungen, Bauteillisten und bemaßte Qualitätskontrollblätter wurden ebenfalls durch grafische Skripte automatisiert angefertigt. Bild 15 zeigt den stark konvex und konkav geformten Bereich des fertigen Veranstaltungszentrums für darstellende Künste.

### 3.3 Gescriptete Detaillierung im Stahlbau und Laserscan-Qualitätskontrolle am Fenix Museum of Migration, Rotterdam

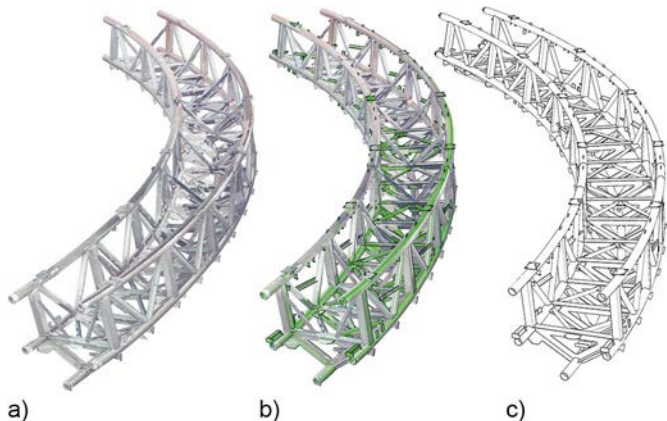
Als das Fenix-Lager 1923 in Katendrecht seine Pforten öffnete, war es eines der größten Hafenerlager der Welt. Nach umfassender Renovierung wird dieses Gebäude Migrationsgeschichten, mit der Hafenstadt Rotterdam als Ausgangspunkt, aus Vergangenheit und Gegenwart erzählen. Das Dach wird eine von MAD Architects entworfene Aussichtsplattform beherbergen, von der aus man einen Panoramablick auf Rotterdam hat [13]. In Bild 16 ist die spektakuläre Treppe gerendert, welche ein öffentliches Atrium im ehemaligen Lagerhaus, das Erdgeschoss und den ersten Stock mit der Plattform auf dem Dach verbindet.

Das Tragwerk dieser sich großzügig und frei windenden Treppe mit Aussichtsplattform setzt sich aus 30 räumlichen Fachwerksegmenten aus Stahl zusammen. Die äußere Bekleidung der Struktur sind zweiseitig gekrümmte Edelstahlteile. Innenseitig wird ein Treppenbelag aus Monterey-Kiefer eingebaut. Baukonstruktive Herausfor-



**Bild 16** Fenix Museum of Migration, Rotterdam  
Fenix Museum of Migration, Rotterdam

derung ist die passgenaue Fügung der dezentral vorgefertigten Elemente. Abgesehen von einzuhaltenden Fertigungs- und Bautoleranzen ist zu beachten, dass die Raumbauwerksegmente sich unter Eigenlast im Stahlwerk einzeln anders verhalten als in zusammengesetzter Form auf der Baustelle. Basierend auf dem Achsmodell des Tragwerks entstand ein detailliertes parametrisches Modell des Stahlbaus, in dem die Haupt- und Nebenträger, Aussteifungsrahmen und Konsolen inkl. aller Gehrungszuschnitte und Anschlüsse definiert wurden. So konnten Tragkonstruktion und Bekleidung dezentral vorgefertigt werden. Anhand von zwei Tragwerkssegmenten, zusammen 26 m lang, wurde eine Generalprobe durchgeführt. Für einen 1:1-Vergleich zwischen geplantem und zusammengesetztem Tragwerk wurde durch eine Serie von terrestrischen Laserscans der Istzustand erfasst. Um dabei alle Details gut zu erfassen, wurden 28 Scans registriert zu einer Projektpunktwolke, die nach Bereinigung bzw. Klassifizierung 124 Mio. Messpunkte beinhaltet. Bild 17 stellt die hoch aufgelöste Scanpunktwolke (Bild 17a) und eine Perspektive des parametrischen Stahlbaumodells (Bild 17c) gegenüber. In Bild 17b ist die toleranzkonfor-



**Bild 17** a) Scanpunkte, b) Überlagerung, c) Tragwerksmodell  
a) Scan points, b) overlay, c) model of steel structure

Quelle: Design To Fabrication GmbH, aufgenommen bei CSM n. v.

me Überlagerung des Istzustands mit dem Sollzustand sichtbar.

### 3.4 Experimenteller Einsatz von unbemannten Fluggeräten für hochauflösende Fotogrammetrie im Vergleich mit 3D-Scan und parametrischer Planung am ALDI SÜD Campus, Mülheim an der Ruhr

Für die zentrale Dienstleistungsgesellschaft der ALDI SÜD Unternehmensgruppe entwarfen Koschany + Zimmer Architekten am Campus in Mülheim an der Ruhr ein modernes Betriebsrestaurant. Zwischen orthogonalen Bauwerken und Freianlagen eingefügt, bildet die Kantine eine Sonderform mit Dachbegrünung, die von den umgebenden Bürogebäuden gut einsehbar ist. Die in Bild 18 sichtbare Pfosten-Riegelfassade bildet eine polygonale Struktur changierenden Winkelsprungs mit tangentialem Übergang zu gebogenen Aluminium-Komposite-Fassadenelementen. Die Ausführungsplanung sieht eine leicht nach innen geneigte Attikaabdeckung aus Aluminium vor, welche der äußeren Gebäudekontur millimetergenau folgt und auf Seite der Dachbegrünung stufenlos ausgerundet ist, dabei gleichmäßigen Überstand vorweist, dazu die nach DIN üblichen Toleranzen im Hochbau ausgleicht und passend zum Fassadenbild segmentiert ist.

Die Anfertigung der Einzelteile nach Aufmaß ist dank moderner Technologien die wirtschaftlichste Vorgehensweise für Planung und Ausführung von Gebäudehüllen mit hohem gestalterischem Anspruch. Aus dem ausgewerteten Aufmaß von Fassade bzw. Riegelprofilen und Abdichtung der Dachbegrünung gingen Referenzkurven des eingebauten Zustands hervor. In einem kompakten parametrischen Algorithmus wurden die beschriebenen geometrischen Beschränkungen konfiguriert, welcher die 90 Attikaabdeckbleche inkl. gerundeter Bördelungen bzw. linearer Kantungen und dazugehöriger Abwickelungen und Stoßverbinder vollautomatisch erzeugt.

Eine etablierte Methode für räumliche Aufmaße sind 3D-Laserscans, welche für die Produktionsunterlagen in diesem Projekt auch verwendet wurden. Da die RWTH Aachen zwischen 2018 und 2020 ein Forschungsprojekt, dessen Gegenstand die Erfassung von Hallendächern mittels Drohnenaufnahmen war, durchführte und seit 2020 ein weiteres Forschungsprojekt zum Thema gerundete Bleche zusammen mit dem Hersteller der Attikaab-



**Bild 18** Unternehmens-Campus, Mülheim an der Ruhr  
Corporate Campus, Mülheim an der Ruhr

Quelle: Unternehmensgruppe ALDI SÜD





**Bild 19** Hoch aufgelöste Punktwolke mit Referenzpunkten  
High resolution point cloud including reference markers

deckbleche in Mülheim an der Ruhr bearbeitet, bot sich ein experimenteller Vergleich zwischen terrestrischem Laserscan und Fotogrammetrie aus hoch aufgelösten Luftaufnahmen geradezu an [12].

Vergleichsgrundlage bildete ein Laserscan, durchgeführt von einem schweren Stativ, platziert auf dem Flachdach, dessen Messreihe 710 Mio. Punkte in einer Toleranz von 2 mm beinhaltete. Um diesen Master-Scan wurden elf weitere Laserscans angeordnet, um alle relevanten Bauteile zu erfassen. Die einzelnen Teilpunktwolken wurden zu einer Projektpunktwolke mit Maximalabweichung von 1,8 mm registriert. Damit die Toleranz aus der Registrierung sich nicht zur Toleranz des Messgeräts addiert, wurde im Vergleich nur der Haupt-Scan verwendet.

Die Luftaufnahmen im zweiten Teil des Experiments nahm eine hochauflösende Industriekamera auf, die mittels motorisierter kardanischer Aufhängung an einem Hexacopter angebracht war (Bild 20). Über das Objekt wurde in einem vorab programmierten Kreuzraster geflogen, dessen Flugbahn auch die automatisierte Auslösung der Aufnahmen an errechneten Wegpunkten berücksichtigte. Um für Dächer und Fassaden dieser Objektart und größer optimale Resultate zu erhalten, sah das Experiment vor:

- Einzelfotos in 100 Mpx Auflösung (Phase One iXM-100) aufzunehmen,
- Objektiv mit Festbrennweite (80 mm) direkt an der Kamera zu verschrauben,
- kurze Belichtungszeit (1/1000 s Verschlusszeit),
- geringe Fluggeschwindigkeit (ca. 2 m/s),
- niedrige Flughöhe ca. 25 m über dem Zielobjekt,
- hohe Bildüberlappung von 65 % bis 80 %,
- Einsatz von GNSS-Empfängern mit Redundanz,
- Platzierung von 400 mm × 400 mm Passpunkten, welche in den Luftaufnahmen und im Laserscan erfasst sind,



**Bild 20** Unbemanntes Fluggerät mit hochauflösender Industriekamera  
Unmanned aerial vehicle with high resolution industrial camera

- Kreuzflug mit Aufnahmen in Nadir- und Oblique-Ausrichtung.

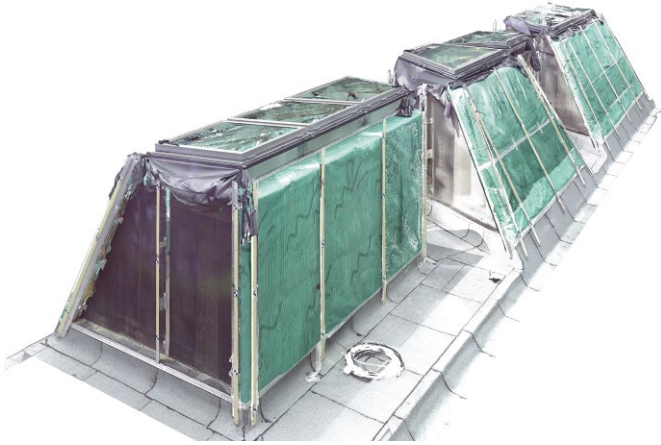
In einer Fotogrammetrie-Standardsoftware wurden die 1234 digitalen Aufnahmen zu einer räumlichen Punktwolke verarbeitet, die insgesamt 4,3 Mrd. Punkte aufwies. Anschließend wurden die Laserscan- und Fotogrammetrie-Punktwolken übereinandergelagert. Zum absoluten Vergleich dienten die in Bild 19 gekennzeichneten optischen Passmarken, deren Mittelpunktabstände im Laserscan (zur Kontrolle auch per Stahlmaßband) 19.680 m auseinander lagen. In der Fotogrammetrie-Punktwolke divergierte die gleiche Strecke um 8 mm, d. h. eine Abweichung von 0,41 ‰.

Beide Ergebnisse, sowohl die Punktwolke aus den terrestrischen Laserscans als auch die aus drohnenbasierter Fotogrammetrie, wiesen eine deutlich bessere als ausreichende Genauigkeit auf, um alle Metallbauteile millimetergenau werkseitig vorzufertigen.

### 3.5 Terrestrisches Laserscannen unterstützt die algorithmische Planung der architektonischen Tageslichtanlage der Hochschulbibliothek Gummersbach

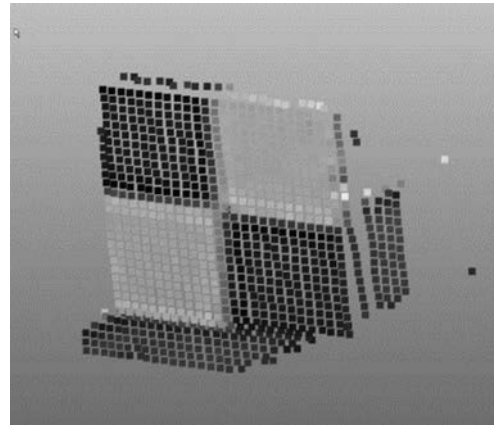
Eine Bibliothek mit Seminar- und Büroräumen, entworfen von Scheidt Kasprusch Architekten, ergänzt den Campus Gummersbach der TH Köln. Um Nutzern der Leseräume vorwiegend natürliche Belichtung zu bieten und Entrauchung sicherzustellen, sind im Innenhof drei Lichtpyramiden angeordnet. Eine hochwertige äußere Bekleidung der architektonischen Tageslichtanlage wurde in Metallleichtbauweise mit ineinandergesteckten Aluminiumkassetten realisiert.

Im Detail entfalten die konzeptionell klar geformten Volumina durch schmale Fugen, Höhenbezüge und Neigung ihren optischen Gesamteindruck. Auf digital gesteuerten Anlagen, wie Flachbett-Schneide-Laserautomaten mit Stanz-Nippelfunktion und Gesenkbiegemaschinen, werden diese Metallbauwerkstücke genau produziert. Die geometrischen Abmessungen der typologisch zueinander ähnlichen Blechelemente nehmen auf überschaubarer Fläche 40 Bezugskanten der Tageslichtanlage auf, weshalb die Ausführungs- und Werk-



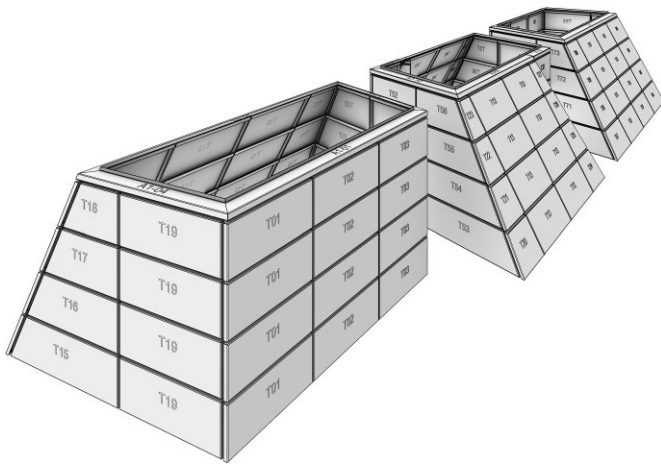
**Bild 21** Unterkonstruktion als dichte Punktwolke  
Substructure represented as point cloud

Quelle: Design To Fabrication GmbH



**Bild 24** Referenzmarkierung im 3D-Scan  
Marker for reference in 3D-scan

Bild: Peter Mehrrens, RWTH Aachen



**Bild 22** Blechkassetten als Volumenkörpermodell  
Lightweight metal sidings as solid geometry representation

Quelle: Design To Fabrication GmbH

in Bild 5 aus den referenzierten Ebenen die Versatzflächen für Vorder- und Rückseiten und Fugen. Innerhalb dieses Graphen werden mit einem prozessbezogenen Skript, wie in Bild 7, aus diesen Leitflächen die räumlichen Blechkassetten mit allen Eigenschaften ausgebildet inkl. Materialstärken, mehrstufiger umlaufender Kanten sowie deren Ausrundungen und Teilebeschriftung für voll automatisierbare Blechabwicklung und Biegevorgänge. Bild 22 veranschaulicht das 3D-Modell der Metallleichtbauelemente nach Entwurfsvorgaben, Aufmaß und Fertigungskriterien. Der Hersteller dieser Metallkassetten ist in einem Forschungsnetzwerk, das innovatives und leichtes Bauen mit Metall behandelt, ein Kooperationspartner der RWTH Aachen [14]. Bild 23 zeigt die architektonische Lichtkuppelanlage in fertigem Zustand.



**Bild 23** Architektonische Tageslichtanlage der Hochschulbibliothek Gammersbach  
Architectural daylight system at university library Gammersbach

Foto: Wolf-Dieter Gerick

### 3.6 Holografische Computer und Untersuchungen zu Mixed Reality mit Studierenden der RWTH Aachen

Zur Positionierung der Metallfassadenbauteile aus Abschn. 3.5 an der Unterkonstruktion dienten vorab angebrachte Passmarken. Bild 24 zeigt eine Passmarke, wie sie im Laserscan erfasst wird. Dokumentiert wurden Angaben zur Montage branchenüblich in Zeichnungen, Modellen, Tabellen und Textbeschreibung. Entsprechend stellte sich das Lehr- und Forschungsbiet Nachhaltigkeit im Metallleichtbau die Frage, inwiefern die Kommunikation der koordinierenden Angaben durch Mixed Reality besser vonstattengehen kann, bspw. mit einem Microsoft HoloLens 2 Headset, integriert in einen Bauhelm von Trimble als XR10 (Bild 25).

planung der Kassetten nach Aufmaß der Unterkonstruktion erfolgte. Bild 21 zeigt die Punktwolke einer Gruppe stativbasierter Laserscans, aus der die Unterkonstruktionsprofile extrahiert wurden, welche die Ebenen der Tageslichtanlage definieren. Ein grafisch bearbeiteter Algorithmus mit starkem Entwurfsbezug, ähnlich dem in Bild 6, erzeugt mit Komponenten wie

Idealerweise wird modernste Hard- und Software den Studierenden für Lehre und Forschung frühestmöglich zugänglich gemacht. Im Rahmen eines Workshops im Sommersemester 2022 erlernten Studierende des Studiengangs Bauingenieurwesen die Benutzung eines tragbaren holografischen Computers. Nach kurzem Einstieg mit theoretischen Grundlagen setzten die Studierenden in kleinen Seminargruppen die moderne Ausrüstung persönlich ein (Bild 26).



Foto: Peter Mehrrens, RWTH Aachen

**Bild 25** Microsoft HoloLens 2 am Bauhelm Trimble XR10  
Microsoft HoloLens 2 integrated into helmet Trimble XR10



Foto: Markus Kuhnhenne, RWTH Aachen

**Bild 26** Studierende erfassen Grundlagen des holografischen Computers HoloLens 2  
Students grasping the basics of the holographic computer HoloLens 2

Eine studentische Seminararbeit beschäftigte sich mit möglichen Einsatzszenarien für holografische Computer im Bauwesen und führte mit der HoloLens Experimente zu Genauigkeit und Handling durch. Bild 27 zeigt die Perspektive des Headset-Benutzers beim Experiment zur Positionsweisung eines konventionellen Gabelstaplers mittels überlappender Einblendung eines Objekts als Zielvorgabe. Geometrie streamte in den studentischen Experimenten über die Anwendungserweiterung Fologram in einem Client-Server-Prinzip vom Laptop auf das Headset.

Das Potenzial von Mixed Reality im Bauwesen ist groß, zu den Einsatzszenarien zählen:

- interaktive, kollaborative Planung
- Baufortschrittskontrolle anhand von Soll-Ist-Vergleichen
- Projektvisualisierung, virtuelle Gebäudebegehung für Nutzer und Bauherren
- geführte Montage, durch Anzeige von Bauteilpositionen oder Reihenfolge



Foto: Jonas Sturtz, Mario Testro, RWTH Aachen

**Bild 27** Studierende experimentieren mit Mixed Reality  
Students experiment with mixed reality

- Informationseinblendung für Maschinenführer
- kontextbezogene Gefahrenprävention
- Schulung
- Fernwartung

Die Informationseinblendung während der Herstellung und Montage sowie die räumliche Simulation von Bauprojekten während der Planung können bei großen oder komplexen Baugruppen im Metallleichtbau zu Verbesserungen der Effizienz und Qualität beitragen.

### 3.7 Voruntersuchung zu agilen mobilen Robotern mit Laserscanner am Forschungsgebäude Metallleichtbau der RWTH Aachen

Das durch Messtechnik detaillierte Erfassen des Zustands einer Baustelle oder eines Bauwerks ist eine dem Stand der Technik entsprechende Vorgehensweise. Aus den gewonnenen Daten einen Digitalen Zwilling abzuleiten, ist derzeit noch mit hohem Arbeitsaufwand verbunden. Allein durch fortschreitenden Bauablauf sind die Bestandsdaten häufig nach nur kurzer Zeit nicht mehr aktuell. Entsprechend willkommen sind alle Ansätze, die Dokumentation zu vereinfachen, zu beschleunigen oder zu automatisieren. Auf der Suche nach Optionen, diese Prozesskette zu verbessern, führte das Fachgebiet Nachhaltigkeit im Metallleichtbau Voruntersuchungen zum Einsatz von mobilen agilen Robotern am in Bild 28 gezeigten Forschungsgebäude Metallleichtbau durch.

Insbesondere für große Baustellen kann der Nutzungsvorteil groß sein, indem per Teaching dem Roboter eine Route vorgegeben wird, entlang deren Weg eine Vielzahl von Aufnahmen erfolgt, die anschließend wiederkehrend selbsttätig abgearbeitet wird. Dabei fungiert der agile Roboter vorrangig als autonomes Transportmittel, während ein Bordcomputer die Verwaltung der Messtechnik übernimmt (Bild 29). Bei den Betrachtungen an dem Forschungsgebäude Metallleichtbau der RWTH Aachen erfolgte die Steuerung per Controller intuitiv und direkt von ebenfalls gehenden Mitarbeitern. An mehreren Wegpunkten wird der Roboter über die Befehle „Stand“ oder „Sit“ zum Stillstand gebracht, jeweils für die Dauer einer Laserscanaufnahme. Nachteilig in der Position „Sit“ ist



Foto: Peter Mehrrens, RWTH Aachen

**Bild 28** Agiler mobiler Roboter scannt einen Forschungsbau  
Scanning a research building from an agile mobile robot



Quelle: RWTH Aachen

**Bild 29** Roboter Boston Dynamics Spot mit Edge-Computer, Adapter und  
Faro Focus Laserscanner  
Robot Boston Dynamics Spot with edge-computer, adapter and Faro  
Focus Laserscanner

die niedrige Höhenlage des Messgeräts. Mit mehreren Scans entstand ein räumlich exaktes Abbild des quaderförmigen Forschungsbauwerks in ähnlicher Weise wie mit stativbasierten Messungen.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Aufsatz gibt einen Überblick über die Digitalisierung von Planungswerkzeugen im Fokus des Metallleichtbaus und erläutert anhand von Anwendungsbeispielen deren Einsatz.

Das breite Spektrum an neuen Technologien aus übergreifenden Fachgebieten bietet zahlreiche Szenarien für den spezifischen Einsatz im Stahlbau und Metallleichtbau bzw. in der Planung, Fertigung und Bauausführung von Gebäudehüllen. Die schnelle Entwicklung von digitalen Werkzeugen – sowohl Software als auch Hardware – ruft gerade dazu auf, sich nicht nur mit deren allgemeiner Verwendung in Architektur und Bauingenieurwesen zu beschäftigen, sondern explizit die Vorteile einer integrierten Nutzung ebendieser Komponenten zu erforschen.

Wie Bild 2 aus dem Jahre 1963 und Bild 17 aus dem Jahre 2021 zeigen, hat sich in den vergangenen sechs Jahrzehnten

die Methode der Planung zum einen sehr entwickelt, zum anderen besteht weiterhin Bedarf an Vertiefung, Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet. Obwohl Thesen und Proof-of-Concept-Systeme bereits seit vielen Jahren existierten, breitete sich Akzeptanz in Büros zunächst zögerlich aus. Erste Planungsanwendungen waren weniger intuitiv in puncto Bedienbarkeit und boten geringere Rechenleistung im Verhältnis zu Einsatzkosten. Die Allgegenwärtigkeit der digitalisierten Planung steht in direktem Zusammenhang mit den heute besseren Möglichkeiten des Datenaustauschs.

Für den Metallleichtbau besteht Bedarf zur Forschung in Richtung quelloffener Austauschformate und Standards, welche sowohl den Anforderungen von Architekten, Bauingenieuren und Fachplanern als auch den Bedürfnissen der metallverarbeitenden Industrie und Bauausführenden gerecht wird.

Die Grenzen der Interoperabilität liegen trotz Initiativen für herstellernerneutrale Austauschformate weiterhin zu nah an den proprietären Dateiformaten weniger Softwarekonzerne. Aus Sicht der Autoren ist ein vielversprechender Ansatz die Verschachtelung von Anwendungen, wie die Rhino-Inside-Technologie von Robert McNeel & Associates (TLM Inc.). Beim Konzept der Verschachtelung wird eine gesamte Modellieranwendung mitsamt algorithmischer Entwicklungsumgebung als Anwendungserweiterung im Arbeitsspeicher einer anderen Host-Anwendung betrieben, wodurch die eingebettete Software bzw. deren parametrische Steuerung die zentrale Rolle übernehmen kann. Auf diesem Weg können durch ein universell konzipiertes Gesamtmodell auch Fachmodelle bzw. Berechnungen in den nativen Umgebungen erstellt werden.

Im Bereich Erfassung zeigt der Aufsatz, dass aufgrund der hohen Fertigungsgenauigkeit im Metallleichtbau ein höherer Grad an Vorfertigung die Möglichkeit bietet, effizienter und damit ressourcenschonender zu bauen. Schlussfolgern lässt sich aus dem Experiment, beschrieben in Abschn. 3.4, dass beide Scan-Methoden (terrestrische Laserscans und hochauflösende Fotogrammetrie von unbemannten Fluggeräten) hervorragend geeignet sind, maßhaltigen Kontext zu erstellen, in dem große Baugruppen im Metallleichtbau für Fassaden und Dächer für vollständige Vorfertigung geplant werden können. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht hier insbesondere in der Integration in die Methoden des Building Information Modeling und des Computational Design.

Unter Zuhilfenahme von sich rapide entwickelnden Technologien der Realitätserweiterung wie Mixed Reality und Augmented Reality sind Szenarien, die Planungs- und Bauabläufe effizienter gestalten, klar erkennbar. Für einen Alltagsinsatz im Bauwesen sind Fortentwicklungen notwendig, u. a.:

- Adressierung des Einsatzes im Außenbereich durch Erhöhung der Kontraststärke. Alternativ: Anstatt Hologramme mit niedrigen Kontrasten könnten hochauf-

lösende Front-Kameras ein Panoramabild auf sehr hochwertigen Headset-Bildschirmen übertragen und damit Transparenz simulieren.

- Mehr Sensorik wie seitliche Kameras, sodass die Umgebung des Nutzers mit weniger Bewegung des Kopfs und mit höherer Genauigkeit erfasst wird.
- Bessere Robustheit der drahtlosen Konnektivität mit höheren Datenaustauschraten.
- Auslagerung der Rechenkapazität in einen mobilen Edge-Computer, um Leistung zu steigern bei Gewichtsreduktion des Headsets.

Autonome Systeme wie der in Abschn. 3.7 gezeigte agile mobile Roboter in Verbindung mit LiDAR-Technik ver-

fügt über enormes Potenzial für die Digitalisierung im Metalleichtbau und insgesamt im Hochbau. Für komplexe Objekte ist die Entwicklung von kartenbasierter Planung der Messungen, vergleichbar mit der Bedienung von Flugplanungssoftware für Drohnen, für effizienten Einsatz notwendig. Aufgrund der niedrigen Höhenlage der Nutzlast können motorisch gesteuerte Teleskopstative sinnvoll integriert werden.

Für den Planungsschwerpunkt Fassaden, Außenwände und Dächer in Metalleichtbauweise besteht auch weiterhin großer Forschungsbedarf, insbesondere in der Integration von digitalen Planungswerkzeugen mit konstruktiven Bestandteilen und zugehörigen Prozessen.

## Literatur

- [1] Engelbart, D. C. (1962) *Augmenting Human Intellect*. Stanford Research Institute, pp. 4–7. <https://archive.org/details/1962-engelbart-AHI-framework/mode/2up> <https://dougengelbart.org/content/view/138>
- [2] Sutherland, I. E. (1963) *SketchPad: A man-machine graphical communication* in: Association for Computing Machinery [eds.] *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*. AFIPS '63 (Spring), Detroit, May 21–23, 1963.
- [3] Bézier, P. (1986) *The mathematical basis of the UNISURF CAD system*. Oxford: Butterworths.
- [4] Eastman, C. M. (1975) *The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design*. AIA Journal 63, No. 3, pp. 46–50.
- [5] Wilhelm, J. [ed.] (1985) *RUCAPS Really Universal Computer Aided Production System*. SCI-Arc Media Archive, Dec. 5, 1985. <https://channel.sciarc.edu/people/wilhelm-jerry>
- [6] Ruffle, S. (1986) *Architectural Design Exposed: From Computer-Aided-Drawing to Computer-Aided-Design*. Environments and Planning B: Planning and Design, pp. 385–389.
- [7] Aish, R. (1986) *Building Modelling: the key to Integrated Construction CAD*. CIB 1986: International Symposium on the use of computers for environmental engineering related to buildings, Bath, July 7–9, 1986. pp. 55–67.
- [8] buildingSMART International [eds.] *Industry Foundation Classes (IFC)* [online]. Hertfordshire: buildingSMART International. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes> [Zugriff am: 26. Sept. 2022]
- [9] ISO 16739-1:2018 (2018) *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries* [online]. Geneva: International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/70303.html> [Zugriff am: 26. Sept. 2022]
- [10] Aish, R. (2004) *SmartGeometry* in: University of Waterloo [eds.] *Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture*. ACADIA, Ontario, Nov. 8–13, 2004. [https://www.researchgate.net/publication/320508042\\_SmartGeometry\\_Robert\\_Aish\\_ACADIA\\_2004](https://www.researchgate.net/publication/320508042_SmartGeometry_Robert_Aish_ACADIA_2004)
- [11] Aish, R.; Woodbury, R. (2005) *Multi-level Interaction in Parametric Design*. Smart Graphics, 5<sup>th</sup> International Symposium. SG 2005, Frauenwörth Cloister, Aug. 22–24, 2005. pp. 151–162.
- [12] nawame (2020) *Nachwachsende Rohstoffe im Metalleichtbau – Projekt Entwicklung eines Verfahrens für das zwei- und dreidimensionale Umformen von runden Metallprofilen* [online]. Kooperationspartner Krehle GmbH; Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau der RWTH Aachen University. Darmstadt: Jöckel Innovation Consulting GmbH. <https://www.nawame.de/netzwerk> [Zugriff am: 26. Sept. 2022]
- [13] Droom en Daad Foundation [eds.] *Fenix* [online]. Rotterdam: Stichting Droom en Daad. <https://droomendaad.nl/en/what-we-do/fenix-museum-of-migration> [Zugriff am: 30. Sept. 2022]
- [14] ilem – Innovationsnetzwerk Metalleichtbau (2018) *Projekt Photovoltaik-integrierte Fassadenlösungen* [online]. Kooperationspartner Hans Laukien GmbH; Heliatek GmbH; Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau der RWTH Aachen University. Darmstadt: Jöckel Innovation Consulting GmbH. <https://www.ilem-netzwerk.de> [Zugriff am: 26. Sept. 2022]

## Autoren

Peter Mehrrens, M.Sc.  
pme@stb.rwth-aachen.de  
RWTH Aachen University  
Institut für Stahlbau  
Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau  
Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne (Korrespondenzautor)  
mku@stb.rwth-aachen.de  
RWTH Aachen University  
Institut für Stahlbau  
Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau  
Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen

## Zitieren Sie diesen Beitrag

Mehrrens, P.; Kuhnhenne, M. (2022) *Digitalisierung im Metalleichtbau*. Stahlbau 91, H. 11, S. 726–737.  
<https://doi.org/10.1002/stab.202200068>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.  
Eingereicht: 4. Oktober 2022; angenommen: 14. Oktober 2022.