



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

bi.wbb

Diploma Thesis

Parametric Architecture from the perspective of civil engineering

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Parametrische Architektur aus der Sicht des Bauingenieurs

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bau- und

Umweltingenieurwesen

von

Risto Savija, BSc

Matr.Nr.: 0227074

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. **Agathe Robisson** PhD

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Karl Deix**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie

Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie

Technische Universität Wien,

Karlsplatz 13/207-01, A-1040 Wien

Wien, im Mai 2025



Kurzfassung

Der stetige Fortschritt in der parametrischen Architektur erhöht kontinuierlich die Anforderungen an die Konstruktion entsprechender Tragwerke. Diese Entwicklung bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich, darunter die Planung immer komplexerer Formen und die Suche nach optimalen Lösungen für die Tragwerke sowie deren erfolgreiche Umsetzung. In diesem Sinne werden in dieser Arbeit die verschiedenen Planungsprogramme, die von Architekten und Tragwerksplanern genutzt werden, sowie die Komplexität der Tragwerksherstellung und ihre Umsetzung in der Ausführung untersucht. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Herausforderung der Herstellung geometrisch anspruchsvoller Verbindungen im Stahlbau, Stahlbetonbau und Holzbau. Zusätzlich werden innovative Fassadensysteme als wesentlicher Aspekt parametrischer Bauwerke betrachtet, wobei Glasfassaden und die entsprechenden Befestigungssysteme eine zentrale Rolle spielen.

Abstract

The steady progress in parametric architecture continuously raises the demands on the construction of corresponding structures. This development brings a series of challenges, including the planning of increasingly complex forms and the search for optimal solutions for the structures as well as their successful implementation. In this context, this work examines the various planning programs used by architects and structural engineers, as well as the complexity of structural fabrication and its execution during construction. A particular focus is placed on the challenge of producing geometrically demanding connections in steel construction, reinforced concrete construction, and timber construction. Additionally, innovative facade systems are considered as an essential aspect of parametric buildings, with glass facades and the corresponding fastening systems playing a central role.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei all jenen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt und begleitet haben.

Zunächst gilt mein besonderer Dank meinem Betreuer Herr Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Deix, der mich während des gesamten Arbeitsprozesses stets begleitet und durch wertvolle Hinweise und konstruktive Kritik wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ebenso bedanke ich mich herzlich bei allen Mitarbeitern des Institutes für Werkstofftechnologie, insbesondere des Forschungsbereichs Baustofflehre und Werkstofftechnologie für die Bereitstellung einer förderlichen Arbeitsumgebung.

Für den kollegialen Austausch und die zahlreichen anregenden Diskussionen während des Studiums spreche ich meinen Studienkolleginnen und Studienkollegen meinen aufrichtigen Dank aus.

Abschließend gilt mein aufrichtiger Dank meiner Familie, die mich während des gesamten Studiums und insbesondere während der Bearbeitungszeit dieser Diplomarbeit mit großem Verständnis, Geduld und Motivation unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufbau und Zielsetzung der Arbeit	3
2	Parametrisches Design	5
2.1	Hintergrund	5
2.2	Computergestütztes Design	8
2.3	Parametrisches Design/Parametrisches Modellieren (Überblick)	9
3	Software für das parametrische Entwerfen	14
3.1	Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten ausgewählter Planungsprogramme	14
3.1.1	Rhinoceros 3D	15
3.1.2	Grasshopper 3D	16
3.1.3	Parametrische FEM Toolbox zum Austausch von Daten mit Dlubal RFEM 21	
3.1.4	IDEA StatiCa	30
4	Herausforderungen bei der Herstellung von Tragwerken	41
4.1	Klassischer Tragwerksentwurf	41
4.2	Parametrische Architektur bei Tragwerksentwürfen	42
4.2.1	Parametrische Planungskette bei Tragwerksentwürfen	42
4.2.2	Geometrien in der parametrischen Architektur von Tragwerken	44
4.2.3	Formfindung	46
4.3	Analyse der Tragwerkskomplexität in der parametrischen Architektur	50
4.3.1	Geometrische Komplexität	50
4.4	Komplexität der Herstellung und Montage von Verbindungen	54
4.4.1	Stahlbau	54
4.4.2	Betonbau	59
4.4.2	Holzbau	65

5	Innovative Fassadensysteme in parametrischen Bauwerken	73
5.1	Bedeutung von Fassadensystemen in der parametrischen Architektur.....	73
5.2	Beispiele für erfolgreiche Anwendungen von parametrischen Fassadensystemen	74
5.2.1	Innovatives parametrisches Fassadensystem	75
5.2.2	Planung, Bemessung und Ausführung einer kinetischen Fassade	77
5.2.3	Enzo Ferrari Museum	80
5.2.4	Planung und Ausführung von Gebäudehülle des Heydar Aliyev Cultural Centre	83
6	Zusammenfassung.....	87
7	Literaturverzeichnis	89
8	Abbildungsverzeichnis	92

1 Einleitung

Mit den heutigen technologischen Fortschritten sind in der parametrischen Architektur bisher schwer vorstellbaren Aspekte der Planung und Bauwerksherstellung, Realität geworden. So konnten mittlerweile äußerst spannende Bauvorhaben vieler Architekten wie Zaha Hadid, Jean Nouvel, Frank Gehry verwirklicht werden. Da die Prozesse vom Entwerfen über die Planung bis hin zur Ausführung kontinuierlich weiterentwickelt werden, ist es wichtig, den heutigen Stand darzulegen.

1.1 Motivation

In den letzten Jahrzehnten haben sich in der Architektur Bauwerke mit komplexen und organischen Formen zunehmend durchgesetzt. Bereits heute sind viele eindrucksvolle Objekte und Gebäude realisiert worden. Errichtet werden sie in allen erdenklichen Bauweisen, von Stahl- über Stahlbeton- und Holzbau- bis hin zur Glasbauweise. Häufig werden dabei die einzelnen Materialien miteinander kombiniert. Einige der bekanntesten Projekte in Stahlbetonbauweise sind das „Heydar Aliyev Center in Baku“ von Zaha Hadid und die „Philharmonie de Paris“ von Jean Nouvel. Neben dem Grundmaterial Stahlbeton kamen hier zusätzlich Glasfaserbeton, Glas und Aluminium zum Einsatz. Die tragenden Strukturen wurden aus Stahlbeton gebaut, während Metall und Glas zur Ausbildung der komplexen und geschwungenen Formen der Fassaden- und Dachkonstruktionen verwendet wurden. Das „Beijing National Stadium“ („Vogelnest“) in Peking von Herzog & de Meuron und das „CCTV Headquarters in Peking“ von Rem Koolhaas gehören zu den wichtigsten Stahlbauprojekten. Mithilfe parametrischer Modellierung konnten die genauen Positionen der Stahlträger ermittelt werden, die sowohl die Funktionen der Tragsicherheit als auch das einzigartige Erscheinungsbild gewährleisten. Sehr interessante Projekte finden sich auch in der Holzbauweise. Das „Metropol Parasol“ („Las Setas“) in Sevilla von Jürgen Mayer H. und das „Harbin Opera House“ in Harbin von MAD Architects überzeugen mit ihren parametrischen Holzbauteilen, in denen die Tragwerks- und Ästhetikfunktionen vereinheitlicht sind. Der erfolgreich kombinierte Einsatz von Stahl- und Glasbauweise ist in Projekten wie der „Elbphilharmonie“ in Hamburg von Herzog & de Meuron und „The Shard“ in London von Renzo Piano zu sehen. Besonders hervorzuheben sind die

spannenden Kombinationen aus Stahltragwerken und parametrisch modellierten Glasfassaden.

In der parametrischen Architektur treffen sich einerseits die Herausforderungen des Entwerfens komplexer und funktioneller Raumformen und andererseits die Herausforderungen der entsprechenden Tragwerksfindung und deren Ausführung zusammen. Als ein brauchbares Werkzeug haben sich in den letzten Jahrzehnten die Methoden des parametrischen Designs ausgezeichnet. Der Ansatz der Verwendung von Variablen, um Beziehungen zwischen verschiedenen Designelementen zu definieren, gibt die Möglichkeit der hohen Flexibilität und Anpassungsfähigkeiten im Planungsprozess. Tägt man eine Änderung in einem bestimmten Bereich der Struktur, werden gleichzeitig Anpassungen im gesamten System initiiert, wobei die Systemgrundlage und das Grundkonzept beibehalten werden.

Die Gestaltung von anspruchsvollen Gebäudegeometrien bringt die Herausforderungen bei der Bemessung und Herstellung passender Tragwerke. Eine entscheidende Rolle spielen hier die Softwarelösungen, die eine nahtlose Übertragung von einem architektonischen 3D-Modell in eine bemessungstaugliche Tragwerkstruktur ermöglichen, wodurch ein integrierter und effizienter Planungsprozess sichergestellt wird. Eine solche, in der Architektur und im Bauingenieurwesen weit verbreitete 3D-Modellierungssoftware, ist Rhino3D, die für die Erstellung komplexer geometrischen Formen nützlich ist. Ihre offene Plattform kann durch Plugins erweitert werden. So werden die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Fachrichtungen abgedeckt. Unter einer Reihe verschiedener Plugins zeichnen sich Grasshopper, Karamba3D, Panda, Tekla Live Link, Millipede und Geometry Gym aus. Diese Plugins ermöglichen es Bauingenieuren auch Finite-Elemente Analysen durchzuführen, detaillierte Ausführungspläne zu erstellen, Modelle in BIM Programmen zu exportieren und Schnittstellen zu anderen Berechnungsprogrammen wie, z.B. Dlubal RFEM und Ideastatica, bereitzustellen. Diese Softwarelösungen sind unumgänglich bei der Bemessung komplexer Strukturen mit vielen Anschlüssen, die sich in Geometrie und Belastung leicht oder stark voneinander unterscheiden und jeweils einer spezifischen Analyse bedürfen. Die komplexen Formen in der Planung erfordern bei der Herstellung der Tragwerke die speziellen Kenntnisse und Fertigkeiten in verschiedenen Bereichen. Um die Anforderungen der Geometrie zu erfüllen, ist die Materialauswahl von großer

Bedeutung. Sehr oft werden die Materialien hoher Festigkeit und geringeren Gewichtes eingesetzt, was für unkonventionellen Tragwerkstrukturen notwendig ist. Die erforderliche hohe Präzision der Fertigung kann, neben konventionellen, oft effizienter mit dem Einsatz der speziellen Werkzeuge, wie CNC-Fräsen, 3D-Druckern oder robotergesteuerten Systemen erzielt werden. Eine große Abstimmung zwischen den Planungs- und Fertigungsprozessen muss sichergestellt werden, um oft vorkommende, nicht standardisierte Bauteile produzieren zu können. Solche Bauteile werden oft im Werk vorgefertigt und dann auf der Baustelle montiert. Eine Herausforderung dabei ist die Bauteile so zu konstruieren, dass sie transportiert und montiert werden können, ohne die Geometrieconsistenz der Konstruktion zu gefährden. Besonders herausfordernd sind die Anschlüsse zwischen den einzelnen Tragwerkssegmenten. Sie müssen oft maßgeschneidert und exakt auf die individuelle Geometrie angepasst werden und stets die Tragfähigkeit und Stabilität des gesamten Tragwerks gewährleisten.

1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Diese Diplomarbeit gliedert sich in mehrere Kapitel, die systematisch aufeinander aufbauen und die relevanten Aspekte der parametrischen Architektur aus der Sicht des Bauingenieurs beleuchten. Im einleitenden Kapitel werden die Motivation und grundlegende Problemstellung der parametrischen Architektur vorgestellt. Im anschließenden Kapitel folgt eine detaillierte Betrachtung des parametrischen Designs, wobei dessen theoretische Grundlagen sowie die technologischen und methodischen Entwicklungen erläutert werden. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf den Zusammenhängen zwischen computergestütztem Design (CAD) und parametrischer Modellierung.

Im dritten Kapitel werden spezifische Softwarelösungen ausführlich beschrieben, welche die Grundlage für das parametrische Entwerfen bilden. Die Programme Rhinoceros 3D und Grasshopper 3D werden hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten und Interoperabilität mit Analyseprogrammen wie RFEM und IDEA StatiCa betrachtet. Zusätzlich wird die Bedeutung spezieller Plug-ins und Schnittstellen, welche den Datenaustausch zwischen Entwurfs- und Berechnungsprogrammen ermöglichen, erörtert.

Kapitel 4 fokussiert sich auf die Herausforderungen bei der Herstellung von Tragwerken im Kontext parametrischer Architektur. Es erfolgt zunächst eine Abgrenzung zur klassischen Tragwerksplanung, gefolgt von einer detaillierten Analyse der besonderen Anforderungen, die sich aus der Verwendung parametrischer Ansätze ergeben. Besondere Aufmerksamkeit gilt hierbei der geometrischen Komplexität, den daraus resultierenden Fertigungs- und Montageherausforderungen sowie der speziellen Gestaltung von Verbindungselementen in unterschiedlichen Baumaterialien wie Stahl, Beton und Holz.

Im fünften Kapitel steht die Untersuchung innovativer Fassadensysteme im Mittelpunkt. Hierbei werden ausgewählte Praxisbeispiele analysiert, um die spezifischen Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Planung und Umsetzung von parametrischen Fassaden herauszustellen.

Das abschließende Kapitel bietet eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit. Zielsetzung dieser Diplomarbeit ist es, durch eine umfassende Analyse der aktuellen technischen Möglichkeiten, Methoden und Herausforderungen sowohl bestehende Schwierigkeiten als auch zukünftige Potenziale aufzuzeigen, um die Schnittstellen zwischen parametrischem Entwurf und Tragwerksplanung weiter zu optimieren und zukünftige Bauprojekte effizienter und qualitativ hochwertiger umzusetzen.

2 Parametrisches Design

2.1 Hintergrund

In der zeitgemäßen Architektur und Bauingenieurwissenschaft hat sich das parametrische Design als zukunftsgerichtete Methodik angeboten, die mithilfe Algorithmen und moderner Softwareprodukten es ermöglicht, komplexe Raumformen und Tragsysteme zu entwickeln. Gleichzeitig können die strukturelle Effizienz und der Materialeinsatz optimiert werden. Im folgenden Kapitel werden die parametrische Entwurfsprinzipien und Optimierungstechniken mit dem Fokus auf die Rolle von Algorithmen, Designparametern und computergestützten Technologien vorgestellt.

Optimierungstechniken und technische Fortschritte tragen dazu bei, das Designverfahren zu unterstützen und verdeutlichen die Wichtigkeit, optimale Lösungen während des gesamten Verfahrens zu identifizieren. Häufig erfordert die Optimierung eine parametrische Formulierung des Designproblems, wobei Ziel- und Nebenbedingungen überwiegend durch Designparameter beeinflusst werden. Bei der Verfeinerung von Strukturen, egal ob kontinuierlich oder diskret, entstehen durch die Vielzahl an Knotenpunkten zahlreiche Projektvariablen. Parametrische Geometriefunktionen mit nur wenigen Parametern können hier hilfreich sein. Diese Faktoren lassen sich als Variablen zur Formoptimierung nutzen [1].

Das parametrische Design hängt mit rechnergestütztem Design eng zusammen, da es innovative Lösungsansätze verwendet, um Designprozesse durch leistungsstarke und moderne Algorithmen zu automatisieren, zu simulieren, zu skripten, zu parametrisieren und zu generieren (Autodesk, 2019). Ein Algorithmus beschreibt ein Verfahren, mit dem eine spezifische Aufgabe durch eine Reihe klar definierter Eingaben durchgeführt wird. Algorithmen lösen Probleme, indem sie diese in einfache, berechenbare Schritte zerlegen [2]. Tatsächlich können Algorithmen jede Geometrie durch mathematische Definitionen, die Eingabe von Variablen als Parameter und die Übersetzung in Programmiersprache beschreiben. Solche Parameter umfassen in der Regel Zahlen, Abstände, Winkel oder Funktionen wie Gleich, Wenn, Dann, usw [2].

Designer geben Parameter in Softwareplattformen ein, um diese Systeme zu erstellen. Diese Parameter werden von der Software in einem speziellen Framework verarbeitet. Computergestütztes Design wird weithin als die Methode anerkannt, die

parametrisches Design ermöglicht. Im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden ermöglicht computergestütztes Design den Übergang von der repräsentativen Logik zur dreidimensionalen Simulation des architektonischen Objekts [1]. Im Allgemeinen wird hier CAD- Software verwendet [3].

Parametrisches Design ist ein rechnergestützter Ansatz, den Designer nutzen, um Designelemente durch die Anwendung vordefinierter Parameter oder Regeln zu erstellen und zu steuern. Diese Methodik ermöglicht es Architekten, komplexe Strukturen zu entwickeln, da jedes Element intelligent miteinander verbunden und gemäß vordefinierten Parametern angepasst wird. Ein parametrisches Designsystem verwendet Algorithmen und mathematische Gleichungen, um einzelne Designelemente zu steuern, und gilt daher als äußerst effektive Methode zur Erreichung komplizierter Formen und Strukturen. Im Bereich der Architektur nutzt parametrisches Design rechnergestützte Methoden, um detaillierte und einzigartige Entwürfe zu erstellen, die systematisch an spezifische Anforderungen und Einschränkungen angepasst sind, wobei sowohl ästhetische als auch praktische Aspekte berücksichtigt werden. Anstatt statische Zeichnungen oder Skizzen zu verwenden, ermöglicht parametrische Designsoftware Designern, Designparameter und Algorithmen einzugeben, um Entwürfe zu entwickeln und zu modifizieren.

Parametrisches Design ist ein häufig genutzter Ansatz in der Architektur, um Gebäude mit einzigartigen Formen zu entwerfen, die genau auf spezifische Anforderungen und standortbezogene Einschränkungen abgestimmt sind. Es ermöglicht die Gestaltung von architektonischen Elementen wie einer wellenförmigen, geschwungenen Decke eines Konzertsaals oder einer Gebäudefassade, die optimal natürliches Licht einfängt. [1]. Durch den Einsatz von parametrischem Design in der architektonischen Praxis können Bauwerksleistungen durch Strukturoptimierung verbessert werden. Die strukturoptimierung verwendet fortschrittliche Computertechniken und Simulationen, um die Leistung von Bauwerken und ihren Elementen, wie Trägern, Stützen und Fachwerken, zu bewerten und zu verbessern.

Diese Designwerkzeuge ermöglichen es Architekten, schnell und effizient auf Kundenwünsche und Projektbeschränkungen zu reagieren. Durch ein parametrisches Designsystem können Designer Modelle durch Anpassung von Parametern steuern, wodurch der Designprozess bei Änderungen nicht von vorne beginnen muss. Dies ermöglicht es Architekten, innerhalb kürzerer Zeit zahlreiche Designoptionen und -

änderungen zu entwickeln, was den Designprozess anpassungsfähiger und einfacher macht. Indem spezifische Anforderungen wie Tragfähigkeit, Materialfestigkeit und Platzbeschränkungen eingegeben werden, können Designer optimale Struktursysteme entwickeln, die diese Bedürfnisse mit minimalem Materialeinsatz und damit geringeren Kosten erfüllen. Dies kann zu Gebäuden führen, die effizienter, nachhaltiger und strukturell integrer sind [1].

Eine der Hauptanwendungen des parametrischen Designs liegt in der Gestaltung von Bauwerken, deren manuelle Modellierung aufgrund ihrer Komplexität unpraktikabel wäre. Stadien, Flughäfen, Hochhäuser und andere markante Strukturen, die von ambitionierten Architekten entworfen werden, zeichnen sich durch hochkomplexe Formen aus, die oft außerhalb der Möglichkeiten konventioneller Modellierungsmethoden liegen würden, insbesondere innerhalb eines realistischen Zeitrahmens. Große Architekturbüros wie Zaha Hadid Architects nutzen täglich den parametrischen Ansatz.

Für Bauingenieure bietet die Anwendung parametrischer Entwurfsprinzipien die Möglichkeit, die von Architekten erstellten Modelle effizient zur Erstellung der Tragwerksgeometrie zu verwenden. Dies ermöglicht es, Analysemodelle für selbst die anspruchsvollsten Projekte in wenigen Stunden zu erstellen. Diese Modelle können eine Vielzahl von Bauteilen umfassen, jedoch können Änderungen vergleichsweise einfach durchgeführt und analysiert werden [4].

Zahlreiche Designoptionen können mit leistungsfähigen Algorithmen und Designparametern effizient analysiert und optimiert werden. Diese Methode trägt zur Reduzierung des Materialverbrauches und Baukosten bei, und minimalisiert die Kompromisse bei der Funktionalität und Ästhetik. Darüber hinaus ermöglicht die Kombination aus parametrischem Design und rechnergestütztem Entwerfen nachhaltigere und leistungsfähigere Bauwerke zu schaffen. Dank des Potenzials neuartige und umweltfreundliche Bauwerke mit hervorragender Geometrie und wirtschaftlicher Umsetzung zu realisieren, gewinnt diese Planungstechnik zunehmend an Bedeutung.

2.2 Computergestütztes Design

Ein weiterer wichtiger Begriff in den Planungssoftware ist das „computergestütztes Design“ (CAD), das die Arbeitsweise der Architekten und Ingenieure grundlegend veränderte. CAD ermöglicht die Entwicklung der innovativen Formen und Strukturen, die in konventionellen Ansätzen nur schwer umsetzbar wären.

Der Begriff "computergestütztes Design" bezeichnet die Nutzung digitaler Werkzeuge und Software im Designprozess, um Umgebungen oder Strukturen zu schaffen, die effektiver, effizienter und optimierter sind. Dieser Prozess erfordert komplexe Algorithmen, große Datensätze und Modellierungstechniken, um innovative Formen, Materialkombinationen und funktionale Anordnungen zu ermöglichen, die vorher nicht machbar waren. Computergestütztes Design ermöglicht es Architekten und Designern, Computertechnologie für die Modellierung, Prüfung und iterative Verfeinerung verschiedener Designzyklen zu verwenden, bevor der eigentliche Bau beginnt [1].

Eine der bekanntesten CAD- Softwarelösungen ist Autodesk Auto CAD. Hiermit ist es auch möglich, 3-D Modelle zu erstellen. Im Unterschied zum Programm Revit handelt es sich bei Auto CAD um ein vektorielles Zeichenprogramm. Dies bedeutet, dass die Modelle aus einfachen Linien oder Kreisen etc. zusammengestellt werden, nicht jedoch aus intelligenten Systemen bestehen. In den meisten Fällen wird Auto CAD mit Zusatzprogrammen verwendet, wobei hier 7 Möglichkeiten zur Auswahl stehen [5].

Ein wichtiger Unterschied zwischen computergestütztem Design und parametrischem Design ist der Grad der Automatisierung. Im computergestützten Design sind automatisierte Methoden wie maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz üblich, um den Designprozess zu verbessern und zu optimieren. Parametrisches Design hingegen konzentriert sich auf die Anpassung der Eingabeparameter des Designs, wodurch viele Designvariationen erstellt werden können. Diese Methode erfordert die manuelle Anpassung von Eigenschaften wie Größe, Form und Position der strukturellen Komponenten.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied liegt in der Art der behandelten Designprobleme. Computergestütztes Design zielt darauf ab, komplexe technische Probleme im Zusammenhang mit der Gebäudeleistung zu lösen, wie etwa Energieeffizienz und strukturelle Stabilität. Parametrisches Design wird häufig verwendet, um Formen zu finden und zu gestalten sowie ästhetische Fragen zu lösen,

da es mehrere Variablen gleichzeitig berücksichtigen kann. Die Kombination beider Methoden kann einen synergistischen Effekt erzeugen, der den Designprozess optimiert und sowohl die Funktionalität als auch die ästhetische Attraktivität eines Gebäudes maximiert. Dies kann durch den Einsatz computergestützter Designwerkzeuge erreicht werden.

Die beiden Methoden haben dem architektonischen Designprozess die Revolution gebracht, indem sie den Architekten und Ingenieuren neue Möglichkeiten zur Optimierung von Form, Funktion und Ästhetik ermöglichen. Durch die Kombination beider Ansätze werden nicht nur ästhetische und funktionale Anforderungen geschaffen, sondern auch ein effizienter Materialverbrauch und Bauprozess erzielt.

2.3 Parametrisches Design/Parametrisches Modellieren (Überblick)

Ingenieure stehen heute nicht nur vor der Herausforderung, die zunehmende Komplexität im strukturellen Design zu bewältigen, sondern müssen auch in derselben Zeit mehr Aufgaben erledigen. Durch moderne Architekturwerkzeuge haben sich die Möglichkeiten erweitert, komplexe Kurven und detaillierte strukturelle Elemente in Designs zu integrieren. Diese technologischen Fortschritte erlauben es Bauingenieuren, anspruchsvolle und beeindruckende Entwürfe zu realisieren, die inzwischen weit verbreitet sind. Gleichzeitig müssen sie jedoch strikte Budgetvorgaben einhalten und mit immer kürzeren Projektfristen umgehen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, setzen Bauingenieure zunehmend auf das algorithmusgestützte parametrische Modellieren, auch bekannt als parametrisches Design.

Parametrische Modellierung wird oft verkürzend gleichgesetzt mit Computational Design oder auch mit Generativer Gestaltung, wobei diese doch sehr ungenau ist. Entwürfe von Zaha Hadid oder auch Massimiliano Fuksas können hier als Beispiele genannt werden. Im Rahmen der parametrischen Modellierung werden zunächst die Kriterien und Einflussfaktoren für die Gestaltung auf einer abstrakten Ebene bestimmt. Iterativ werden Ordnungsprinzipien in den Entwurfsprozess integriert und mit Parametern in die digitale Modellierung überführt. Es steuern hier die Parameter speziell für die vorliegende Aufgabe entwickelte Algorithmen, wobei diese jedes einzelne Bauteil geometrisch definieren und sich, in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren, automatisch generieren. Im Rahmen dieses Prozesses werden die

erzeugten Formen immer wieder evaluiert, manipuliert sowie optimiert und es erfolgt eine interaktive Veränderung der Startparameter aber auch durch Anpassung der Algorithmen [6].

Ein leistungsstarkes Merkmal der parametrischen Modellierungsmethodik im Designprozess ist die Erstellung und Bearbeitung von Geometrie mit einer automatischen Aktualisierung ihrer endgültigen Form, wenn Parameter geändert werden. Benutzer von parametrischen Systemen entwickeln Beziehungen zwischen Objekten, indem sie diese in einen Knoten oder ein Diagramm codieren. Dies bietet die Flexibilität, neue Beziehungen zu entwickeln, wenn das System diese von Anfang an nicht unterstützt [7]. Parametrische Modellierung kann je nach Unterstützung der Iteration in vier Haupttypen unterteilt werden:

- Objektmodellierung: erlaubt keine Iteration.
- Assoziative Modellierung: erlaubt Iteration für einzelne Operationen.
- Datenflussmodellierung: erlaubt implizite Iteration für mehrere Operationen.
- Prozedurale Modellierung: erlaubt explizite Iteration für mehrere Operationen [8].

Die Unterscheidung zwischen „parametrischem Design“ (PD) und „parametrischem Modellieren“ nimmt eine bedeutende Stellung ein. Dabei basiert das parametrische Design auf der Festlegung spezifischer Parameter, welche als Eingabewerte verstanden werden können, die in enger Beziehung zu den jeweiligen darzustellenden Elementen stehen. Aus diesen definierten Parametern ergibt sich somit die Grundlage zur Bildung eines Modells [1]. So kann parametrisches Design als eine Reihe von Techniken, die in zwei Kategorien unterteilt sind, betrachtet werden: die eine definiert parametrisches Design als „eine Methode für konzeptionelles Modellieren“, die Programmier- und Skriptingkenntnisse erfordert, und die andere verbindet PD mit „der Idee der architektonischen Konstruktion“ und Herstellung. [9]

Bei einer Änderung eines Parameters, beispielsweise der Anzahl der Wände oder der Geometrie einer Decke, erfolgt unmittelbar eine automatische Anpassung sämtlicher betroffener Modellobjekte. Werden parametrisches Design und entsprechende parametrische Building-Information-Modeling-(BIM)-Werkzeuge kombiniert, so ermöglicht dies, dass Parameter nicht nur geometrische Veränderungen bewirken, sondern darüber hinaus umfangreiche Informationen innerhalb der BIM-Daten

generieren können. Daraus resultiert ein erheblicher Mehrwert durch den Einsatz parametrischen Building Information Modellierens (BIM) [1]. Bei der parametrischen Modellierung werden somit Abhängigkeiten sowie Eigenschaften von Produktmodellen mithilfe von Parametern beschrieben [10].

Ein algorithmusbasierter Editor ermöglicht es Bauingenieuren, algorithmusgestütztes parametrisches Building Information Modeling (BIM) praktisch anzuwenden und einfach Dateneingabemuster zu erstellen. Diese Daten können dann in ein parametrisches BIM-Werkzeug exportiert werden, um sie weiter zu analysieren und zu bearbeiten [1]. Im Jahr 2014 wurden die sogenannten BIM-Level eingeführt, welche in der folgenden Abb. 1 dargestellt sind [11]:

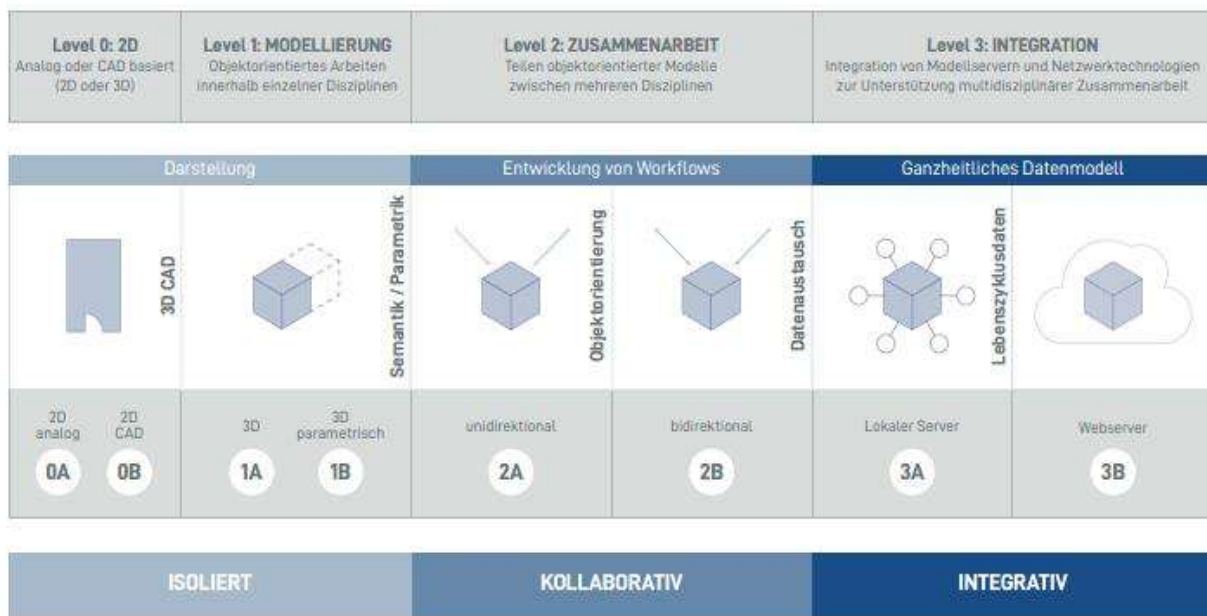


Abb. 1: BIM-Level [11]

Dank der Kombination von BIM-Software mit visuellen Programmierwerkzeugen wie Grasshopper können Bauingenieure diesen Arbeitsablauf effizient nutzen, selbst ohne Programmierkenntnisse. Diese Integration wird durch Grasshopper ermöglicht, ein Plugin, das standardmäßig mit Rhinoceros 6, einem bekannten 3D-Computergrafik- und CAD-Tool, geliefert wird [12]. Diese Methode führt zu besonders vorteilhaften Ergebnissen, insbesondere beim Bau komplexer Formen wie geschwungenen Strukturen und architektonisch anspruchsvollen Designkonzepten.

Die Festlegung von Eingabeparametern wie Koordinaten, Abmessungen, Kurven oder komplexen NURBS wird durch die Integration eines visuellen Programmiereditors wie

Grasshopper in den Designprozess ermöglicht. Grasshopper ist ein Beispiel für einen solchen Editor. Mit visuellem Scripting können Regeln erstellt werden, die diese Parameter ändern, was zur Entwicklung der gewünschten Geometrie oder anderer Ergebnisse führt. Diese Ergebnisse können dann direkt auf dynamische Objekte in der parametrischen BIM-Software angewendet werden, die die erforderlichen Eigenschaften zur Einhaltung der Industriestandards besitzt. Dieser Prozess kann zyklisch durchgeführt werden.

Wenn Änderungen am Design vorgenommen werden, werden diese automatisch im gesamten Modell berücksichtigt, wobei die spezifizierten Attribute beachtet werden. Grasshopper nimmt Eingaben von Benutzern entgegen, führt die erforderlichen Berechnungen durch und liefert Ausgaben, die diesen Eingaben entsprechen. Dadurch entfällt die Notwendigkeit, Änderungen manuell im gesamten Modell vorzunehmen, und mehrere Iterationen komplexer Designs können schnell in 3D erstellt und visualisiert werden, indem einfach die Attribute angepasst werden.

Diese Methode zeigt besondere Vorteile bei der Modellierung komplexer Gebäude mit anspruchsvollen Geometrien und geschwungenen Oberflächen, wie z. B. geodätischen Kuppeln. In Kombination mit parametrischem Modellieren und insbesondere algorithmisch gesteuertem parametrischem Building Information Modeling (BIM) kann parametrisches Design die genannten Anforderungen effektiv erfüllen, indem es einen optimierten Workflow bietet, der sich auf die Vereinfachung der Modellierung komplexer Geometrien konzentriert [1].

Dieses Werkzeug ermöglicht eine gründliche Untersuchung von Designmöglichkeiten und eine schnelle Iteration von Strukturelementen. Die Anwendung dieser Methode führt zu einer erheblichen Steigerung der Produktivität durch die Reduzierung des Zeitaufwands für Designänderungen. Dies verbessert die Effizienz erheblich und bringt Vorteile bei der Entwicklung komplexer Modelle und Verbindungen.

Durch die Erweiterung der Visualisierungs- und Simulationsfähigkeiten in verschiedenen Disziplinen erleichtert und fördert diese Methode die Zusammenarbeit im Designprozess. Benutzer können Berechnungen durchführen und deren Integration in das Modell in Echtzeit erleben. Dieses Werkzeug ermöglicht es, wiederholende Geometrien mit minimalem Aufwand zu erstellen, wie z. B. Formen, die einer neuen Ausrichtung folgen oder identische Verbindungen aufweisen.

Die Kombination von künstlicher Intelligenz mit parametrischem Building Information Modeling stellt einen bedeutenden Fortschritt bei der Umsetzung von generativem Design dar.

3 Software für das parametrische Entwerfen

Der gegenwärtige Bereich der zeitgenössischen Architektur und des Designs zeigt eine deutliche Nachfrage nach komplexen geometrischen Strukturen, die flexibel an individuelle Anforderungen angepasst werden können. Diese komplexe Geometrie spielt eine zentrale Rolle bei der Festlegung der Gesamtstruktur, Form und Dimensionen von Bauwerken. Die steigende Notwendigkeit für moderne und zukunftsorientierte architektonische Entwürfe hat die Entwicklung fortschrittlicher Techniken wie Computer-Aided Design (CAD) vorangetrieben, die heute in der Architektur weit verbreitet sind. CAD ermöglicht eine präzise Visualisierung und Bearbeitung von Designs, was zu konsistenter Präzision und hoher Qualität führt, sowohl bei der Erstellung als auch bei der Überprüfung, Anpassung und Präsentation von Entwürfen.

Parametrisches Design hingegen nutzt Parameter wie Einschränkungen, Verbindungen zwischen geometrischen Elementen, Abmessungen sowie Formen und Größen, um eine Verbindung zwischen Designzielen und -antworten herzustellen. Diese Parameter sind entscheidend für den algorithmischen Aufbau und die Gestaltung des Modells, was in den folgenden Schritten veranschaulicht wird.

Im Folgenden sind die wichtigsten Softwarepakete aufgeführt, die von Designern verwendet werden, die sich für die Entwicklung parametrischer Designprojekte interessieren.

3.1 Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten ausgewählter Planungsprogramme

Unter einer Reihe verschiedener Softwarepakete zeichnen sich insbesondere Rhinoceros3D, Grasshopper3D, Dlubal RFEM, IDEA StatiCa und Programme der AutoCAD-Familie aus. Diese Programme ermöglichen den Architekten und Bauingenieuren einen integrierten Workflow vom Entwurf bis zur Erstellung präziser Ausführungsplänen zu realisieren. In der Entwurfsphase können Architekten in Rhino 3D die komplexen Formen entwickeln und mithilfe von Grasshopper die parametrische Flexibilität verbessern. Solche Modelle lassen sich problemlos in RFEM importieren, um Belastungsanalysen durchzuführen. Mit IDEA StatiCa werden präzise

Verbindungen dimensioniert. Dieser Workflow ermöglicht es, Entwurfsänderungen schnell einzuarbeiten und die Fehler zu minimieren. Anschließend können diese Daten in eines der Programme der AutoCAD-Familie importiert werden, um Ausführungspläne zu erstellen.

3.1.1 Rhinoceros 3D

Rhinoceros 3D, oft kurz als Rhino bezeichnet, ist eine vielseitige CAD-Software, die auf NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) basiert. Diese mathematischen Modelle bieten eine präzise Beschreibung von Kurven und Flächen, die insbesondere in der Architektur und im Ingenieurwesen von Bedeutung sind. Rhino wird häufig in verschiedenen Industrien eingesetzt, darunter Architektur, Industriedesign und Schiffbau, und hat sich als leistungsstarkes Werkzeug für die Erstellung komplexer geometrischer Modelle etabliert [13].

Ein Hauptvorteil von Rhino liegt in seiner Flexibilität bei der Integration mit anderen Softwarelösungen. In der Bauplanung ermöglicht es die Erstellung hochpräziser 3D-Modelle, die als Grundlage für weiterführende Analysen dienen. Zum Beispiel kann Rhino verwendet werden, um Modelle für die finite Elemente Analyse (FEA) zu erstellen, die in Software wie RFEM oder IDEA StatiCa importiert werden können. Dies erleichtert den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Plattformen und verbessert die Workflow-Effizienz [14] [15]. In der folgenden Abb. 2: Red Bull Arena, Leipzig: a) Stadion nach Abschluss der Bauarbeiten b) Rhino-Modell und RFEM-Modell ist ein Beispiel einer Rhino Modellierung für den Import in RFEM.

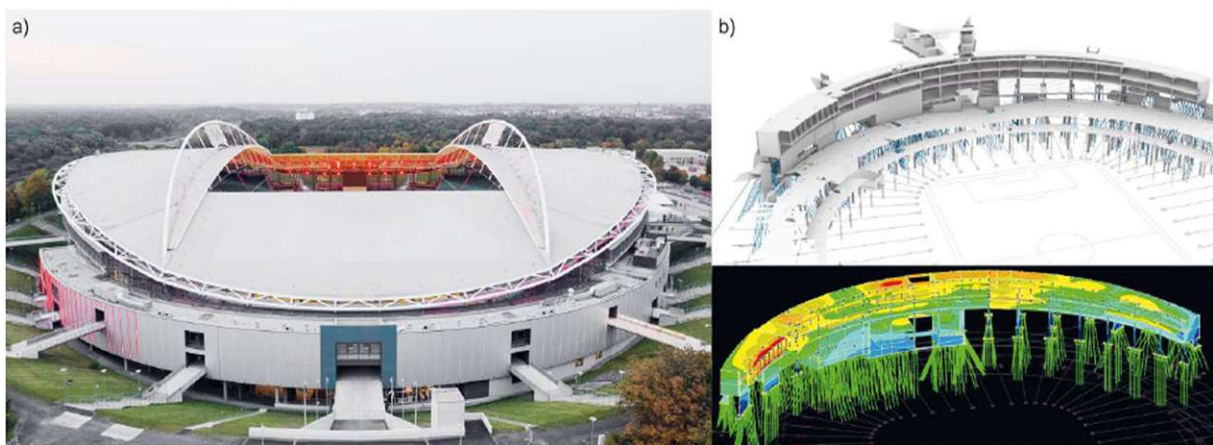


Abb. 2: Red Bull Arena, Leipzig: a) Stadion nach Abschluss der Bauarbeiten b) Rhino-Modell und RFEM-Modell [15].

Darüber hinaus ermöglicht Rhino durch die Verknüpfung mit Plugins wie Kiwi!3D die Integration von parametrischen Entwurfsprozessen direkt in den CAD-Arbeitsablauf. Kiwi!3D nutzt die Isogeometrische B-Rep-Analyse (IBRA), um eine konsistente Geometriebeschreibung und Analytik sicherzustellen. Dadurch können Formfindung, Strukturanalyse und Zuschnitt in einer einheitlichen Umgebung durchgeführt werden, was zu einer erheblichen Reduktion des Planungsaufwands führt [14].

Rhinoceros 3D wird im Bauingenieurwesen in zahlreichen Bereichen eingesetzt, darunter die Modellierung komplexer Geometrien wie Freiformen oder doppelt gekrümmter Flächen. Solche Modelle sind besonders in der Gestaltung von Membrantragwerken oder Stahl-Glas-Strukturen relevant. Beispielsweise ermöglicht Rhino die Integration von Simulationsdaten direkt in die Entwurfsphase, wodurch die Zusammenarbeit zwischen Architekten und Ingenieuren verbessert wird. Die Möglichkeit, CAD-Modelle mit hoher Genauigkeit zu erstellen und diese nahtlos mit Strukturanalyse-Software zu verbinden, ist ein zentraler Vorteil [14] [15].

3.1.2 Grasshopper 3D

Rhinoceros 3D, dient als Plattform für das Grasshopper 3D-Plug-in, das früher als Explicit History bekannt war. Grasshopper bietet eine grafische Programmierschnittstelle, die es Benutzern erleichtert, geometrische Objekte zu erstellen und anzupassen.

Zusätzlich zu den manuellen Modellierungswerkzeugen bietet Rhino3d den Benutzern zahlreiche Optionen, um die Software zu bedienen, von einfachem Skripting bis hin zu Application Programming Interface (API) und Plug-ins. openNurbs ist ebenfalls eine Initiative von Robert McNeel & Associates (RMA), um die Interoperabilität von geometrischen Modellen zu ermöglichen und zu fördern.

Grasshopper3d ist ein generatives Design-Tool, das als Plug-in für Rhino3d funktioniert. Es ist eine sehr beliebte Wahl unter Designern, hauptsächlich aufgrund der Benutzeroberfläche, da die Alternativen in der Regel erhebliche technische oder Programmierkenntnisse erfordern, um ebenso effektiv und effizient genutzt werden zu können. Die Zugänglichkeit und Funktionalität, die RMA unabhängigen Entwicklern bietet, hat zahlreiche Plug-ins von Drittanbietern sowohl für Rhino3d als auch für Grasshopper3d gefördert und unterstützt [16].

Bei der Entwicklung einer Grasshopper-Definition platzieren Benutzer verschiedene Komponenten oder Knoten auf eine Arbeitsfläche. Diese Knoten interagieren mithilfe von Graphen, die den Fluss zwischen Parametern und benutzerdefinierten Funktionen anzeigen. Diese Interaktionen führen zur Erzeugung komplexer geometrischer Formen. Änderungen an Parametern oder Geometrien werden automatisch auf alle Funktionen übertragen, was zu einer Neugenerierung der Geometrie führt [1].

Die Grasshopper-Arbeitsfläche mit ihren Knoten ist ein visuelles Programmierframework. Grasshopper ermöglicht es Designern, Architekten und Ingenieuren, komplexe parametrische Modelle durch die Verknüpfung unterschiedlicher Knoten auf einer grafischen Benutzeroberfläche zu erstellen und zu manipulieren.

Die Arbeitsfläche in Grasshopper ist der Hauptarbeitsbereich für die Erstellung parametrischer Modelle. Sie bietet eine visuelle Oberfläche, über die Benutzer durch Ziehen und Ablegen mit Knoten interagieren können. Durch das Herstellen von Verbindungen zwischen den Knoten können Beziehungen geschaffen und somit geometrische Elemente erzeugt und bearbeitet werden. In Grasshopper sind Knoten grafische Repräsentationen einzelner Komponenten, die spezifische Aktionen oder Operationen ausführen. Diese umfassen mathematische Operationen, geometrische Transformationen, Datenmanipulation und benutzerdefinierte Skripte. Jeder Knoten verfügt über Eingaben und Ausgaben, die durch Verbindungen zwischen den Knoten einen kontinuierlichen Datenfluss oder eine algorithmische Kette ermöglichen. Die Einrichtung von Verbindungen zwischen den Knoten dient dazu, die logischen Beziehungen und Abhängigkeiten im parametrischen Modell darzustellen. Durch die Anpassung von Eingabeparametern oder Änderung der Netzwerktopologie der Knoten wird das Modell automatisch aktualisiert, was die schnelle Erstellung und Überprüfung verschiedener Designvarianten ermöglicht.

Grasshopper findet breite Anwendung in Bereichen wie Architektur, Industriedesign, computergestütztem Design und Ingenieurwesen. Es unterstützt Designer dabei, komplexe Strukturen zu entwerfen, Verhaltensweisen zu simulieren und Designpotenziale auf innovative Weise zu erkunden [1].

In der Studie „Scope of Unconventional Grid in Tall Building: A Way Forward“ wurden Rhino 3D und Grasshopper als Plugin zur Erstellung und Analyse unkonventioneller Gitter verwendet [17].

Im Folgenden sind die Prozessschritte von Definierung der Grundgeometrie vorgestellt:

- **Grundgeometrie:** Die Modellabmessungen wurden auf 40m x 40m Grundfläche und 100m Höhe festgelegt.
- **Verwendete Befehle:**
 - **Box Command:** Erstellung einer rechteckigen Geometrie.
 - **DeBrep:** Zerlegung von Modell in seine Einzelteile (Kanten, Flächen). Es ermöglicht eine detaillierte Bearbeitung der Flächen [17].

Die graphische Darstellung der ersten Gittermodellierung ist in Abb. 3 ersichtlich.

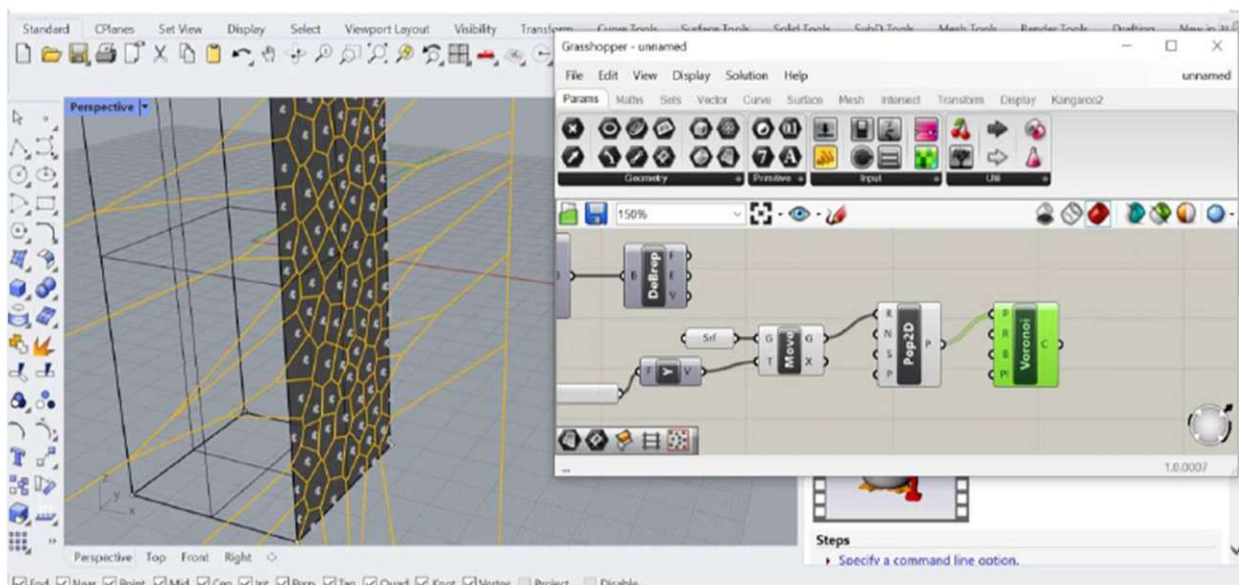


Abb. 3: Darstellung der Grundgeometrie mit unkonventionellem Gitter in Rhino 3D bei Verwendung von Grasshopper Plugin [17].

Grasshopper wird zur dynamischen Erstellung und Manipulation des Gitters verwendet.

Die verwendeten Funktionen sehen wie folgt aus:

- **Festlegung der Dimensionen:** X = 40m, Y = 40m, Z = 100m.
- **Verwendete Befehle:**
 - **Populate 2D:** Platzierung von Punkten auf den Flächen, die als Ausgangspunkte für die Erstellung des Gitters dienen.
 - **Scale Factor:** Steuerung der Gitterintensität (Skalierungsfaktor: 0 bis 1). Er kann je nach Bedarf geändert werden.
 - **Voronoi:** Generierung unregelmäßiger Gitter basierend auf den verteilten Punkten.
 - Move- und Join: Übertragung des Modells auf alle Seiten [17].

Die Realisierung der unterschiedlichen Formen (z.B. rechteckig, kreisförmig) kann durch Austausch des Box-Befehles erzielt werden. Die Abb. 4 zeigt die angeführten Befehle [17].

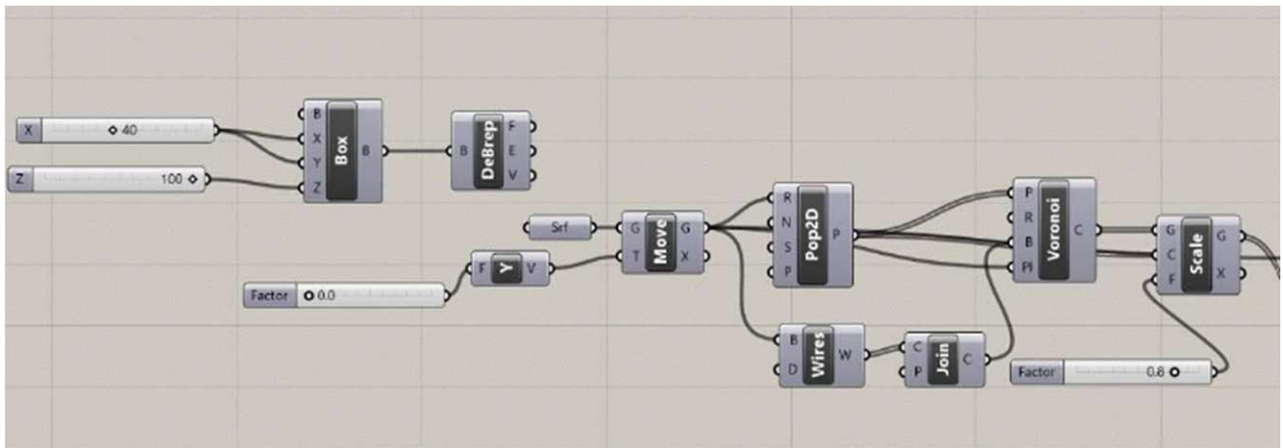


Abb. 4: Grasshopper-Interface zur Gittererstellung [17].

Das fertige Rhino3D-Modell ist in der Abb. 5 ersichtlich.

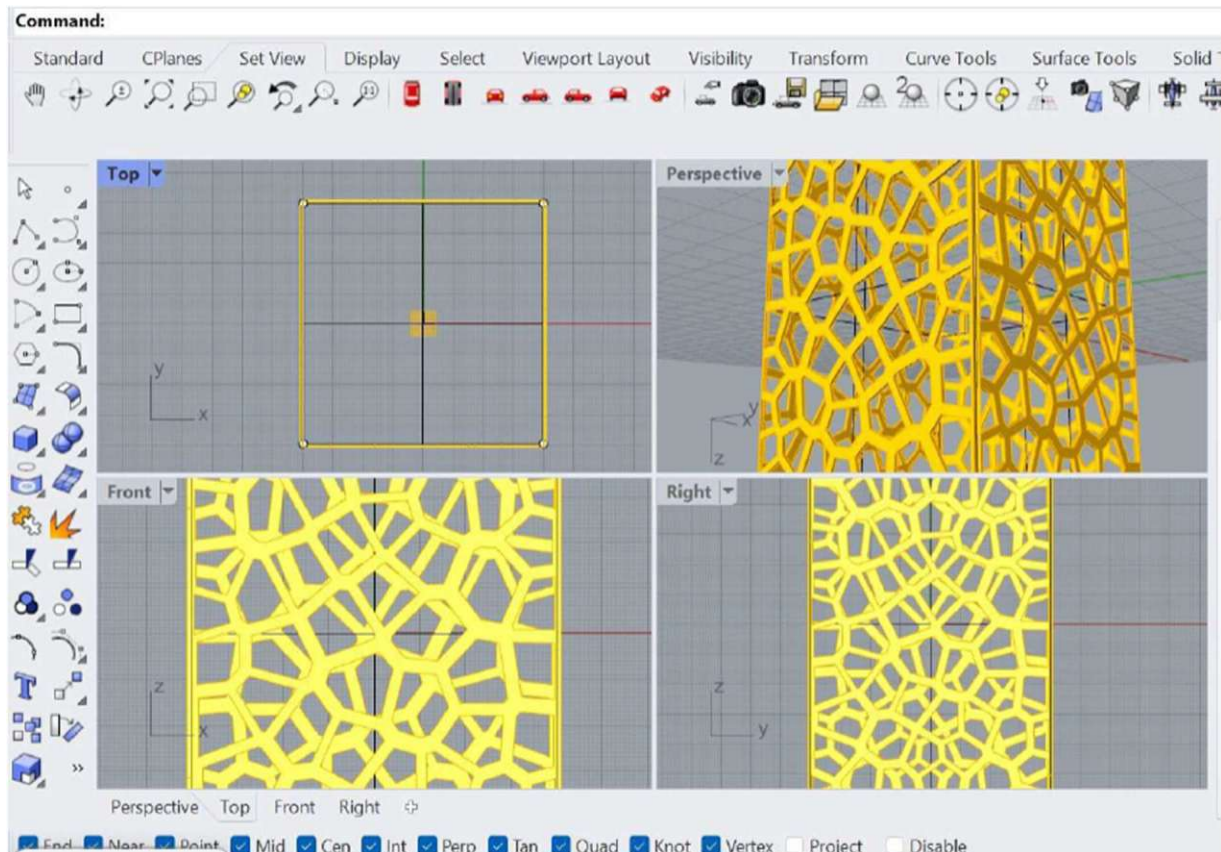
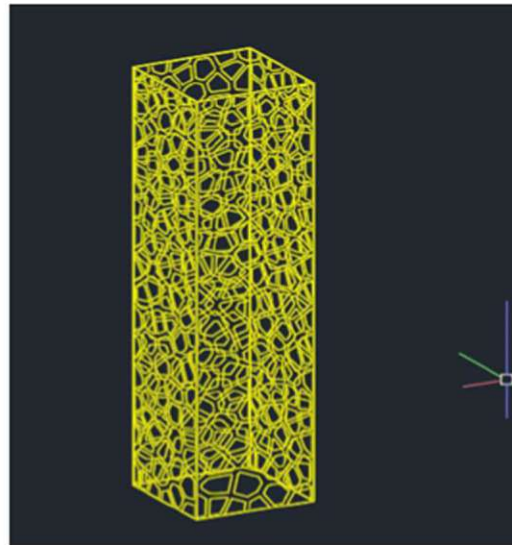
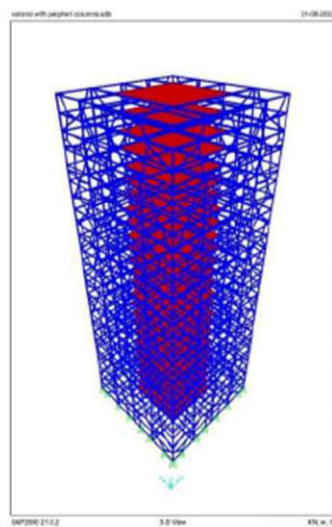


Abb. 5: Rhino 3D Modell bei Verwendung von Grasshopper Plugin [17].

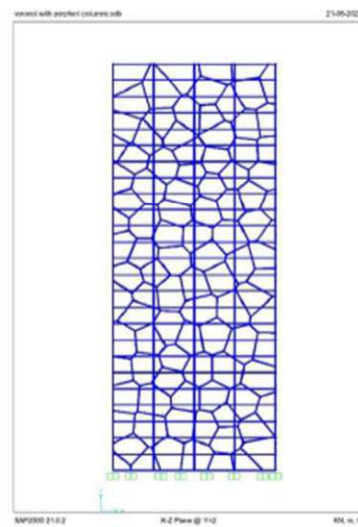
Das Modell wird anschließend in AutoCAD.dxf Format exportiert. Das ermöglicht das Modell in verschiedenen FEM-Berechnungsprogrammen zu importieren, um eine Tragwerksanalyse durchzuführen. Die entsprechenden Modelle sind in Abb. 6 dargestellt.



(a)



(b)



(c)

Abb. 6: a) AutoCAD Modell; b) 3D-Modell in einem FEM-Programm; c) 2D-Modell in einem FEM-Programm [17]

3.1.3 Parametrische FEM Toolbox zum Austausch von Daten mit Dlubal RFEM

In diesem Kapitel wird die „Parametric FEM“-Toolbox vorgestellt, ein Plug-in für die visuelle Programmierumgebung Grasshopper, das die RF-COM API der Finite-Elemente-Software RFEM nutzt, um eine Verbindung zwischen diesen beiden Plattformen herzustellen. Dies ermöglicht die Übertragung von Daten zwischen Grasshopper und RFEM und erweitert die Möglichkeiten der konventionellen grafischen Benutzeroberfläche (GUI) von RFEM erheblich.

Grasshopper ermöglicht die Erstellung von benutzerdefinierten Plug-ins, die als kompilierte Versammlung in die Software geladen werden. Die große Anzahl verfügbarer Plug-ins erweitert die Funktionalitäten von Grasshopper.

Die Parametric FEM Toolbox wurde von Diego Apellániz in Zusammenarbeit mit den Beratungsingenieuren Bollinger-Grohmann entwickelt. Sie ermöglicht die Interoperabilität zwischen RFEM und Grasshopper durch die RF-COM API. Die Toolbox bietet folgende Funktionen:

- **Import von Daten** aus Grasshopper in RFEM: Modelldaten, Lasten, Lastfälle, Lastkombinationen usw.
- **Export von Daten** aus RFEM in Grasshopper.
- **Durchführung von Strukturberechnungen** direkt aus Grasshopper.
- **Visualisierung von RFEM-Modellen** in Rhino.
- **Workflows**
- **Workflow von Grasshopper zu RFEM [15].**

Der Workflow beginnt mit der Definition von Objekten in Grasshopper, die dann in RFEM exportiert werden. Beispielsweise kann ein Balkenelement in Grasshopper definiert und mit einem "Set Data"-Komponente in RFEM exportiert werden. Dieser Prozess ermöglicht die Erstellung von FE-Modellen mit komplexen Geometrien, die in Rhino erstellt wurden (Abb. 7).

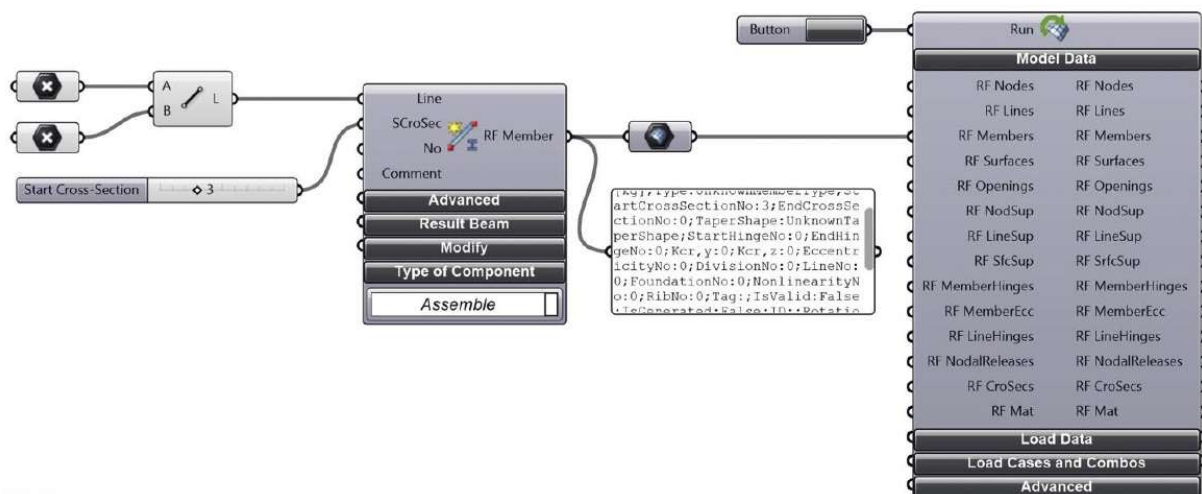


Abb. 7: Workflow von Grasshopper zu RFEM [15]

Daten können auch von RFEM in Grasshopper importiert werden, um sie weiter zu analysieren oder zu visualisieren (Abb. 8). Die "Get Data" Komponente ermöglicht den Import von Objekten und Berechnungsergebnissen, die dann in Grasshopper weiterverarbeitet werden können [15].

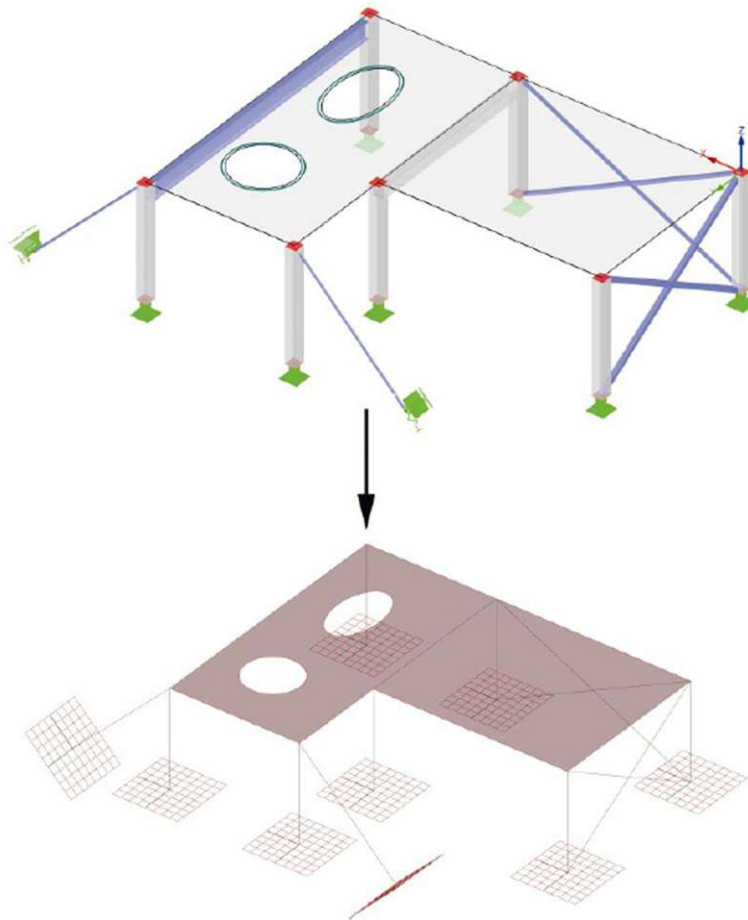


Abb. 8: Workflow von RFEM zu Grasshopper [15]

Ein Beispiel für die Anwendung der Toolbox ist die Modellierung einer Fußgängerbrücke in Brüssel, wie es in der Abb. 9 ersichtlich ist. Die komplexe Geometrie der Brücke wurde in Rhino erstellt und dann mit der Toolbox in RFEM importiert. Dies ermöglichte die Übertragung nicht nur der Geometrie, sondern auch der mechanischen Eigenschaften und Lasten.

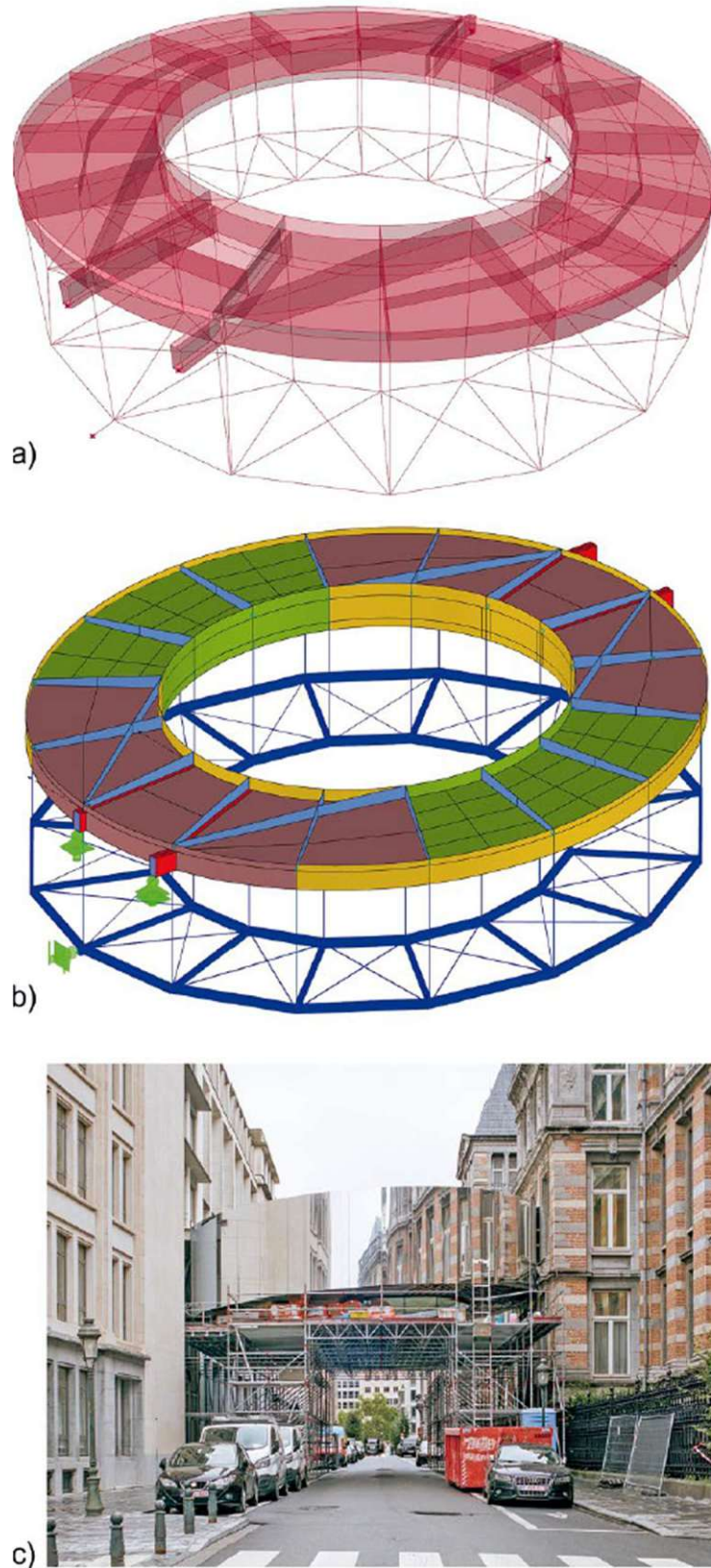


Abb. 9: Tondo Brücke in Brüssel a) Grasshopper 3D-Modell, b) RFEM Berechnungsmodell und c) Bild der Brücke nach Ausführung [15]

Ein Beispiel für die Verwendung der Toolbox für die detaillierte Modellierung von Verbindungen ist in der Abb. 10 ersichtlich. Beispielsweise wurde bei der Erweiterung des Wien Museums in Wien eine alternative Workflow-Methode angewendet, bei der die Verbindungsgeometrie vom Fachwerksknoten in Rhino 3D modelliert und dann in RFEM importiert wurde.



Abb. 10: Wien Museum – Anschlussdetail in Rhino 3D und RFEM (oben), und Ausführung (unten) [15]

Die nächste Abb. 11 zeigt die Erweiterung des Austria Center Wien wo der gleiche Arbeitsablauf angewendet wurde.



Abb. 11: Erweiterung des Austria Center Wien: Rhino3D und RFEM Modelle (oben) und Tragwerksausführung (unten) [15]

Die nächste Abb. 12. zeigt die Tragwerksstruktur von ArcelorMittal Hauptsitzes in Luxemburg. Hier wurde die Toolbox verwendet, um das Modell aus RFEM in Grasshopper zu importieren und um die Analyse und Filterung der Berechnungsergebnisse des großen Tragwerks durchzuführen. Es ermöglichte die geeignete Darstellung nicht nur der Berechnungsergebnisse, sondern auch der extrudierten Stahlprofile für die Dimensionierung der Anschlüsse und die Erstellung des Berechnungsberichtes.

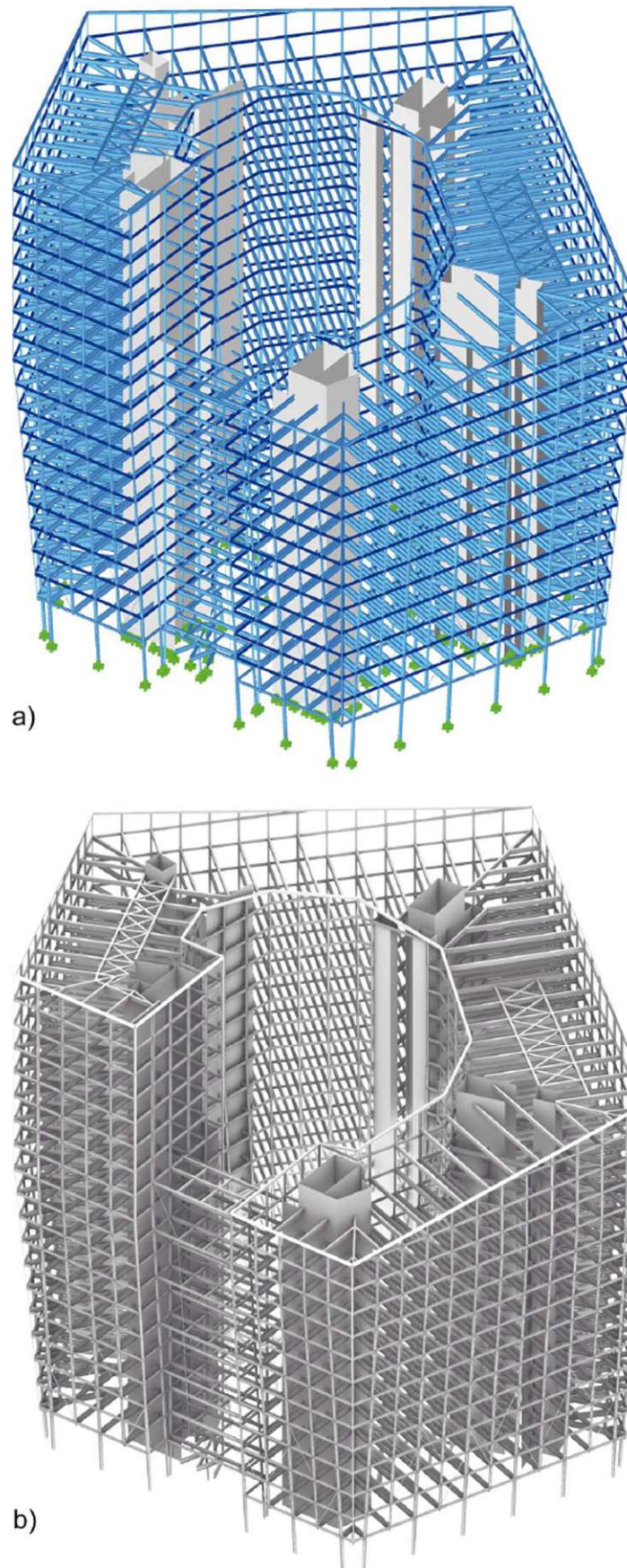


Abb. 12: ArcelorMittal Hauptsitz: a) RFEM-Modell und b) extrudiertes Rhino 3D-Modell [15]

Neben der Modellerstellung, -manipulation und -visualisierung ermöglicht die Software die Automatisierung der RFEM-Ergebnisanalyse mit Grasshopper. Analytische Nachweise, die normalerweise manuell für ausgewählte Punkte durchgeführt werden, können nun in einer digitalen Pipeline eingerichtet werden. Einmal konfiguriert, lassen sich diese Nachweise bei jeder Modellaktualisierung auf alle relevanten Situationen anwenden. Die Parametric FEM Toolbox dient als Datenverbindung, während Grasshopper die Datenaufbereitung und die analytischen Tragwerksnachweise übernimmt. Alternativ können Excel-Tabellen automatisch mit variablen Daten gefüllt und als PDF exportiert werden [15].

Ein Beispiel ist der seismische Strong Column Nachweis für das Rathaus von Fengxian in Shanghai. Dieser stellt sicher, dass die plastische Momentenkapazität einer Stütze während eines Erdbebens größer ist als die der angrenzenden Träger. Die Analyse umfasst Querschnittseigenschaften und Schnittgrößen der verbundenen Bauteile. Während der obere Teil von Abb. 13 die manuelle Dokumentation eines Nachweises zeigt, demonstriert der untere Teil die digitale Verarbeitung aller Knoten in einem Schritt, wobei die Ergebnisse grafisch im Rhino-Modell dargestellt werden.

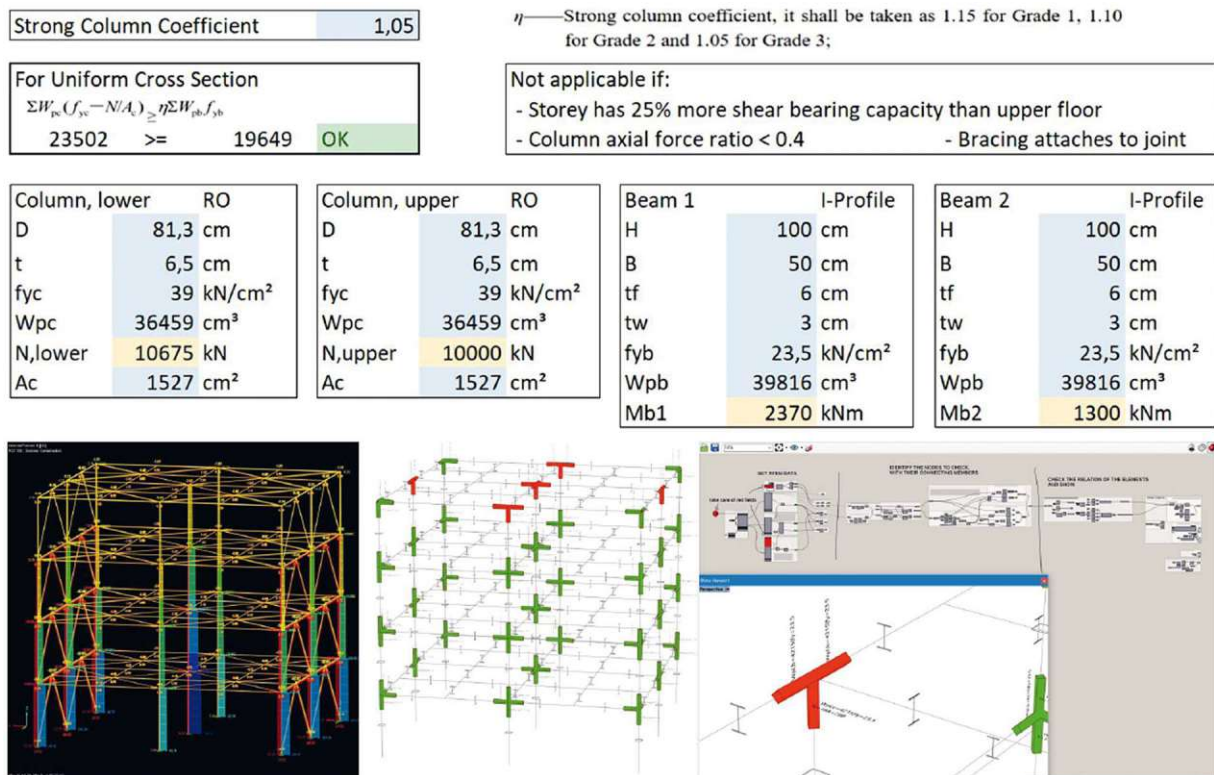


Abb. 13: Automatisierung von Erdbebennachweisen für Stützen in RFEM, Grasshopper und Excel. [15]

Darüber hinaus kann die Toolbox mit evolutionären Solvern wie Galapagos kombiniert werden, um Optimierungsprobleme zu vereinfachen. Ein Beispiel ist die Optimierung einer Fachwerkstruktur, bei der die Toolbox die Querschnittsgrößen anpasst, um die Stahlmasse zu minimieren. In jeder Solver-Iteration passt Galapagos die Trägerhöhe an, während das „Cross Section Optimization“-Plugin die Querschnittsgrößen basierend auf der aktuellen Kraftverteilung optimiert. Das Ergebnis ist eine Fachwerkkonstruktion mit minimaler Masse (Abb. 14) [15].

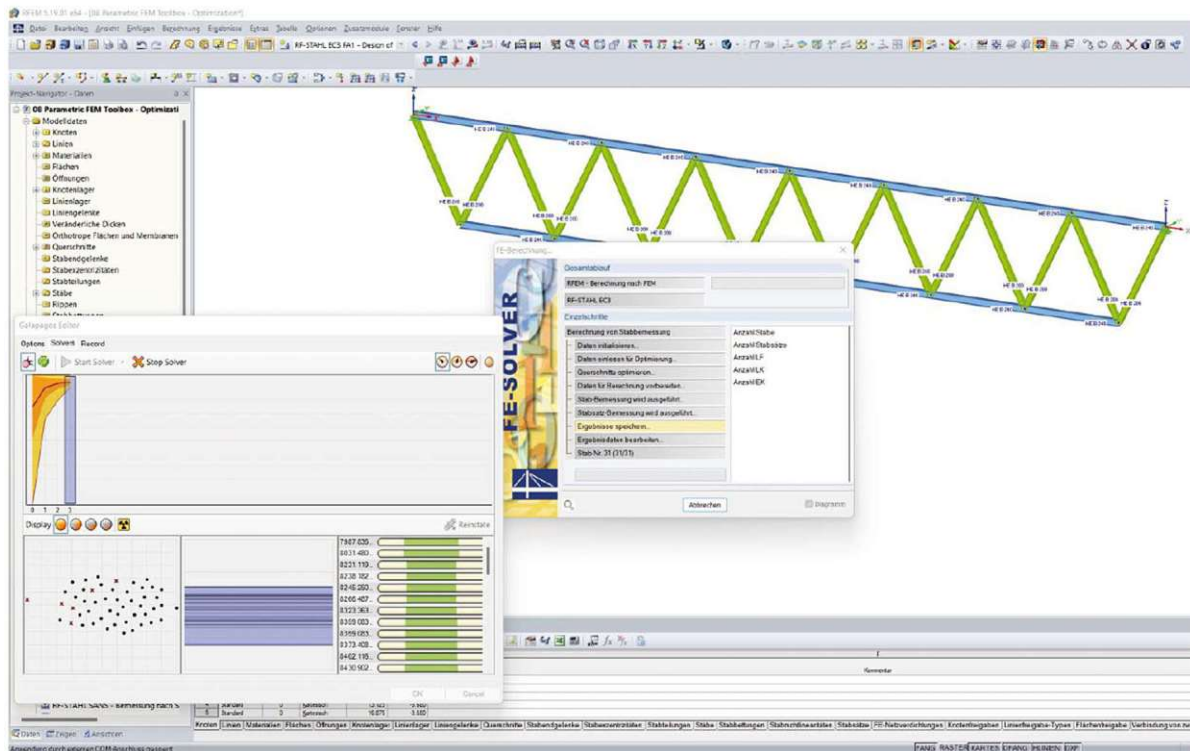


Abb. 14: Optimierung einer Fachwerkstruktur in RFEM [15]

Die Parametric FEM Toolbox bietet eine leistungsstarke Verbindung zwischen Grasshopper und RFEM, die es ermöglicht, komplexe strukturelle Entwürfe effizient zu modellieren, zu analysieren und zu optimieren. Die Toolbox erweitert die Möglichkeiten der konventionellen FEM-Software und ermöglicht die Integration von parametrischen Entwurfsmethoden in den strukturellen Entwurfsprozess.

Die Fallstudien zeigen, dass die Toolbox nicht nur für Projekte mit algorithmisch generierten Geometrien geeignet ist, sondern auch für eine breite Palette von nicht-standardisierten Struktursystemen. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Toolbox und die Zusammenarbeit mit Softwareherstellern wie Dlubal (RFEM) gewährleisten

eine stabile und zuverlässige API, die die Automatisierung von Entwurfsprozessen fördert.

3.1.4 IDEA StatiCa

IdeaStatica ist eine Software zur Konstruktion von Stahlverbindungen sowie Betonbauteilen. Sie ermöglicht die Berechnung, Prüfung und Stabilitätsnachweise von Stahlverbindungen. Im Bereich des Betonbaus bietet sie umfassende Konstruktions- und Sicherheitsprüfungen für Stahlbetonwände, Querschnitte, Träger, Rahmen sowie vorgespannten Elemente.

Wie in der Abb. 15 veranschaulicht unterstützt die Software typische Knotengeometrien, die als Stahl-, Beton- oder Holzanschlüsse definiert werden können. Zudem können verschiedene Materialien kombiniert werden [18].

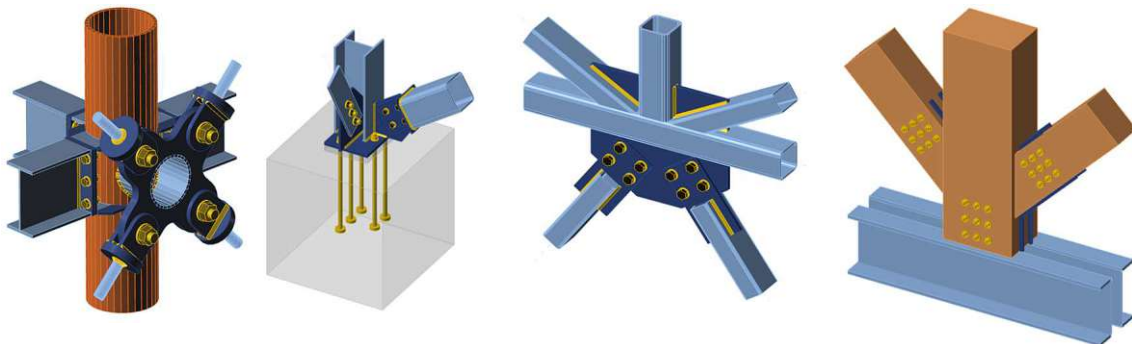


Abb. 15: Typische Knotengeometrien als Stahl- Beton- und Holzanschlüsse eingegeben werden [18].

Ideastatica arbeitet mit einem neuen patentierten Verfahren, der sogenannten CBFEM-Methode (Component-Based Finite-Element-Modell). Diese Methode ermöglicht es, Stahlverbindungen jeder Geometrie und Belastung in kürzester Zeit zu entwerfen, zu dimensionieren, aber auch einen Normennachweis zu erbringen. Dies gilt auch für jene Verbindungen, welche aufgrund ihrer Komplexität bisher nicht berechnet werden konnten [18].

Bei der CBFEM-Methode handelt es sich um eine innovative Kombination der Finite Elemente Methode (FE) sowie der Komponentenmethode [19]. Die CBFEM-Methode (Abb. 16) basiert auf der Idee, dass die meisten bewährten und sehr nützlichen Teile der Komponenten-Methode beibehalten werden sollten. Der Schwachpunkt der Komponenten-Methode – ihre Allgemeinheit bei der Analyse von Spannungen

einzelner Komponenten – wurde durch Modellierung und Analyse mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) ergänzt.

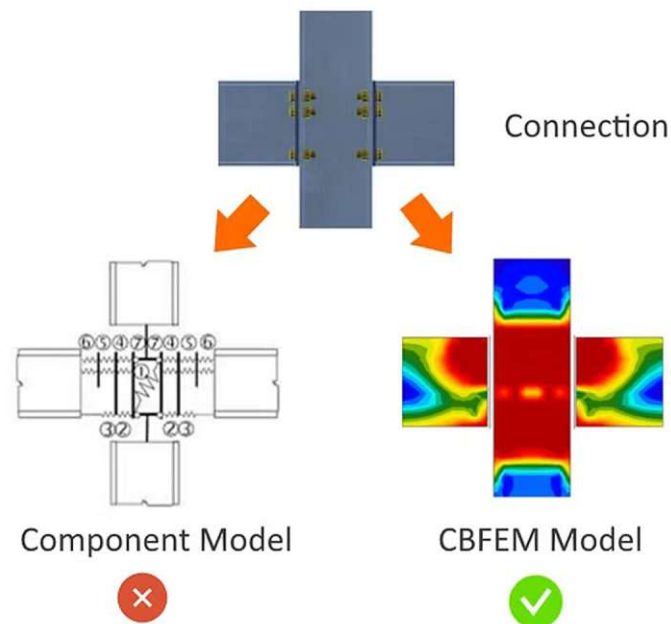


Abb. 16: Kombination der Komponenten- und FE-Methode [19]

CBFEM ist eine innovative Methode zur Gestaltung und Überprüfung von Stahlverbindungen, Bauteilen und Verankerungen. Sie kann für die meisten Verbindungen, Verankerungen und Details verschiedener Topologien verwendet werden. Ein Beispiel ist in der Abb. 17 dargestellt.

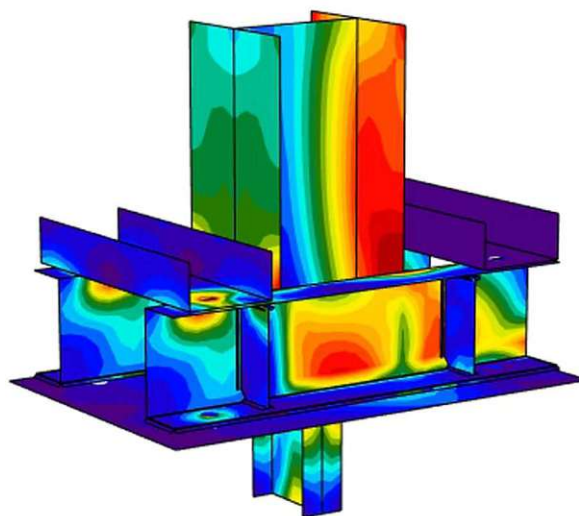


Abb. 17: Berechnung eines Stahlanschlusses mit unkonventioneller Geometrie [19]

Die CBFEM-Methode liefert klare Informationen über das Verhalten der Verbindung oder des Bauteils. Die Methode ist schnell, effizient und normgerecht. CBFEM zerlegt die gesamte Verbindung in getrennte Komponenten – Stahlplatten, Schweißnähte, Schrauben, Anker und Betonblöcke. Das Analysemodell wird automatisch aus jeder Komponente erstellt. Das designorientierte FEM ist optimiert, um Ergebnisse zu liefern, die für die Normprüfung relevant sind und gleichzeitig das reale Strukturverhalten abdecken [20].

In Bezug auf Stahlverbindungen bietet Ideastatica für jede Art von Stahlverbindung exakte Nachweise, Dehnungen und Spannungen, ebenso wie die Rotationssteifigkeit sowie eine Beulanalyse. Außerdem ist ein Nachweis bei Schweißnähten, Betonfundamenten aber auch Schrauben nach Eurocode, CISC, AUS sowie AISC möglich. Weiters stehen Designvorlagen für die häufigsten Anschlüsse und eine große Auswahl von Schweiß- sowie Walzprofilen zur Verfügung. Hierbei bestehen keinerlei Einschränkungen, aus welcher Anzahl von Verbindungselementen ein Anschluss besteht. Ebenso existiert auch keine Einschränkung in Bezug auf die Typen und wie diese zusammengesetzt sind. Es wird so die Form und die Art der Verbindung ausschließlich von den Projektanforderungen bestimmt. Ideastatica berücksichtigt beim Nachweis von Verbindungen, wobei dies sowohl für einzelne Verbindungen als auch für den Gesamtnachweis eines Anschlusses gilt, alle Kräfte. Miteinbezogen wird hier auch die Interaktion zwischen allen Profilen und Verbindungen [19]. Es führt die Software hierbei eine nichtlineare plastische Analyse für alle Arten und Elemente von geschweißten oder auch geschraubten Verbindungen oder Fußplatten mit Verankerungen durch. Weiters unterstützt sie auch Anker- sowie Schraubverbindungen, ebenso wie besondere Kontaktelemente zwischen den Platten [18].

Betrachtet man nun Betonbauteile, so bietet Ideastatica Detail die Bearbeitung verschiedenster Betonbauteile als auch Betonbauanschlüssen. Es werden hier effizient alle Teile der Struktur behandelt, welche auch als Diskontinuitätsbereiche bezeichnet werden. Als Beispiele können hier etwa Wände, mit Punkten versehene Enden, Aufhängungen/Konsolen oder auch Bereiche oberhalb von Stützen genannt werden. Die Beton- und Bewehrungsfestigkeit wird, ebenso wie Spannungen, Beanspruchungen und Dehnungen, genau geprüft und das Ergebnis wird klar visualisiert, wie in der folgenden Abb. 18 als Beispiel dargestellt ist [21].

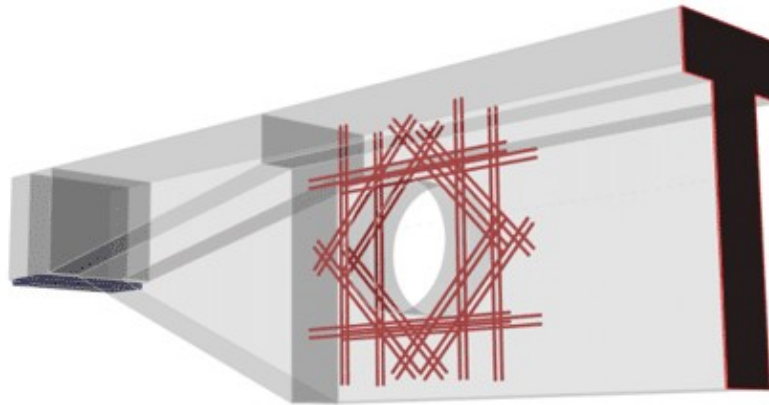


Abb. 18: Beispiel Ideastatica/Träger [21]

Eine weitere innovative Softwarelösung, die die BIM-Integration für Bauingenieure, insbesondere im Bereich der Stahlkonstruktionen, ermöglicht ist Idea Checkbot. Dieses Werkzeug erleichtert die Datenübertragung von Geometrie-, Last- und Berechnungsmodellen zwischen verschiedenen Softwareplattformen (wie Tekla, Revit oder anderen Programmen für die Strukturanalyse) und der Idea StatiCa-Software zur Verifizierung von Verbindungen.

Wie in der Abb. 19 beispielhaft dargestellt ist, schafft das Checkbot eine Verbindung zwischen dem Hauptmodell der Konstruktion und dem Tool zur Überprüfung von Stahlverbindungen, wodurch der Entwurfs- und Kontrollprozess effizienter wird. Nachdem das geometrische und statische Modell in einer 3D-Modellierungssoftware (z. B. Tekla Structures oder Autodesk Revit) vorbereitet wurde, übernimmt Checkbot automatisch alle relevanten Informationen. Siehe Abb. 19. Auf diese Weise wird die manuelle Dateneingabe vermieden, die zeitaufwendig und fehleranfällig wäre [22].

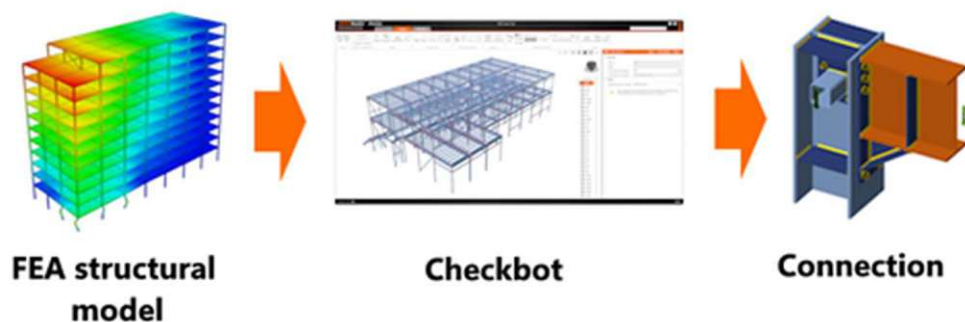


Abb. 19: Übernahme eines FEM-Modells im Checkbot und anschließende Dimensionierung der Verbindungen [22]

Im Folgenden sind die Hauptvorteile dieses Ansatzes aufgelistet:

- **Schnellerer Informationsaustausch:** Die automatische Datenübertragung beschleunigt den Workflow erheblich und minimiert die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler.
- **Einheitliches Modell:** Last- und Geometriedaten bleiben zwischen verschiedenen Softwarepaketen konsistent, was einen klareren Überblick über den Planungsprozess ermöglicht.
- **Einhaltung von BIM-Prinzipien:** Checkbot stellt sicher, dass alle Projektbeteiligten (Statiker, Planer, Bauunternehmer) mit derselben Version des Modells und der Daten arbeiten [22].

Checkbot nutzt die Methodik von Idea StatiCa zur Überprüfung von Verbindungen gemäß den relevanten Normen (Eurocodes, AISC usw.). Die wichtigsten Vorteile dieser Verifizierung sind:

- **Umfassende Analyse:** Die Software überprüft verschiedene Verbindungstypen (geschweißte, geschraubte, komplexe Verbindungen mit mehreren Elementen) unter Berücksichtigung komplexer Faktoren wie Material- und Geometrie-Nichtlinearitäten.
- **Automatisierte Berichte:** Nach der Berechnung generiert Checkbot detaillierte Berichte zu Lasten, Spannungen und Sicherheitsfaktoren, die für die weitere Dokumentation und Verifizierung des Projekts erforderlich sind.
- **Interaktive Fehlerkorrektur:** Wenn Abweichungen in den Ergebnissen festgestellt werden oder Korrekturen erforderlich sind, kann der Konstrukteur schnell die Geometrie der Verbindung aktualisieren und die Berechnung erneut ausführen. Dies ist besonders in den frühen Entwurfsphasen wichtig, wenn die Art und Dimension der Verbindung optimiert wird [22].

In der Praxis kann der Workflow wie folgt aussehen:

1. Erstellung des Hauptmodells in einer 3D-Planungssoftware (z. B. Rhino 3D, Tekla Structures).
2. Definition von Lasten und Kombinationen in einer Software für die statische Analyse (z. B. RFEM, SAP2000, Robot Structural Analysis).

3. Nutzung von Checkbot zum Import relevanter Daten in Idea StatiCa.
4. Verifizierung der Verbindungen in der Idea StatiCa-Umgebung: Prüfung von Spannungen, Elementdimensionen, Schweißnähten, Schrauben usw.
5. Export der Berichte und Ergebnisse zurück in das Haupt-BIM-Modell zur weiteren Archivierung und zum Austausch mit anderen Projektbeteiligten [22].

Dieser Ansatz reduziert das Risiko von Diskrepanzen zwischen verschiedenen Softwareplattformen erheblich und ermöglicht präzise und schnelle Planungsentscheidungen.

Die Einführung von Softwaretools wie Checkbot in den BIM-Prozess verbessert nicht nur die Zusammenarbeit verschiedener Ingenieursdisziplinen, sondern sorgt auch für eine höhere Zuverlässigkeit und Effizienz bei der Überprüfung von Stahlverbindungen. Darüber hinaus reduzieren Automatisierung und Digitalisierung im Rahmen von BIM die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler. Sie ermöglichen schnelle Reaktionen auf Änderungen im Entwurfsprozess und beeinflussen positiv die Qualität der endgültigen Lösung [22].

In zukünftigen Forschungen und Entwicklungen sollte der Schwerpunkt auf der Erweiterung der Kompatibilität von Checkbot mit möglichst vielen Programmen für die statische Analyse und 3D-Modellierung liegen. So ist eine vollständige Integration von BIM auf allen Ebenen des Planungsprozesses erreichbar.

Die fortschreitende Digitalisierung im Bauwesen erfordert effiziente Werkzeuge für die Planung und Bemessung von Verbindungen. IDEA StatiCa bietet hierfür Funktionen des parametrischen Designs und der Automatisierung, die den Planungsprozess optimieren.

Im Entwicklermodus von IDEA StatiCa Connection können Anwender Parameter definieren, die bestimmte Komponenten basierend auf festgelegter Logik verknüpfen. Bei Änderungen einer Komponente passen sich verknüpfte Elemente automatisch an, wodurch wiederholte manuelle Anpassungen reduziert werden. Beispielsweise kann bei einer Anpassung der Breite einer Verbreiterung die Position der Versteifungen entsprechend den definierten Parametern automatisch aktualisiert werden [23]. Siehe Abb. 20.

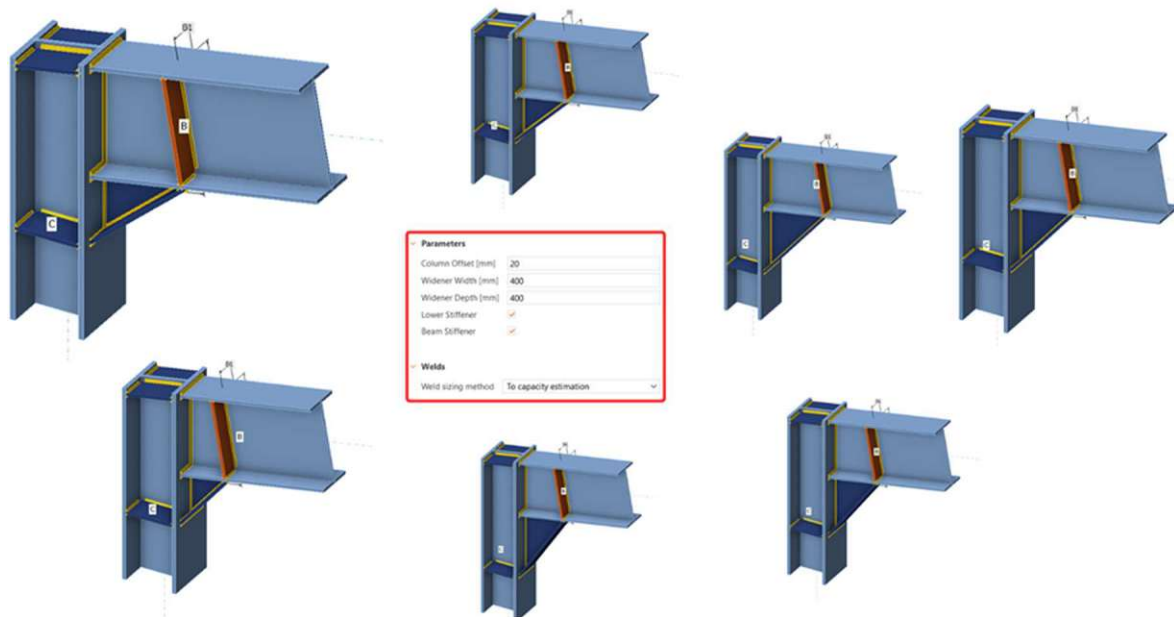


Abb. 20: Automatische Anpassung der verknüpften Anschlusselementen [23]

Zusätzlich wurden parametrische Vorlagen in die Verbindungsbibliothek integriert. Nutzer können auf vorhandene Vorlagen zugreifen und diese für passende Topologien verwenden oder eigene Vorlagen erstellen, speichern und unternehmensweit teilen [22].

IDEA StatiCa implementiert maschinelles Lernen zur automatischen Bemessung von Schweißnähten und Schrauben. Mit minimalem manuellem Aufwand können diese Verbindungselemente bemessen werden, was den Planungsprozess weiter beschleunigt.

Durch die Nutzung des IDEA Open Model (IOM) (Abb. 21) können Bauteile, Querschnitte sowie Verbindungselemente wie Schrauben, Schweißnähte und Aussparungen direkt in Grasshopper modelliert und anschließend in IDEA StatiCa analysiert werden [23].

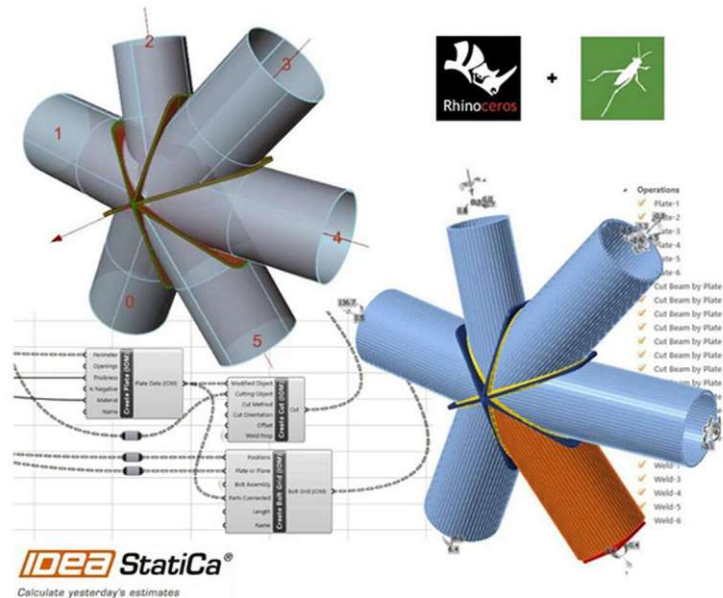


Abb. 21: Modellierung eines Anschlusses in Grasshopper und Analyse in IDEA StatiCa [23]

Im Folgenden wird anhand des Praxisbeispiels der Wasserrutschentreppe der Workflow von IDEA StatiCa in Kombination mit anderen Programmen veranschaulicht.

Das Projekt der Wasserrutschentreppe in den Termen di Giunone bei Verona, Italien, stellt eine bemerkenswerte Verbindung von innovativem Design und fortschrittlicher Ingenieurtechnik dar. Unter der Leitung des freiberuflichen Bauingenieurs Giovanni Predicatori in Zusammenarbeit mit Contec Engineering entstand eine 20 Meter hohe Treppenstruktur, die von der Doppelhelix der DNA inspiriert ist. Diese einzigartige Konstruktion erforderte den Einsatz spezialisierter Softwarelösungen, insbesondere IDEA StatiCa, um die strukturelle Integrität und Präzision des Entwurfs sicherzustellen [24].

Wie in der Abb. 22 zu sehen ist, besteht die Treppe aus zwei ineinander verschlungenen Rampen, die von acht kreisförmigen Außensäulen getragen werden. Diese komplexe Geometrie erforderte eine sorgfältige Planung und präzise statische Berechnungen. Die Herausforderung bestand darin, die ästhetischen Anforderungen mit den funktionalen und sicherheitstechnischen Aspekten in Einklang zu bringen.

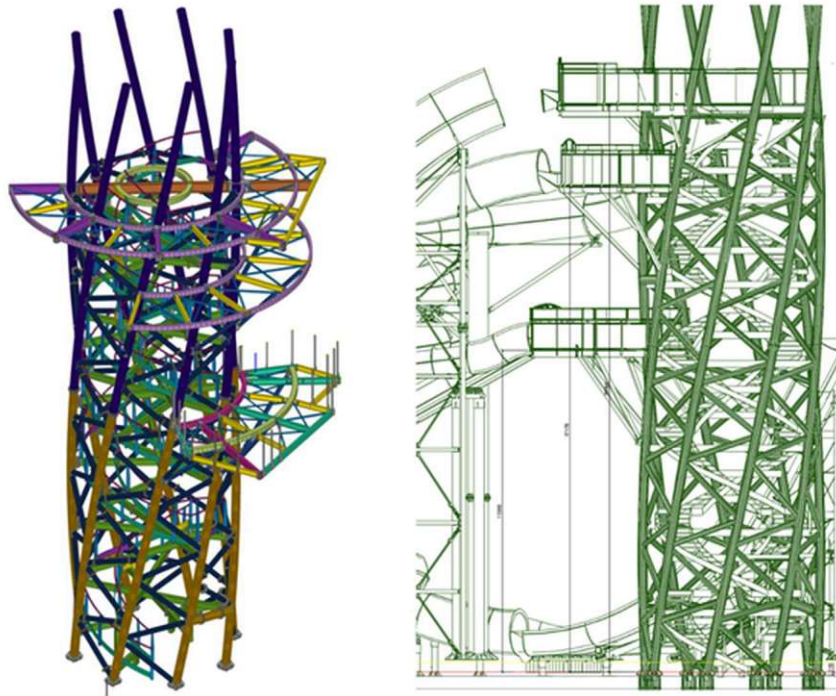


Abb. 22: Tragwerksmodell des Stahlturms von Wasserrutschentreppe [24]

Die Doppelhelix-Struktur brachte mehrere technische Herausforderungen mit sich:

- Stabilität unter variablen Lasten: Die Treppe musste so konzipiert werden, dass sie unterschiedlichen Belastungen standhält, einschließlich der dynamischen Kräfte infolge der Nutzung als Wasserrutsche.
- Robuste Verbindungen: Die Verbindungen der spiralförmigen Elemente mussten so gestaltet werden, dass sie die strukturelle Integrität gewährleisten.
- Windaussteifung: Angesichts der Höhe der Struktur war eine effektive Aussteifung gegen Windlasten erforderlich.
- Einhaltung der Eurocode-Normen: Besonderes Augenmerk lag auf der Einhaltung der Eurocode-Normen unter Berücksichtigung der spezifischen italienischen Anhänge [24].

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wurde eine Kombination aus IDEA StatiCa und Scia Engineer eingesetzt. Das Architekturmodell, entwickelt in Allplan, wurde in Scia Engineer importiert, um eine detaillierte Strukturanalyse durchzuführen. Kritische Verbindungen wurden identifiziert und mit IDEA StatiCa detailliert analysiert, um sicherzustellen, dass jedes Element den erforderlichen Sicherheits- und

Stabilitätsstandards entspricht. Die typischen Anschlussgeometrien sind in der Abb. 23 dargestellt [24].

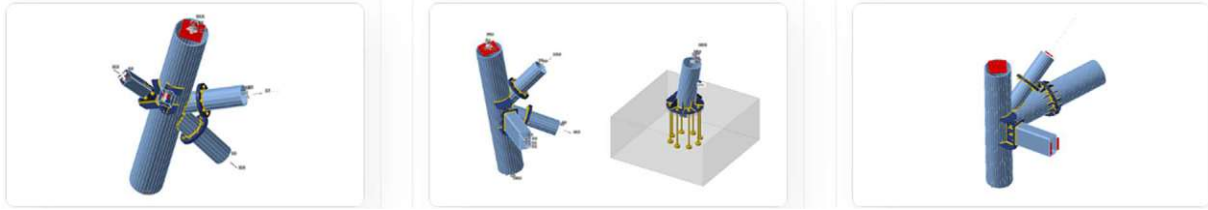


Abb. 23: Analyse der Anschlussgeometrie der tragenden Säulen in IDEA StatiCa [24]

Die Integration dieser Softwaretools ermöglichte:

- Präzise Modellierung komplexer Geometrien: Die Software unterstützte die genaue Darstellung der ineinander verschlungenen Rampen und der tragenden Säulen.
- Effiziente Analyse der strukturellen Verbindungen: Kritische Punkte wurden identifiziert und detailliert untersucht, um die Sicherheit der Konstruktion zu gewährleisten.
- Schnelle Anpassung an Konstruktionsänderungen: Änderungen im Design konnten effizient implementiert und deren Auswirkungen sofort analysiert werden [24].

Die endgültige Ausführung der Treppe, realisiert von der Stahlbaufirma Gesia, nutzte den IDEA StatiCa Viewer für die Ausarbeitung der präzisen Details der Verbindungs konstruktion. Das Ergebnis ist eine Treppe, die nicht nur den statischen Anforderungen entspricht, sondern auch durch ihre ästhetische Anmutung beeindruckt [24].

Abb. 24 zeigt das vormontierte Tragwerk der Treppenkonstruktion während der Ausführung.



Abb. 24: Montage der tragenden Struktur der DNA-Helix-inspirierten Treppe [24]

Dieses Projekt unterstreicht die Bedeutung moderner Softwarelösungen im Bauingenieurwesen, insbesondere bei der Umsetzung komplexer und innovativer Designs. Die erfolgreiche Integration von Architektur und Technik in diesem Projekt dient als Beispiel für zukünftige Bauvorhaben mit ähnlichen Anforderungen.

4 Herausforderungen bei der Herstellung von Tragwerken

4.1 Klassischer Tragwerksentwurf

Das traditionelle Vorgehen in der Tragwerksplanung basiert auf bewährten Tragwerksmodellen, die im Laufe der letzten Jahrhunderte durch ihre Berechenbarkeit und analytischen Methoden entwickelt wurden. Aus einer Vielzahl von Tragwerkstypen wie Trägern, Fachwerken, Bögen, ebenen oder räumlichen Tragwerken wird ein geeignetes Modell ausgewählt. Dabei wird häufig eine zuvor festgelegte, mathematisch definierbare Geometrie in ein mechanisches Modell umgewandelt, dessen innere Belastungen mit einer vereinfachten Theorie berechnet werden [25]. Ein optimaler Tragwerksentwurf erfolgt auf konzeptioneller Ebene. Es steht hier die Berechnung im Rahmen der Konzeptphase im Hintergrund [26].

Der Aussichtsturm für die Landesgartenschau NRW in Hemer ist ein gutes Beispiel für dieses Vorgehens. Die Geometrie des Turms, ein Rotationsparaboloid aus entgegengesetzt geneigten Stäben, kann durch einfache mathematische Regeln erzeugt werden. Zur Bestimmung der inneren Kräfte des Turms wird ein einfaches Stabwerksmodell verwendet [25]. Der Bau ist 24 m hoch und besteht aus stählernen, runden Aussichtspodesten. Getragen wird er von 8/8 cm starken Holzprofilen, wobei diese durch Verdrehen stabilisiert werden. Nach oben ausfächernd bilden sie die Form eines Hyperboloids [27].

Dieses Beispiel (Abb. 25) veranschaulicht, wie die traditionelle Tragwerksplanung funktioniert: Eine mathematisch präzise Geometrie wird in ein mechanisches Modell umgewandelt und mit vereinfachten Theorien zur Berechnung der inneren Kräfte verwendet, um komplexe Strukturen zu entwerfen, die den geforderten Belastungen standhalten [25].

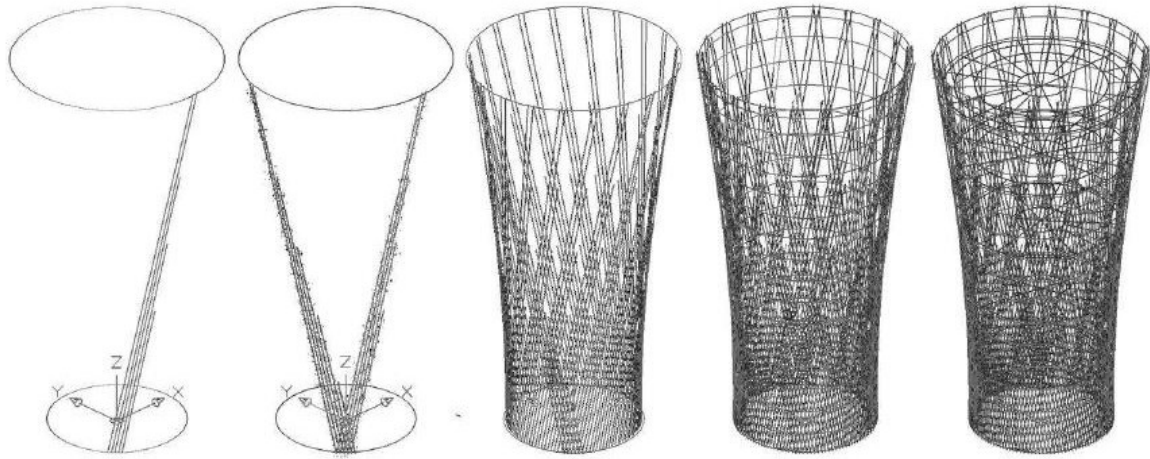


Abb. 25: Darstellung des geometrischen Konzepts des Jüberturms [25]

Durch das Schrägstellen von zwei gegenläufigen Stabebenen wird eine großmaschige Netzstruktur geschaffen. Die Kopplung dieser Ebenen mit horizontal angeordneten Stahlringen bewirkt die Entstehung einer statisch effizienten Dreiecksstruktur. Die Anzahl der Einzellamellen in den Stabpaketen nimmt entsprechend der statischen Beanspruchung von unten nach oben ab. Die Neuinterpretation und Weiterentwicklung dieser im Grunde alten Prinzipien sowie die gute und produktive Zusammenarbeit zwischen Architekten und Tragwerksplaner führen zu einer sowohl attraktiven als auch effizienten Struktur [25].

4.2 Parametrische Architektur bei Tragwerksentwürfen

4.2.1 Parametrische Planungskette bei Tragwerksentwürfen

Die digitale Modellierung, Analyse und Produktion ermöglichen nicht nur deutlich komplexere Geometrien, sondern auch die Wiederbelebung von hochgradig statisch unbestimmten, redundanten und überlagerten Tragwerksformen. Solche Systeme wurden teilweise schon vor der Zeit der nachvollziehbaren und berechenbaren Tragwerksanalyse angewendet, basierend allein auf den Erfahrungswerten des entsprechenden Handwerks.

Seit Mitte der 1990er Jahre spielen Gitternetzschalen eine bedeutende Rolle in der Architektur. Diese Entwicklung hat zu einer digitalen Prozesskette geführt, die es den verschiedenen Beteiligten in den Planungs- und Produktionsabläufen ermöglicht, effektiv zu kommunizieren. Ein zunehmend wichtiger Aspekt dieser Kette ist die

Programmierbarkeit jedes einzelnen Prozessschrittes. Dies ermöglicht die Behandlung von Strukturen mit einer großen Anzahl von Elementen und erleichtert eine iterative Lösungsfindung sowie Rückkopplungen zwischen den Beteiligten. [25]

Obwohl die zuvor genannten Beispiele eindeutig als Schalenstrukturen klassifiziert werden können, sind die trichterförmigen "Sun Valleys" des Expo Boulevards Teil eines komplexen Tragwerks, das mit einem etwa 1000 Meter langen und 80 Meter breiten Membrandach interagiert (Abb. 26). Diese Strukturen lassen sich weder eindeutig als Schalen noch als Trägerroste klassifizieren. Während in weiten Teilen eine Schalentragswirkung vorherrscht, werden an den Verbindungen zur Membran auch relativ große lokale Kräfte eingeleitet [25].



Abb. 26: Sun Valley – trichterförmige Tragstruktur [25]

Der Tragwerksplaner, der an der Schnittstelle zwischen dem entwerfenden Architekten und ausführenden Firmen arbeitet, hat die Möglichkeit, durch Parametrisierung und Programmierung neuer Werkzeuge auch Aufgaben zu übernehmen, die über sein klassisches Arbeitsfeld hinausgehen. Beispielsweise ist im genannten Projekt häufig die Unterstützung der Architekten bei der Entwicklung von Netzgeometrien für Gitterstrukturen erforderlich. In diesem Kontext können Verfahren wie die dynamische Relaxation eingesetzt werden, um geglättete Netzverläufe zwischen unterschiedlichen Randbedingungen und Fixpunkten zu interpolieren [25].

4.2.2 Geometrien in der parametrischen Architektur von Tragwerken

In den letzten Jahrzehnten haben Architekten wie Frank O. Gehry (Guggenheim Museum, Bilbao), Zaha Hadid (Hungerburgbahn, Innsbruck) und Massimiliano Fuksas (MyZeil, Frankfurt) Bauwerke mit skulpturalen Entwurfsansätzen geschaffen, deren komplexe Geometrien mit traditionellen zweidimensionalen Methoden kaum noch zu beschreiben sind [25].

Betrachtet man das Guggenheim Museum näher, so zeigt sich, dass es aus abgewinkelten Ebenen, gekippten Räumen sowie gebrochenen Geometrien besteht, welche charakteristisch für Gehrys dekonstruktivistische Bauweise sind. Weiters besteht das Gebäude aus Titan (Blech), Glas sowie Kalkstein. Konstruiert wurde das Museum mit architektonischen Computersimulationen. Mithilfe der Simulationssoftware Catia wurde die komplexe Bauweise vorausgeplant. So wurden die Umrisse des Modells in einem ersten Schritt mit einem speziellen Stift nachgezogen. Im Anschluss bestimmte der Computer die Form, welche für die Herstellung der Titan-Zink-Verkleidung nötig war und analysierte die tragende Stahlkonstruktion [28].

Aus diesen Gründen werden in der modernen Architektur zunehmend flexible und programmierbare 3D-Modellierungsprogramme wie Rhinoceros eingesetzt. Diese Software ermöglicht nicht nur die Modellierung freier NURBS-Flächen, sondern bietet auch zahlreiche geometrische Funktionen. Durch die Integration einer Programmiersprache können komplexe geometrische Konstruktionsabläufe automatisiert werden [25].

NURBS-Flächen (Non-Uniform Rational B-Splines) sind mathematische Repräsentationen, die eine breite Palette geometrischer Formen abbilden können – von einfachen zweidimensionalen Kreisen, Linien und Bögen bis hin zu komplexen dreidimensionalen Freiformflächen und Volumenkörpern [29]. Sie basieren auf Splines und Bézierkurven, was ihnen eine besonders hohe Gestaltungsflexibilität verleiht [30].

Nurbs-Modelle können aufgrund ihrer Genauigkeit und Flexibilität in jeder Form von Prozessen von Illustration aber auch Animation bis hin zur Fertigung angewandt werden.

Die Nurbs-Geometrie verfügt über vier relevante Merkmale, welche dazu führen, dass sie die optimale Lösung in Bezug auf eine computergestützte Modellierung darstellen:

1. Um Nurbs- Geometrien auszutauschen werden unterschiedliche branchenübliche Methoden verwendet. Aus diesem Grund ist es möglich, Geometriemodelle zwischen unterschiedlichen Animations-, Analyse-, Render- aber auch Modellierungsprogrammen zu verschieben.
2. Für Nurbs existiert eine genaue bekannte Definition. Somit wird an einer großen Anzahl von Universitäten die Mathematik und die Computerwissenschaft der Nurbs- Geometrie gelehrt. Dies bedeutet, dass etwa Ingenieure geschulte Programmierer finden können, welche ein Spezialwissen über die Nurbs- Geometrie vorweisen können.
3. Mittels Nurbs ist es möglich, dass geometrische Objekte, wie Kugeln, Kreise oder Ellipsen auch als Freiformgeometrien genau dargestellt werden
4. Information, die zur Nurbs- Darstellung einer Geometrie notwendig ist, ist wesentlich geringer als jene Information, welche für übliche facettierte Annäherungen notwendig ist [29].

Wie die folgende Abb. 27 zeigt, ließen sich mithilfe der parametrischen Programmierung die Fassadenelemente über die gesamte Fläche hinweg individuell anpassen, indem ihre Größe oder Neigung variierte. Dadurch konnten unterschiedliche Anforderungen, wie die Regulierung des solaren Energieeintrags oder die gewünschte ästhetische Wirkung, gezielt berücksichtigt werden. [25]

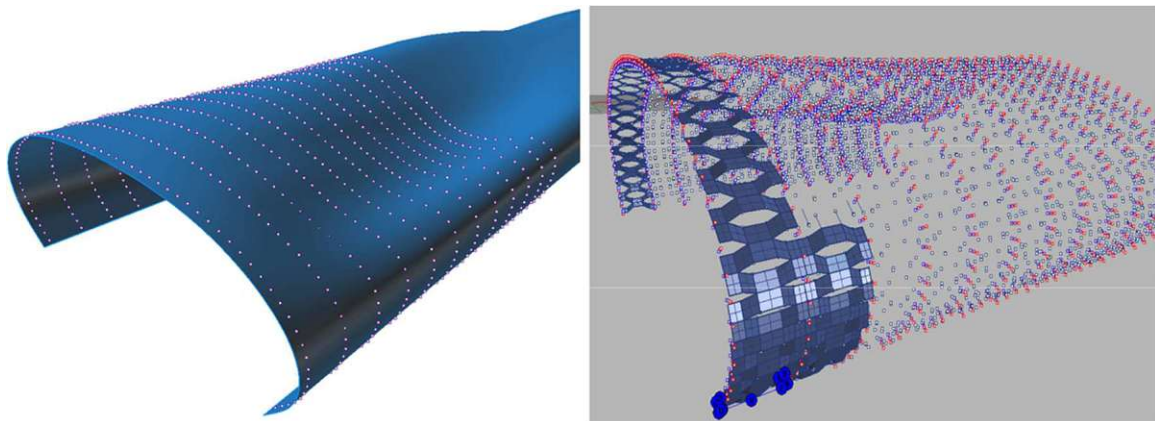


Abb. 27: Bao'an International Airport in Shenzhen - Generierung der Fassadengeometrie über Kontrollpunkte [25]

4.2.3 Formfindung

Der gegenwärtige Stand des parametrischen Entwerfens wird anschaulich durch Projekt wie den Flughafen in Shenzhen (Abb. 28) dargestellt. Bei diesen Projekten werden parametrische Werkzeuge genutzt, um die Geometrie mithilfe mathematischer Regeln zu entwickeln und zu beschreiben. Nachfolgend erfolgen die statischen Analysen und die Dimensionierung der Struktur parallel, wobei das Geometriemodell gegebenenfalls indirekt beeinflusst wird, was zu erforderlichen Anpassungen führen kann [25].



Abb. 28: Flughafen Shenzhen [31]

Der Shenzhen Airport wurde von dem Architekten Massiliano Fuksas entworfen. Der erste Entwurf entstand in Form von Tonmodellen, die später mit Rhino 3D digitalisiert wurden. Knippers Helbig übernahm die Diskretisierung der Oberflächen und setzte dies mithilfe speziell entwickelter parametrischer Software-Tools um. Die Öffnungen und Neigungswinkel der Glasscheiben wurden ebenso aufeinander abgestimmt wie der Tageslicht- und Energieeintrag. Die Entwicklung der Geometrie umfasste die Festlegung der Stahlkonstruktion sowie die Koordinaten aller Fassadenelemente der Außenhülle. Das Programm ermöglichte eine iterative Optimierung der Fassade in kurzen Zeitabständen, wodurch der Vorentwurf sowohl der Fassade als auch der Struktur innerhalb eines Jahres abgeschlossen werden konnte, inklusive der Übergabe

der Geometrie und der statischen sowie regeltechnischen Details des Rahmens und der Fassade. Die Projektplanung wurde dann vom BIAD-Büro in Peking übernommen.

Knippers Helbig entwickelte die tragenden Strukturen für den Stahlbeton der Ankunfts- und Abflugbereiche und war für die statische Analyse der Stahlstrukturen von Dach und Fassade verantwortlich. Die rautenförmige Struktur der Fassade erinnert an eine Wabenform und wird zusätzlich durch Querverstrebungen verstärkt. Die federbelasteten Lagerbolzen der Stahlkonstruktion sorgen für eine gleichmäßige Verteilung von Temperatur- und seismischen Lasten auf die Stützen, wodurch ein einheitliches Erscheinungsbild der bis zu 400 Meter langen Strukturelemente entsteht [32].

Eine wichtige Herausforderung für die Forschung und Entwicklung besteht darin, mechanische Formfindungsprinzipien in die automatisierte Prozesskette von Entwurf bis Produktion zu integrieren. Dies geschieht derzeit hauptsächlich bei den zugbeanspruchten Membrantragwerken [25].

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel hierfür ist ein Forschungspavillon, der 2010 von den Instituten für Computational Design (ICD) sowie für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE) an der Universität Stuttgart realisiert wurde [33]. Die gesamte Struktur dieses Pavillons beruht auf dem elastischen Biegeverhalten 6,5 mm dicker Birkensperrholzstreifen. Diese flachen Elemente wurden robotergesteuert gefertigt und anschließend zu miteinander verbundenen Zug-Druck-Bogensystemen zusammengesetzt. Die endgültige Torus-Form entstand durch die radiale Anordnung und Verbindung dieser eigenverspannten Bogensysteme (Abb. 29).



Abb. 29: Montage der Einzelementen des Forschungspavillons [33]

Eine der wesentlichen Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung dieses Pavillons war eine geschlossene Prozesskette von computergestütztem Entwurf über Bemessung bis zur Herstellung (CAD-CAM). Dies ermöglichte die problemlose Handhabung von 500 geometrisch unterschiedlichen Einzelementen. Die untrennbare Verbindung von Vorspannungszustand der gebogenen Streifen und deren Gesamtgeometrie machte es erforderlich, den Biegeprozess beim Aufbau in die Bemessung einzubeziehen. Dieser komplexe Prozess wurde durch iterative Anpassungen von Auflagerverschiebungen und Seilvorspannkräften in hunderten geometrisch nichtlinearen Rechenschritten simuliert, bis die Kontaktstellen der Streifen optimal zueinander passten. Nach der finalen Verbindung der Elemente mittels Kopplungselementen konnte das gesamte Tragsystem abschließend analysiert werden [25]. In der nachfolgenden Abb. 30 ist das fertige Tragwerk dargestellt.



Abb. 30: Fertiges Forschungspavillon, Universität Stuttgart [25]

In Bezug auf das Tragwerk kann festgestellt werden, dass dieses eine neuartige Form, nämlich jene des Strukturleichtbaus, zeigt. Diesem liegt ein neuer Ansatz in Bezug auf Materialeinsparungen in der Tragstruktur zugrunde. Es werden Biegespannungen aktiv eingesetzt und nicht vermieden, damit auch extrem dünnen Sperrholzstreifen die notwendige Steifigkeit verliehen werden kann. So ist es aufgrund dieser Biegevorspannung möglich, ein sehr steifes aber auch extrem leichtes Tragwerk zu erzeugen. Derartige Tragwerke werden als „Biege aktiv“ bezeichnet.

Es kann als ein Vorteil für ein derartiges biegeaktives Tragwerk gesehen werden, dass komplex gekrümmte Formen aus Ebenen oder einfachen geradlinigen Bauteilen erzeugt werden können. Geringe Bauteilstärken sind Voraussetzung für geringe Biegeradien bei ausreichender Resttragfähigkeit. Materialien, welche sich als geeignet für biegeaktive Tragwerke gezeigt haben, müssen eine hohe Bruchdehnung aufweisen. Besonders gut ist dies bei Faserverbundwerkstoffen und Holz gegeben [33].

4.3 Analyse der Tragwerkskomplexität in der parametrischen Architektur

Die parametrische Architektur als Gestaltungsansatz ermöglicht es Architekten und Ingenieuren, komplexe Formen zu erforschen und zu realisieren, die mit traditionellen Methoden nur schwer umsetzbar wären. Dieser Abschnitt der Arbeit analysiert die Komplexität tragender Konstruktionen, die aus solchen architektonischen Lösungen resultieren, und berücksichtigt dabei Aspekte der Planung, Berechnung und praktischen Umsetzbarkeit.

Im Folgenden werden die wesentlichen Merkmale der tragenden Konstruktionen in der parametrischen Architektur behandelt.

4.3.1 Geometrische Komplexität

Die moderne Architektur nutzt zunehmend freie Formen, deren Umsetzung erhebliche Herausforderungen in der Tragwerksplanung mit sich bringt. Die korrekte Dimensionierung und Optimierung tragender Systeme erfordert eine enge Verbindung von Geometrie, Statik und numerischer Optimierung. Der Einsatz parametrischer Modellierung und spezialisierter Softwaretools spielt hierbei eine entscheidende Rolle.

Eine interessante Konstruktionsweise sind „Nexorades“ oder „reziproke Tragwerke“. Das sind Tragstrukturen, bei denen sich die einzelnen Elemente gegenseitig stützen und dadurch eine effiziente Lastübertragung ermöglichen. Siehe Abb. 31. Diese Bauweise führt zu vereinfachten Anschlussknoten und optimierter Materialverteilung, hat sich jedoch in der Praxis bisher nur begrenzt durchgesetzt. Die präzise Formfindung dieser Strukturen ist essenziell, um ihre Stabilität und Wirtschaftlichkeit sicherzustellen [34].



Abb. 31: Anschluss in einer Nexorade-Struktur [34]

Die Realisierung tragender Systeme für Freiformarchitektur erfordert die Berücksichtigung mehrerer zentraler Herausforderungen:

- Zersetzung komplexer Formen in baubare Elemente: Tragende Strukturen müssen sich in planbare, wirtschaftlich herstellbare Einheiten zerlegen lassen. Häufig wird hierfür eine Rationalisierung der Freiformflächen durch diskrete Gitterstrukturen vorgenommen.
- Geometrische Optimierung für Fertigung und Stabilität: Während polygonale Tragwerksstrukturen stabil sind, führen nicht-planare Knoten oft zu unerwünschten Verdrehungen an den Verbindungsstellen, die besondere Konstruktionsmaßnahmen erfordern.
- Material- und Kostenoptimierung: Die Wahl der Segmentierung und der Verbindungselemente beeinflusst nicht nur die Stabilität, sondern auch die Wirtschaftlichkeit [35].

Die zuvor beschriebenen Herausforderungen bei der Dimensionierung und Optimierung tragender Systeme verdeutlichen die Notwendigkeit innovativer Ansätze und technischer Lösungen. In der Praxis wurden bereits verschiedene Methoden

erprobt, um komplexe Freiformstrukturen effizient zu realisieren. Die nachfolgenden Fallstudien illustrieren, wie theoretische Konzepte erfolgreich in realen Bauprojekten umgesetzt wurden.

Der äußere Tragwerksmantel des Yas Marina Hotels in Abu Dhabi basiert auf einer hochpräzisen quadratischen Gitternetzstruktur, die gezielt als torsionsfreie Unterstützungsstruktur optimiert wurde. Dies wurde durch die Verwendung von ebenen Vierecken erreicht, wodurch Verdrehungen an den Verbindungsknoten signifikant reduziert wurden. Diese Optimierung führte zu einer erheblichen Vereinfachung der Fertigungs- und Montageprozesse, da komplexe Verbindungsdetails minimiert und standardisierte Bauelemente eingesetzt werden konnten. Darüber hinaus ermöglichte die Struktur eine effiziente Lastverteilung und erhöhte die Gesamtstabilität des Tragwerks. Die innovative Geometrie trägt zur visuellen Leichtigkeit des Gebäudes bei, während gleichzeitig hohe strukturelle Integrität gewährleistet wird [35]. In der Abb. 32 ist dieses Konzept ersichtlich.

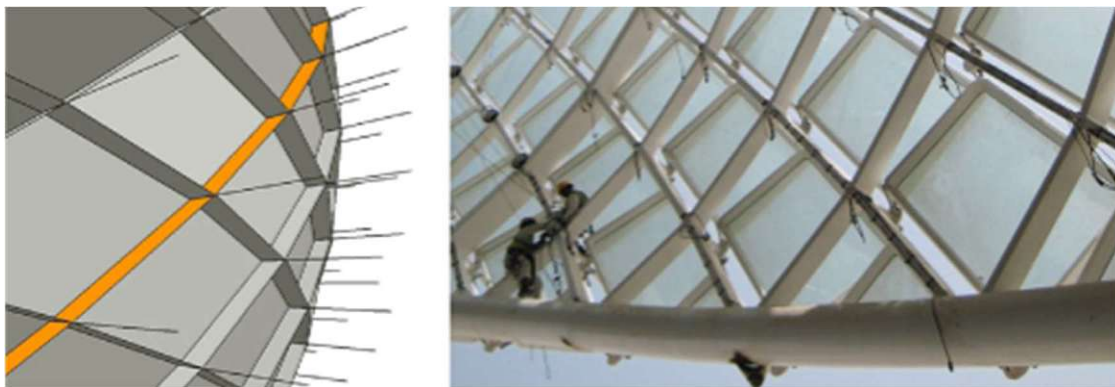


Abb. 32: Yas Marina Hotel – Knotenachsen und hervorgehobener Streifen aus ebenen Vierecken (links), Montagezustand (rechts) [35]

Ein weiteres Beispiel ist die Tragstruktur der Eiffelturmpavillons, die auf einer semidiskreten Unterstützung basiert. Durch den Einsatz innovativer Fertigungstechniken wurden Tragwerke realisiert, deren Trägerflanken gezielt so ausgelegt wurden, dass eine effiziente Herstellung durch Biegung ermöglicht wurde. Dabei wurde ein System aus konischen und zylindrischen Elementen verwendet, um eine optimale Anpassung an die statischen Anforderungen zu gewährleisten. Zusätzlich wurde durch den Einsatz parametrischer Modellierung eine effiziente Materialverteilung realisiert, wodurch sowohl strukturelle Effizienz als auch

gestalterische Freiheit erreicht wurden. Dieses Prinzip ermöglichte eine signifikante Reduktion der Herstellungs- und Montagekosten, während gleichzeitig die architektonische Ästhetik gewahrt blieb [35]. Die nächste Abb. 33 zeigt ein Tragwerksteil im Montagezustand.



Abb. 33: Montage von Eiffelturmpavillons [35]

Die zunehmende Anwendung von modularen Tragwerken in Projekten wie den Eiffelturmpavillons zeigt, dass innovative Tragstrukturen erfolgreich in der Praxis umgesetzt werden können. Neben diesen etablierten Ansätzen gewinnen Nexorades, also reziproke Tragwerke, an Bedeutung, insbesondere in Forschungs- und Entwicklungsprojekten, wo neue Tragwerkskonzepte erprobt werden.

Nexorades werden zunehmend in innovativen Baukonzepten eingesetzt, darunter temporäre Installationen wie das „KREOD – Pavillon“ oder das „Mount Rokko - Shidare Observatory“, wie es in der Abb. 34 zu sehen ist. Diese Strukturen profitieren von einer effizienten Materialnutzung und sind besonders anpassungsfähig an doppelt gekrümmte Flächen. Der Einsatz parametrischer Optimierungsmethoden, wie sie in [34] beschrieben sind, ermöglicht eine präzise Steuerung der Anschlussgeometrie und Tragwerksanordnung, wodurch eine hohe strukturelle Effizienz bei minimalem Materialeinsatz erreicht wird. Dies trägt erheblich zur Nachhaltigkeit solcher Konstruktionen bei, insbesondere in flexiblen und adaptiven architektonischen Kontexten [34].



Abb. 34: Kreod-Pavillon links und Rokko-Shidare Observatory rechts

Parametrische Ansätze tragen erheblich zur Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Bauwerken bei:

- Minimierung des Materialverbrauchs durch gezielte geometrische Optimierung, z. B. durch die Verwendung von möglichst vielen wiederholbaren Panelformen.
- Energieeffizienz durch Formfindung: Beispielsweise können parametrisch generierte Strukturen die Nutzung von Tageslicht optimieren oder die Windlast reduzieren.
- Fertigungsfreundliche Designs durch den gezielten Einsatz von repetitiven oder entwickelbaren Strukturen [34].

Die Kombination aus diskreter Differentialgeometrie, numerischer Optimierung und parametrischer Modellierung ermöglicht es, parametrische Architektur effizient und wirtschaftlich umzusetzen. Insbesondere die Einbindung von Nexorades und hybriden Tragwerkslösungen bietet ein vielversprechendes Potenzial für nachhaltige und wirtschaftliche Bauprojekte.

4.4 Komplexität der Herstellung und Montage von Verbindungen

4.4.1 Stahlbau

Mit der fortschreitenden Digitalisierung in der Architektur und im Bauwesen eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Entwicklung innovativer Stahlverbindungen.

4. Herausforderungen

Insbesondere parametrische Entwurfsprozesse und digitale Fertigungstechniken ermöglichen die Realisierung komplexer Geometrien, die mit traditionellen Verbindungsmethoden schwer umsetzbar wären. In diesem Kapitel werden verschiedene Aspekte parametrischer Stahlverbindungen behandelt, darunter digitale Planung und Fertigung, Herausforderungen in der Montage sowie innovative Steckverbindungskonzepte.

Die Integration digitaler Werkzeuge in den Planungsprozess hat die Gestaltung und Herstellung von Stahlkonstruktionen erheblich verändert. Parametrische Modellierung erlaubt eine iterative und flexible Anpassung von Geometrien, die sich nahtlos in computergestützte Fertigungsprozesse integrieren lassen.

Parametrische Architektur basiert auf algorithmischen Modellen, die geometrische Variationen effizient steuern. In diesem Kontext spielen formschlüssige Verbindungen eine zentrale Rolle, da sie die Montage komplexer Freiformstrukturen erleichtern. Zum Beispiel Zahn-Steckverbindungen wurden ursprünglich für die Holzkonstruktionen entwickelt und ermöglichen eine präzise Fertigung sowie eine einfache Montage ohne zusätzliche Schablonen oder Werkzeuge [36].

Im Projekt Hyundai Motorstudio Goyang (Abb. 35) kam eine vollständig parametrische Tragwerksplanung zum Einsatz, die mit Softwaretools Grasshopper und Karamba3D umgesetzt wurde. Diese Programme ermöglichten eine Echtzeit-Berechnung der Tragwerksgeometrie und eine automatisierte Optimierung der Bauteilquerschnitte. Für die Kontrolle des statischen Modells, normgerechte Nachweisführung und Protokollierung wurde das Dlubal Programmpaket verwendet [37].



Abb. 35: Fertiges Gebäude Hyundai Motorstudio [37]

4. Herausforderungen

Das Tragwerk bestand aus mehreren Stahlbetonkernen und darauf lagerndem, räumlichem Stahlbaufachwerk, das in einem iterativen, parametrischen Planungsprozess entwickelt wurde. Dabei spielten verschiedene Faktoren eine Rolle, wie Raumeinteilung, Lastverteilungen, Materialeinsparungen und Montagetauglichkeit. Als zusätzliche vertikale Unterstützung des Fachwerks wurden die Stützencluster optimiert, die als schlanke Stahlstützen angeordnet wurden. [37]. Die graphische Darstellung des Tragwerks ist in der Abb. 36 ersichtlich.

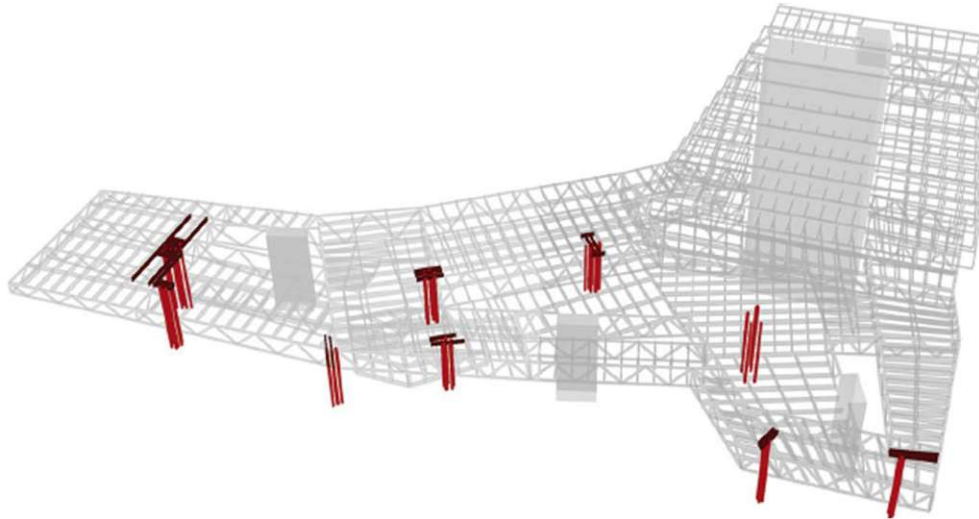


Abb. 36: Hyundai Motorstudio-Tragwerksmodell bestehend aus Betonkernen, Stahlfachwerk und Stützencluster [37]

Im "Shaped Sky"-Bereich wurden parametrische Algorithmen genutzt, um die Stützenpositionen und Tragwerksquerschnitte zu optimieren. Die Stützencluster wurden so angeordnet, dass sie den Eindruck eines Bambuswaldes erwecken, was sowohl statische als auch gestalterische Vorteile gab. Die Berechnung der optimalen Stützenverteilung erfolgte mit der Software Karamba3D, wodurch verschiedene Varianten in kurzer Zeit getestet und hinsichtlich Verformungen und Materialaufwand bewertet werden konnten [37].

Die Stahlkonstruktion wurde so geplant, dass größere Elemente vor Ort zusammengeschweißt und anschließend in der entsprechenden Höhe verschraubt werden konnten. Die Auflager bestehen aus großen Rahmen, die auf die Stahlbetonkerne aufgesetzt und mit Ankerstangen biegesteif verbunden sind. Bei den Stützenclustern sind durch echte Gelenke an Fuß und Kopf jeder Stütze die Randbedingungen so optimiert, dass eine hohe Auslastung möglich ist. Eine individuell

dimensionierte Auflagerkrone sorgt dafür, dass die Lasten gleichmäßiger auf die Stützen verteilt werden (Abb. 37) [37].



Abb. 37: Auflagerrahmen rechts, Stützencluster links [37]

Durch die parametrische Modellierung konnten Kollisionen von Tragelementen frühzeitig erkannt und behoben werden, wodurch sich die Planungs- und Bauzeit erheblich verkürzte.

Die Anwendung von Zahn-Steckverbindungen im Projekt Stahl-ETFE Gitterschale Mitoseum Bautzen (Abb. 38) eröffnet neue Möglichkeiten für die Verbindung komplexer Knotengeometrien. Durch den Einsatz lasergeschnittener Bleche mit individuell gestalteten Zahnungsmustern können dreidimensionale Strukturen aus zweidimensionalen Elementen zusammengesetzt werden. Die präzise Verzahnung der Elemente sorgt für eine formschlüssige Kraftübertragung und gewährleistet eine hohe Stabilität. Es stellt ein Beispiel für ein formschlüssiges Fügeprinzip dar. Es lässt sich ideal in einen Workflow aufwendiger Stahlbauten einfügen. Im Folgenden wird die Anwendung dieser Fügetechnik mittels Generierung eines digitalen Stahlknotens vorgestellt [36].



Abb. 38: Gitterschale Mitoseum Bautzen [36]

Die digitale Zahn-Steckverbindung vereinfacht komplexe Knotengeometrien, indem sie diese in ebene Bleche zerlegt, die durch Verzahnung verbunden werden. Die Bleche werden mit Laser zugeschnitten und mit Positionsnummern und Markierungen für Fertigung und Montage versehen. Ein zentraler Entwurfparameter ist die korrekte Definition der Toleranzen, die durch Strukturmodell-Grenzwerte und Fertigungstoleranzen bestimmt werden. Dafür wurden Knotenbleche in mehrfacher Ausführung geprüft und entsprechend ihrer Auslastung in Gruppen mit unterschiedlichen Blechdicken eingeteilt. Die höchstbelasteten Knoten jeder Gruppe wurden einer detaillierten FEM-Analyse unterzogen, siehe Abb. 39. Die Detailbemessung erfolgte mit Volumenelementen und nichtlinearer Kontaktdefinition in „Ansys“, einem FEM-Programm für die Tragwerksanalyse. Dabei wurden Knotenbleche mit reduzierter Konturkomplexität parametrisch zusammengesetzt und analysiert [36].

4. Herausforderungen

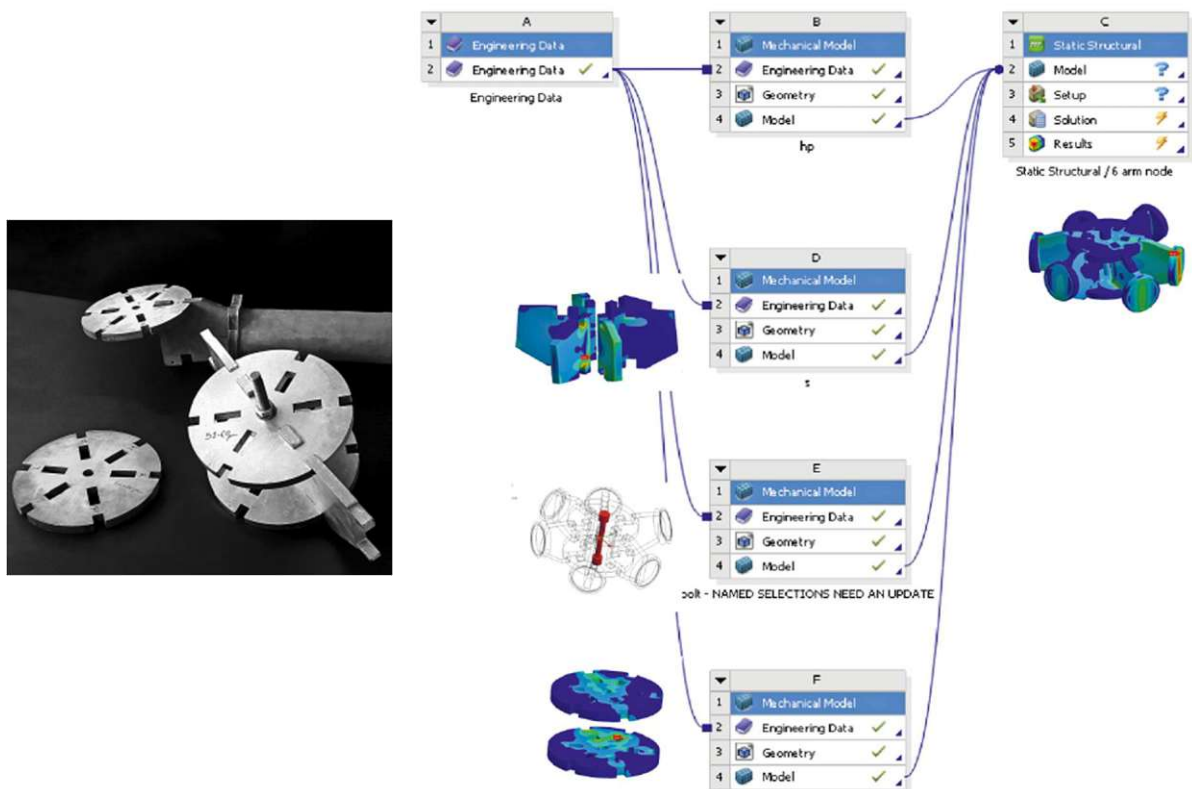


Abb. 39: Probebleche für die Definition der Zahntoleranzen links und parametrische Definition des Knotens mit einer FEM-Software [36]

Durch die Integration digitaler Planungs- und Fertigungsprozesse lassen sich komplexe Strukturen mit hoher Präzision realisieren. Dennoch bleibt die Montage eine Herausforderung, die eine optimierte Toleranzdefinition und eine präzise Fertigungssteuerung erfordert.

4.4.2 Betonbau

Eines der beliebtesten Baumaterialien, Beton, findet auch Anwendung bei der Herstellung der Bauwerke der Freiformarchitektur. In der Geschichte der Verwendung des Betons als Baustoffs zeichnen sich verschiedene Architekturbeispiele aus. Schon in der Römerzeit war der Baustoff bekannt. Eines der bedeutendsten Beispiele für die erfolgreiche Verwendung von Beton aus dieser Zeit stellt das Pantheon dar. Seine perfekt gekrümmte Kuppel kann als einer der ersten Vorläufer der modernen Architektur überhaupt angesehen werden. Es hat mehrere Jahrhunderte gedauert bis er heute wieder als bekannter Stahlbeton entdeckt wurde. Erste Beispiele wie der Einsteinturm in Potsdam, das Goetheanum von Rudolf Steiner oder das Guggenheim

4. Herausforderungen

Museum in New York (Abb. 40) ebneten anfangs den Weg zur modernen parametrischen Architektur.



Abb. 40: links Einsteinturm in Potsdam, Mitte Goetheanum von Rudolf Steiner, rechts Guggenheim New York

Im Folgenden werden die größten planerischen und ausführungstechnischen Herausforderungen anhand entsprechender Fallbeispiele aufgezeigt.

Im ersten Beispiel von Museum Marta Herford (Frank O. Gehry & Associates) (Abb. 41) mit doppelt gekrümmten Flächen werden die Aspekte der Planung und Ausführung betrachtet.

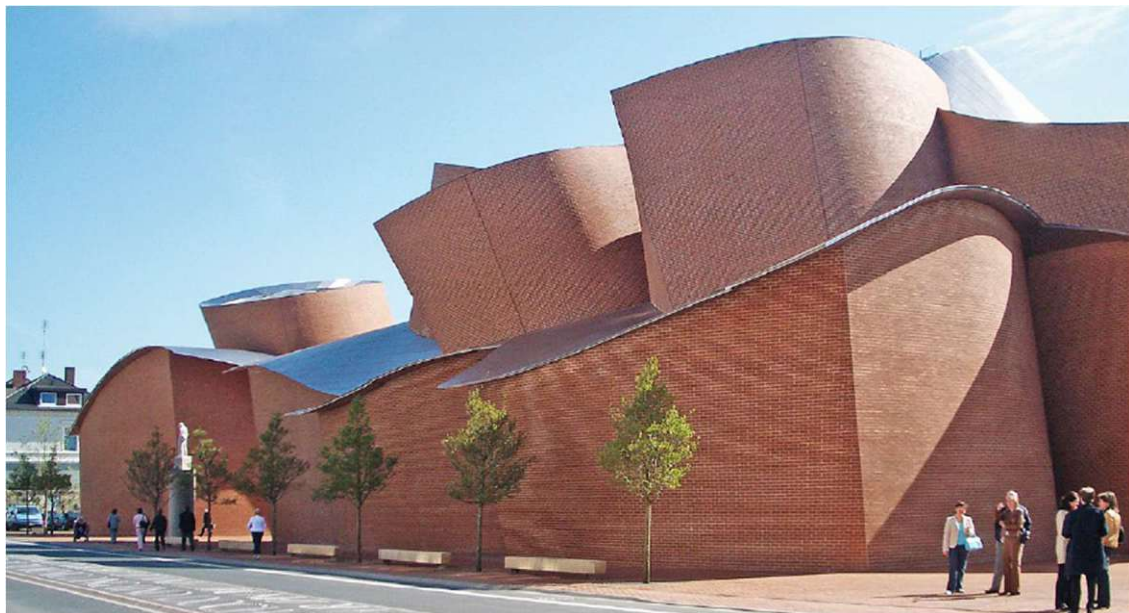


Abb. 41: Museum Marta Herford, Deutschland [38]

Die inneren und äußeren Flächen des architektonischen Entwurfs wurden mit einem Roboter-Punktescanner digitalisiert. Der so erfasste Zwischenraum stellte eine

4. Herausforderungen

Herausforderung für die Tragwerksplaner dar, deren Aufgabe es war, ein passendes Tragwerk darin zu integrieren. Eine zusätzliche Schwierigkeit war die Verkleidung der Außenwandflächen mit Klinker. Um alle bautechnischen Anforderungen der Fassade zu erfüllen, mussten die Grundflächen eine exakte Geometrie aufweisen. Um dies zu erreichen, wurde ein spezielles Schalungskonzept festgelegt. Die Außenflächen wurden in 2,5 m x 2,5 m große Abschnitte mit spezifisch entwickelten Schalungselementen eingeteilt. Die Schalungskörper hatten eine doppelt gekrümmte, geneigte Vorderseite, die der Außenwandfläche entsprach, während die ebene Rückseite die Befestigung von Rüstungsträgern ermöglichte. Sie wurden aus horizontalen Holzplatten gefertigt, deren Vorderseite exakt den horizontalen Schnitten der Betongeometrie entsprach. Vertikale Latten wurden darauf genagelt und abschließend mit einer Betonplanplatte als Schalungshaut versehen [38]. Die Montage der Schalung und der fertige Stahlbetonrohbau ist in Abb. 42 ersichtlich.



Abb. 42: Rechts: Schalung, Links: Stahlbetonrohbau [38]

Die Zusammenarbeit von Architekten und Bauingenieuren, die durch Herausforderungen bei der Tragwerksplanung und der Entwicklung eines hybriden Tragwerksystems geprägt war, wird im Folgenden am Beispiel des Rolex Learning Centers aufgezeigt. Besondere Aufmerksamkeit liegt hierbei auf der Herstellung komplexes Schalungs- und Bewehrungssystems.

Die komplexe Außengestaltung des Rolex Learning Centers wurde mit Hilfe moderner Computerprogramme in einem iterativen Prozess gemeinsam von Architekten und Tragwerksplanern entwickelt. Wie in Abb. 43 ersichtlich, umfasst der architektonische Entwurf eines eingeschossigen Pavillons eine Gesamtfläche von 121,5 m × 162,5 m.

Die Struktur zeichnet sich durch zwei vom Boden abgehobene Bereiche aus, die Spannweiten von 40 m bzw. 80 m überbrücken [38].



Abb. 43: Rolex Learning Center, Lausanne [38]

Bereits in der Entwurfsphase wurde die Machbarkeit der extrem flachen Betonschalen infrage gestellt. Aufgrund der freien Schalenform und der damit verbundenen hohen Biegebeanspruchungen war die langfristige Stabilität des Tragwerks eine zentrale Herausforderung. Grundsätzlich besteht die Kunst des Schalenbaus darin, eine ideale geometrische Form zu finden, die hauptsächlich Membrandruckspannungen aufnimmt und Biegemomente vermeidet. Aufgrund der fehlenden zweisinnigen Krümmung und der großen exzentrischen Öffnungen konnte dieses Prinzip jedoch nicht konsequent angewendet werden. Das Tragwerk konnte daher nicht als reine Schalenkonstruktion konzipiert werden, da neben dem Eigengewicht auch variable Nutzlasten aufgenommen werden mussten [38].

In Zusammenarbeit mit den Ingenieuren von Walther Mory Maier wurde eine statisch und konstruktiv tragfähige Lösung für die architektonische Form entwickelt. Die Grundidee des Tragwerksentwurfs sah ein hybrides Tragsystem vor, das aus einer biegebeanspruchten Betonschale mit einer Dicke von 60 cm und verstärkenden Bögen mit einer Gesamtdicke von 80 cm bestand. Diese Verstärkungen in den Hauptrichtungen des Lastabtrags ermöglichten die Aufnahme sowohl der großen Normalkräfte als auch der aus der Geometrie resultierenden Biegemomente. Eine besondere Herausforderung stellten die großen Horizontalreaktionen der flachen Bögen dar. Diese wurden durch Spannglieder in der Decke über der eingeschossigen Tiefgarage aufgenommen. Die flachen Bögen waren bisher in dieser Form nicht realisiert worden, wodurch intensive Entwicklungsarbeit notwendig war. Schon geringe

Abweichungen von der idealen Form führten zu erheblichen Biegemomenten und zusätzlichen Verformungen höherer Ordnung, die die Knickstabilität (Beulen) gefährden konnten [38].

Neben der Knickstabilität mussten auch die langfristigen Verformungen minimiert werden, insbesondere jene infolge von Schwinden, Kriechen und Temperaturänderungen. Jede Längenverkürzung der flachen Bögen hätte zu einer verstärkten Einsenkung der Bogenscheitel geführt, was für die filigranen gekrümmten Glasfassaden kritisch gewesen wäre. Um die Langzeitverformungen so weit wie möglich zu reduzieren, wurde in den Hauptbögen ein hoher Bewehrungsgehalt von bis zu 470 kg Stahl pro m³ Beton gewählt, siehe Abb. 44. Die Bewehrungsstäbe hatten einen Durchmesser von 50 mm, um trotz der hohen Bewehrungsdichte genügend Platz für das Einbringen des Betons zu lassen. Da herkömmliche Übergreifungsstöße für diese bis zu 83 m langen Bewehrungsstäbe nicht umsetzbar waren, wurde eine Stumpfschweißung mittels Manschettenverbindungen gewählt. Diese gewährleistete eine volle Druckübertragung und eine 50-prozentige Zugübertragung bei vertretbarem Herstellungsaufwand [38].



Abb. 44: Verlegung der Bewehrung der großen Schale [38]

Sowohl die statische Berechnung als auch die Ausführungsplanung stellten erhebliche Herausforderungen dar. Insbesondere musste die komplexe dreidimensionale Geometrie so abgebildet werden, dass sie auf der Baustelle präzise umgesetzt werden konnte. Um die Geometrie zu beherrschen, wurde zusätzlich zum architektonischen

Modell ein strukturelles Geometriemodell erstellt, das Betonschalen, Stahldach und die Überhöhung der Schalen berücksichtigte. Dieses Modell wurde fortlaufend angepasst und diente als Basis für die Schalungs- und Bewehrungsplanung [38].

Da traditionelle Leistungsbeschreibungen bei einem ungewöhnlichen Projekt wie dem Rolex Learning Center an ihre Grenzen stießen, wurden viele Informationen automatisiert aus den 3D-Modellen der Schalen extrahiert und in eine geeignete Darstellungsform überführt. Schalpläne wurden in einem 50 cm × 50 cm Raster erstellt, um die Geometrie exakt abzubilden. Weitere Pläne enthielten alle für die Vermessung erforderlichen Angaben. Die Schalung bestand aus modularen 2,5 m × 2,5 m großen Schaltischen, die aus einer Holzunterkonstruktion, Holzspanten und einer laminierten Faserholzplatte als Schalhaut zusammengesetzt waren. Die Form der CNC-gefrästen Spanten definierte die Geometrie der Schalen. Die Werkstattplanung ermöglichte eine automatisierte Erstellung der erforderlichen Informationen für den computergestützten Zuschnitt der Spanten. Vor Ort mussten lediglich die Lage und Höhe der Gerüste vermessen werden [38].

Das Betonieren erfolgte für beide Schalen ohne Unterbrechung. Während die kleine Schale in zehn Stunden gegossen wurde, dauerte das Betonieren der großen Schale 55 Stunden. In der nachfolgenden Abb. 45 sind die Betonschalen nach dem Herstellen dargestellt.



Abb. 45: Betonschalen [38]

Die Anwendung von Beton in der Freiformarchitektur hat in den vergangenen Jahrzehnten bemerkenswerte Fortschritte gemacht. Anhand der Fallstudien des Museum Marta Herford und des Rolex Learning Centers wird deutlich, dass die

erfolgreiche Umsetzung solcher Bauwerke eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Architekten, Tragwerksplanern und Bauausführenden erfordert.

Besonders die Herausforderungen im Bereich der Tragwerksplanung, der Schalungs- und Bewehrungssysteme sowie der bautechnischen Umsetzung zeigen, dass Freiformarchitektur nicht nur gestalterische, sondern auch erhebliche strukturelle und logistische Anforderungen mit sich bringt. Während beim Museum Marta Herford innovative Schalungskonzepte für die Verkleidung der doppelt gekrümmten Flächen entwickelt wurden, erforderte das Rolex Learning Center ein hybrides Tragsystem, um die komplexen Lastabtragsmechanismen zu bewältigen. Hier zeigte sich, dass moderne Planungsmethoden, insbesondere digitale 3D-Modelle und CNC-gesteuerte Fertigungstechniken, entscheidend zur Präzision und Machbarkeit solcher Bauwerke beitragen.

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass Beton als Baumaterial weiterhin großes Potenzial für die Umsetzung freigeformter Architektur besitzt. Durch die Weiterentwicklung computergestützter Planungs- und Fertigungsmethoden können zukünftig noch komplexere Strukturen effizient realisiert werden. Gleichzeitig erfordert die Gestaltung solcher Bauwerke eine fortlaufende Innovation sowohl in der Materialtechnologie als auch in der Bauverfahrenstechnik, um die Herausforderungen hinsichtlich Statik, Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit zu bewältigen.

4.4.2 Holzbau

Der Metropol Parasol in Sevilla ist ein architektonisch einzigartiges Bauwerk, das aufgrund seiner komplexen hybriden Konstruktion aus Holz, Stahl und Beton erhebliche Herausforderungen in der digitalen Planung und Ausführung mit sich brachte. (Abb. 46) Die Konstruktion, bestehend aus einer freigeformten Holzstruktur mit mehr als 3.400 Einzelteilen aus Furnierschichtholz (LVL), erforderte innovative digitale Entwurfs-, Berechnungs- und Fertigungsmethoden, um die baulichen Anforderungen zu erfüllen [39] [40].



Abb. 46: Metropol Parasol Sevilla [39]

Eines der zentralen Problemen in der Planungsphase war die Materialwahl. Während die erste Entwurfsidee eine Stahlstruktur vorsah, führte die iterative Planung zur Entscheidung für eine tragende Holzkonstruktion mit einer speziellen Polyurethan-Beschichtung zum Witterungsschutz [40].

Die endgültige Holzkonstruktion der Metropol-Parasols ist das Ergebnis eines langen Entwicklungsprozesses. Da das Planungsteam eine konsequente Verschmelzung von Tragwerk und Architektur anstrebte, wurden im Laufe mehrerer Entwurfsphasen verschiedene Varianten untersucht. Das Ergebnis war schließlich eine Gitternetz-Struktur aus Furnierschichtholzscheiben in einem 1,50 m × 1,50 m-Raster, sodass sich Architektur und Tragwerk nicht mehr voneinander unterscheiden. Ein Oberflächenmodell der Architekten diente als Grundlage für die Tragwerksgeometrie. Die einzelnen Scheibenansichten wurden durch den vertikalen Durchschnitt in einem orthogonalen Raster des Oberflächenmodells erstellt. Die entstandene Form wurde unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Holzbaus statisch optimiert, siehe Abb. 47.

Eine sicherheitsrelevante Anpassung wurde im 45 m gespannten Bereich zwischen den Stämmen P5 und P6 durchgeführt. Hier wurde das schwere Holzgitter in Feldmitte durch ein leichtes, jedoch aufwendigeres und teureres, mit Holz verkleidetes Stahlfachwerk ersetzt. Dies führte zu einer Reduzierung des Eigengewichts und einer

Entlastung der Fundamente, deren Lage durch archäologische Vorgaben eingeschränkt war [39].

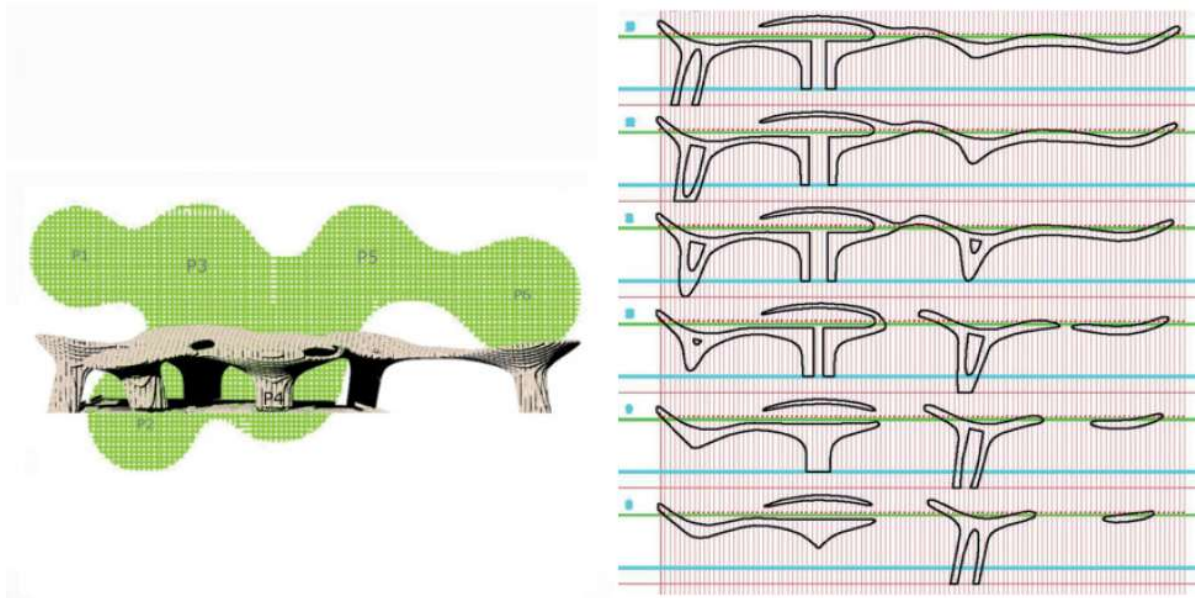


Abb. 47: Holztragwerk links und Schnittmuster der Furnierschichtholzplatte rechts [39]

Für die statische Modellierung kam ein räumliches, in Abb. 48 ersichtliches Finite-Elemente-Modell, zum Einsatz. Während der Schirmbereich mithilfe von Stabmodellen in der Mittelachse der Scheiben abgebildet wurde, mussten die Stämme aufwendig durch Schalenelemente dargestellt werden. Die Komplexität führte zu sehr großen Datenmengen, sodass das Berechnungsmodell nur noch mit den leistungsstärksten Rechnern behandelbar war.

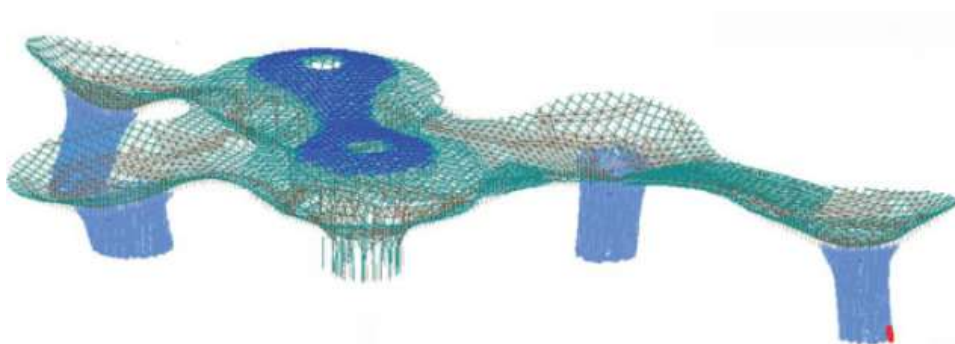


Abb. 48: FE-Modell der Schirm- und Stämmenkonstruktion [40]

Die Verbindungselemente wurden aufgrund der hohen Beanspruchungen gezielt optimiert, wodurch eine wesentliche Innovation die Verwendung eingeklebter Gewindestangen zur Kraftübertragung in Momentenanschlüssen war. Hierbei wurde

erstmal eine Temperung des Epoxidharzes durchgeführt, um die Temperaturbeständigkeit der Klebeverbindungen zu verbessern. Die Temperung des Epoxidharzes erfolgte in einer Trockenkammer bei einer Temperatur von 55°C über zwei Stunden. Diese Maßnahme erhöhte die Glasübergangstemperatur des Klebers auf über 80°C, wodurch eine dauerhafte Beständigkeit auch bei hohen Umgebungstemperaturen sichergestellt wurde. Zudem wurden umfassende Prüfverfahren angewendet, darunter zerstörende Zugversuche an Testkörpern sowie Messungen der Glasübergangstemperatur, um die Qualität der Verklebung zu gewährleisten [39].

Wie in Abb. 49 dargestellt, wurde nach aufwändigen Vergleichsberechnungen und Versuchen ein System entwickelt, das sowohl hohe Tragfähigkeit als auch ein geringes Eigengewicht aufweist. Für die Momentenanschlüsse wurden speziell entwickelte Knoten mit eingeklebten Gewindestangen verwendet, die eine besonders hohe Tragfähigkeit aufweisen.

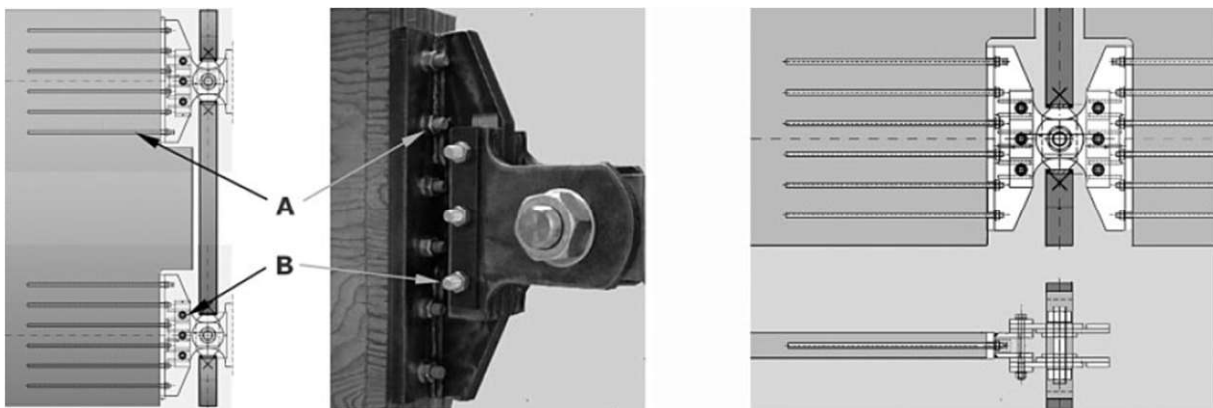


Abb. 49: Momentenanschluss: A) eingeklebte Gewindestangen und B) vorgespannte Schrauben [40]

Die Momenten- und Normalkraftverbindungen an den Elementober- und -unterseiten sind ausgestattet mit einer standardisierten drehbaren Gabelkopfverbindung. Diese sind in der Abb. 50 ersichtlich. Diese ermöglichte eine schnelle Montage vor Ort durch eine stahlbaummäßige Kopplung mittels Bolzen. Die Verbindungselemente wurden zudem mit Verzahnungen zur Justierung sowie hochfesten vorgespannten Schrauben versehen, um Fertigungstoleranzen auszugleichen.



Abb. 50: Verbindungen mit 450 verschiedenen Größen unterteilt in 15 Grundtypen [40]

Die Beanspruchungen im Schirmbereich wurden maßgeblich durch das Eigengewicht der Holzkonstruktion beeinflusst. Da die Abmessungen der Holzbauteile meist durch die Dimensionierung der Anschlussbereiche bestimmt wurden, war es besonders wichtig, leistungsfähige und leichte Anschlüsse zu entwickeln (Abb. 51). Die etwa 2.700 unterschiedlichen Verbindungen mussten für Momente von bis zu 1 MNm ausgelegt werden. Alle Verbindungen sind im Grundriss rechtwinklig, jedoch dreidimensional variabel. Um die Anzahl der individuellen Verbindungselemente zu minimieren, wurde ein modulares System entwickelt, das verschiedene Anschlusstypen kombinierbar machte.



Abb. 51: Verbindungen im Schirmbereich [40]

Wie es in Abb. 52 ersichtlich, wurden zusätzlich vier Stahlwinkel pro Knoten an die Holzscheiben genagelt, um eine Aufnahme der Querkräfte sowie einen aussteifenden Anschluss zu gewährleisten. [40].

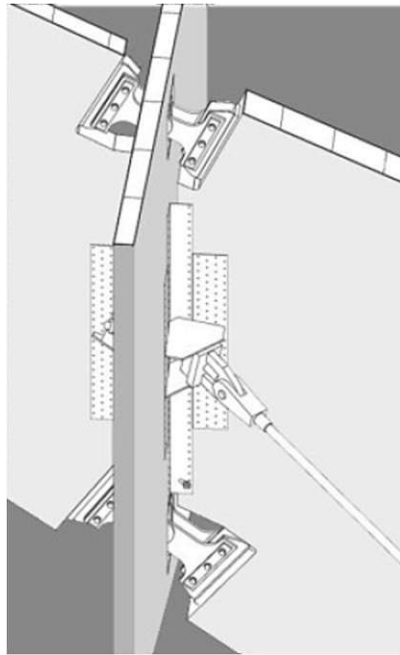


Abb. 52: Endgültige Anschlussgeometrie [40]

Eine der vielen Herausforderungen der Konstruktion war auch der Witterungsschutz des freistehenden Holztragwerks. Wie in der Abb. 53 ersichtlich ist, wurde zur Erhöhung der Langlebigkeit eine 2 bis 3 mm dicke Polyurethan-2K-Beschichtung aufgetragen, die in Kombination mit einem beigefarbenen Deckanstrich als Schutzschicht gegen Feuchtigkeit und UV-Strahlung dient. Diese Schicht verbessert nicht nur die Beständigkeit des Holzes, sondern reduziert auch die Kriechverformungen, wodurch langfristig eine höhere Tragfähigkeit sichergestellt wird.



Abb. 53: 2 bis 3 mm dicke PUR-Beschichtung links und beschichteter Stammteil rechts [40]

Die Vorfertigung der Holzelemente erfolgte unter präzisen CAD-gesteuerten Bedingungen. Die etwa 3.400 individuellen Bauteile wurden mittels einer

4. Herausforderungen

halbautomatisierten Makro-Programmierung konstruiert und im Verschnitt optimiert auf den Rohplatten angeordnet, siehe Abb. 54. Dabei wurden die Faserrichtungen der Decklagen gezielt berücksichtigt, um eine optimale Materialausnutzung zu gewährleisten.

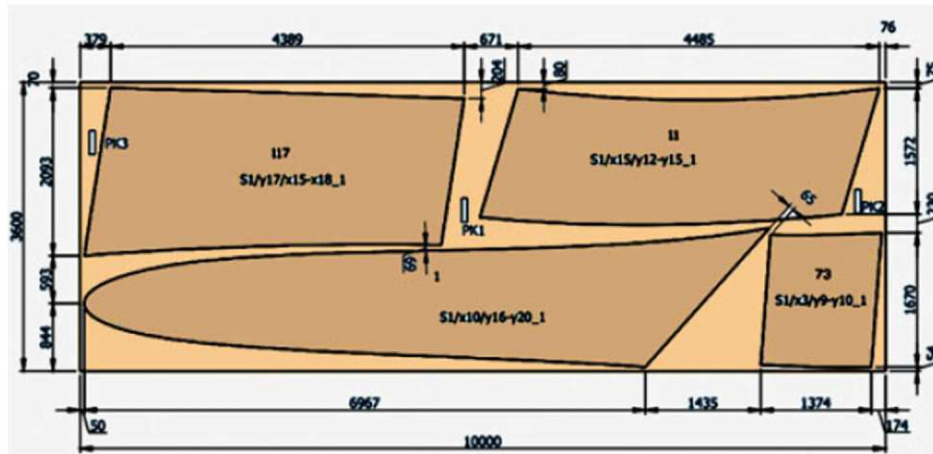


Abb. 54: Verschnittoptimierte Konfiguration der Bauteile [40]

Zur Fertigung kamen CNC-gesteuerte Roboter zum Einsatz, die die Bauteile millimetergenau aus den Rohplatten schnitten und gleichzeitig Fräsungen und Aussparungen für die Verbindungselemente einarbeiteten. Für die eingeklebten Gewindestangen wurden 35.000 Längsbohrungen mit einer Tiefe von 65 bis 70 cm hingegen manuell erzeugt. Die Anschlussstahlteile wurden nach dem Versetzen und Einkleben der Gewindestangen und anschließendem Tempervorgang montiert.

Die Elemente wurden mit ca. 100 Lkw-Ladungen nach Sevilla transportiert, davon etwa zwei Drittel als Sondertransporte aufgrund von Überbreiten. In einem Zwischenlager wurden die Bauteile mit einer 2 bis 3 mm dicken Polyurethan-Beschichtung versehen und anschließend zur Baustelle transportiert.

Die Montage vor Ort erfolgte unter beengten Bedingungen in der historischen Altstadt Sevillas. Um die Bautoleranzen von bis zu 10 mm und für die Verzahnung am Laschenanschluss der Momentenverbindung 7 mm sicherzustellen, wurde die Fugenbreite zwischen den Elementen von 30 mm gewählt.

Ein, in der Abb. 55 ersichtliches, speziell entwickeltes Gerüstsystem, bestehend aus Turmgerüsten mit einem Querschnitt von 70 × 70 cm für die Stämme sowie abgetreppten Raumflächengerüsten für die Schirmbereiche, erlaubte eine effiziente und sichere Montage der großformatigen Holzbauteile. Mit dieser Gerüststruktur

blieben alle Bereiche des Tragwerks auch nach der Montage für Kontroll- und Nachbeschichtungsarbeiten erreichbar.



Abb. 55: Abgetrepptes Gerüst links und Montage der Stämme rechts [40]

Ein zweischichtiges Montageteam von 50 Arbeiter konnte 50 Bauteile täglich verbauen und brauchten dafür ein Jahr netto [40].

Der Metropol Parasol demonstriert eindrucksvoll das Potenzial moderner Holzbauweisen in Kombination mit innovativen Fertigungs- und Verbindungstechniken. Durch die gezielte Optimierung der Materialeigenschaften, der Verbindungstechnologien und des Witterungsschutzes konnte eine langlebige und architektonisch anspruchsvolle Tragstruktur realisiert werden.

5 Innovative Fassadensysteme in parametrischen Bauwerken

Die modernen Fassaden- und Gebäudehüllenkonzepte greifen heute zunehmend auf parametrische Entwurfsmethoden zurück. Diese erlauben komplexe geometrische Formen, hohe energetische Effizienz sowie funktionale und ästhetische Flexibilität. Die Integration von digitalen Planungstools und moderner Fertigungstechniken stellt dabei eine wesentliche Voraussetzung dar, um individuelle Lösungen wirtschaftlich und technisch realisieren zu können.

5.1 Bedeutung von Fassadensystemen in der parametrischen Architektur

In der zeitgenössischen Architektur werden Fassadensysteme zunehmend mithilfe parametrischer Planungsmethoden entwickelt. Diese Methoden erlauben eine flexible, algorithmische Anpassung von Gestaltungsparametern und eröffnen Möglichkeiten, komplexe geometrische Anforderungen mit funktionalen Aspekten zu verknüpfen [41]. Parametrische Fassadensysteme werden dabei als wichtiger Bestandteil angesehen, um Gebäudehüllen gezielt auf standort- und nutzungsspezifische Einflüsse auszurichten.

Im Rahmen der parametrischen Entwurfsprozesse wird die Fassade nicht mehr als rein seriell Bauelement interpretiert, sondern als differenziert modulierbare Hülle. Die geometrische Variabilität kann zur Steigerung der Energieeffizienz beitragen, indem etwa durch veränderte Neigungswinkel und Facettierungen eine Verringerung der Kühllast erzielt wird [41]. Gleichzeitig wird eine höhere architektonische Ausdruckskraft erreicht, da gekrümmte, multifunktionale Oberflächen ohne große Zusatzaufwände integriert werden können [42].

Die Anwendung parametrischer Modelle beschränkt sich nicht nur auf geometrische Fragestellungen. Vielmehr können auch bauphysikalische Parameter, Fertigungsprozesse und Materialeigenschaften direkt in die Datensätze einfließen. Dies erleichtert die Optimierung mehrerer Zielgrößen (u. a. Energieeintrag, Tragverhalten, Kosten) und führt zu integrierten Planungsansätzen. Auf diese Weise wird der Grundidee der parametrischen Architektur entsprochen, welche auf einer

kontinuierlichen, datenbasierten Wechselwirkung zwischen Entwurf und Ausführung beruht [41].

In der Summe weisen Fassadensysteme in der parametrischen Architektur ein hohes Potenzial auf, komplexe Formgebung mit technischen Effizienzgewinnen zu vereinen. Es wird erwartet, dass zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich den Grad an Automatisierung weiter erhöhen und damit sowohl Gestaltungsspielräume als auch Funktionsintegration von Gebäudehüllen weiter ausbauen.

5.2 Beispiele für erfolgreiche Anwendungen von parametrischen Fassadensystemen

Zahlreiche Beispiele belegen die Relevanz solcher Entwicklungen. In einem Projekt zur „bio-inspirierten kinetischen Fassade“ (Abb. 56) wird mit großen elastischen Verformungen gearbeitet, um eine reaktive Gebäudehülle zu realisieren, die sich veränderten Wind- und Lichtverhältnissen anpasst [42]. Bei anderen Bauwerken, wie dem „Enzo-Ferrari-Museum“ in Modena oder dem „Heydar Aliyev Cultural Centre“ in Baku, kommen wiederum große Freiformflächen mit hochgradig individuellen Paneelen zum Einsatz, welche durch digitale Workflows konstruiert und montiert werden [43], [44].



Abb. 56: Kinetische Fassade „One Ocean“ [42]

5.2.1 Innovatives parametrisches Fassadensystem

Die zunehmende Ausführung frei geformter Gebäudehüllen sowie das Bestreben, Fassaden flächig in die dritte Dimension überzuführen, werden durch die Grenzen konventioneller Curtain-Wall-Systeme limitiert. Gleichzeitig wird seitens Bauherren eine identitätsstiftende Architektursprache gefordert, die üblicherweise durch die Gebäudehülle generiert wird [41].

Im Zuge des Forschungsprojekts „Parametric Concept“, das vom FAT LAB in Kooperation mit Schüco durchgeführt wurde, ist ein elementiertes Fassadensystem entstanden. Ein rechteckiger Metallrahmen bildet dabei die Basis; durch das Einführen eines oder mehrerer Hochpunkte wird jedes Element in individuelle Facetten aufgefaltet, wodurch eine zusätzliche statische Höhe erzeugt wird und die Steifigkeit des Systems gesteigert wird. Jedes Teilflächenfeld kann mit Verglasungen, opaken Paneelen oder Photovoltaikmodulen ausgefüllt werden. Die Möglichkeit den Einzelrahmen in Form von Rauten oder Dreiecke auszuführen, bietet eine breite Auswahl an verschiedenen Geometrievarianten. In der nächsten Abb. 57 sind zwei Exponate dargestellt.



Abb. 57: Ausgestellte Exponate, Parametrisches Fassadensystem, BAU 2013 [41]

Die Einschränkungen in der Ausführung ergeben sich durch statische Erfordernisse und ausführungstechnisch bedingt, einzuhaltende Minimalwinkel zwischen Stäben. Durch die parametrische Beschreibung des Systems wird das algorithmische Verschieben der Hochpunkte in Abhängigkeit von standort- und nutzungsspezifischen Daten ermöglicht. Auf diese Weise kann ein globaler Gradientenverlauf definiert

werden, der jedes Element individuell deformiert und dadurch einen fließenden Gesamteindruck generiert.

Das Vorhaben „Parametric Concept“ wurde von Beginn an darauf ausgerichtet, die digitale Prozesskette als integralen Systembestandteil vom Entwurf bis zur Fertigstellung einzubinden. Sämtliche Informationen des 3D-Modells sollten ohne Zwischenschritte über 2D-Pläne direkt in den Fertigungsprozess überführt werden. Wirtschaftliche Effizienz wird dabei nur erreicht, wenn die variierenden Zuschnitte der Fassadenprofile automatisch erzeugt werden, anstatt manuell eingegeben oder mittels Schablonen übertragen zu werden. CNC-Bearbeitungszentren erfüllen diese Anforderungen an serielle Individualisierung, da jedes Bauteil mit unterschiedlichen Parametern ohne zusätzlichen Aufwand bearbeitet werden kann. Für die auf der BAU 2013 gezeigten Prototypen wurden auf diese Weise mehr als 1500 individuelle Zuschnitte von Rohrrahmen, Knoten und Adapterprofilen in einer modernen Fertigungsanlage mit vierzehn unabhängig gesteuerten Bewegungsachsen automatisiert hergestellt. Dank der verlustfreien Übernahme der Modellpräzision in den Fertigungsprozess wurden potenzielle Fehlerquellen ausgeschlossen, sodass die Bauteile fugenlos und maßgenau zusammengesetzt werden konnten. (Abb. 58)



Abb. 58: Produktion [41]

Die durchgängige Datenstruktur gewährleistete Planungs- und Kostensicherheit. Somit konnte eine architektonische Gestaltungsfreiheit mit hoher geometrischer Variabilität wirtschaftlich realisiert werden [41].

5.2.2 Planung, Bemessung und Ausführung einer kinetischen Fassade

Die Fassadenkonstruktion des Themenpavillons "One Ocean" auf der EXPO 2012 in Yeosu, Korea, zeichnet sich durch ihre bio-inspirierte kinetische Ausführung aus. Entwickelt wurde die kinetische Medienfassade basierend auf flexiblen, elastischen Verformungsprinzipien, die Bewegungsmustern aus der Natur, insbesondere aus dem Pflanzenreich, nachempfunden sind. Durch den Einsatz von glasfaserverstärktem Kunststoff (GfK) konnten große reversible elastische Verformungen realisiert werden, wodurch traditionelle mechanische Elemente wie Gelenke oder Rollen reduziert oder vollständig vermieden wurden [42].

Die Fassade des Pavillons (Abb. 59) umfasst insgesamt 108 vertikal angeordnete Lamellen mit einer Gesamtlänge von etwa 140 m und variierenden Höhen zwischen 3 und 13 m. Die Lamellen bestehen aus einem nur 9 mm starken Laminat aus glasfaserverstärktem Kunststoff, das entlang der vertikalen Kanten durch Verstärkungen mit Tiefen von 200 mm bzw. 30 mm ausgesteift ist.



Abb. 59: Fassade Themenpavillon „One Ocean“ [42]

Die Beweglichkeit der Lamellen wird durch Druckbeanspruchungen realisiert, welche durch Stellantriebe am oberen und unteren Ende jeder Lamelle erzeugt werden. Dies

führt zu elastischen Biegeverformungen, welche ein Öffnen und Schließen der Fassadenstruktur ermöglichen [42]. Das Antriebssystem ist in der Abb. 60 ersichtlich.

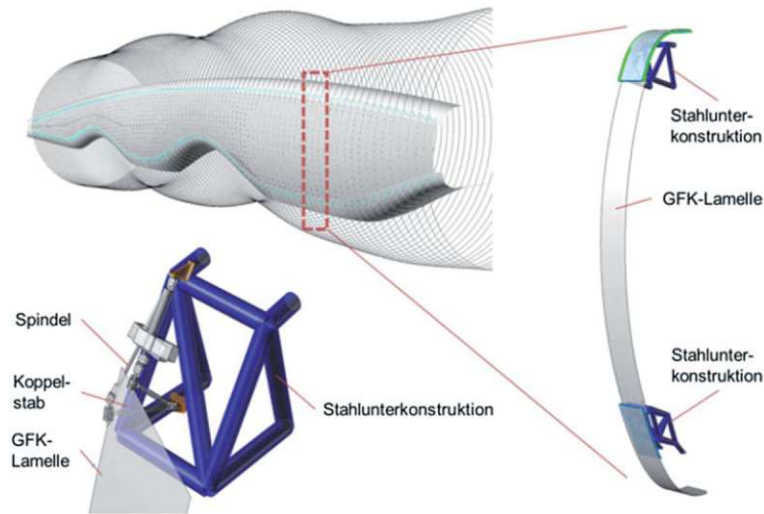


Abb. 60: GFK-Lamellen mit Antrieben [42]

Zur Sicherstellung der strukturellen Integrität unter Windbelastungen wurden umfangreiche Untersuchungen im Windkanal durchgeführt. Dadurch konnten die Windlasten präzise ermittelt werden. Die kinetische Fassade wird bei Windgeschwindigkeiten über 15 m/s automatisch geschlossen und dabei zusätzlich mit einer adaptiven Vorspannung von bis zu 50 kN zwischen den Lamellen gesichert, um eine ausreichende Stabilität gegen hohe Windlasten zu gewährleisten [42].

Die Lamellen sind einzeln ansteuerbar und ermöglichen somit eine individuelle Anpassung an Lichtverhältnisse und bauphysikalische Bedingungen. Die Steuerung erfolgt über eine zentrale Anlage, welche die insgesamt 216 Motoren synchronisiert und gleichzeitig die Funktionsfähigkeit der Lamellen kontinuierlich überwacht. Die Kinematik der Fassade ermöglicht neben funktionalen Anpassungen auch künstlerische Inszenierungen durch vorprogrammierte Bewegungsabläufe, die zusätzlich von integrierten LED-Beleuchtungssystemen hervorgehoben werden [42].

Im Hinblick auf die Materialauswahl und das Bemessungskonzept wurden sowohl lokale koreanische Normen (KBC 2009) als auch europäische Normen (EN 1990) herangezogen. Dabei kamen insbesondere die Richtlinien der DIN 18820 für faserverstärkte Kunststoffe und die BÜV-Empfehlungen für tragende Kunststoffbauteile zur Anwendung. Die Konstruktion wurde bezüglich ihrer Ermüdungsfestigkeit, dynamischen Beanspruchungen sowie thermischen und

medienbedingten Einflüssen umfassend bewertet und dimensioniert. Numerische Analysen wurden unter Verwendung der Statikprogrammen SOFISTIC 23 und MSC Nastran durchgeführt. Bauteilversuche ergänzten das Bemessungskonzept und bestätigten die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Konstruktion [42]. Die maßgebenden Lammelengeometrien wurden auf einer entsprechenden Stahlunterkonstruktion befestigt und anschließend den Versuchen unterzogen. Siehe Abb. 61.



Abb. 61: Versuchsaufbau [42]

Wie es in Abb. 62 ersichtlich ist, erfolgte die Herstellung der Lamellen im Handlaminierungsverfahren durch ein koreanisches Unternehmen nach Vorgaben der zuständigen Planungsbüros. Die Montagearbeiten wurden vor Ort durchgeführt, wobei durch Tests und begleitende Qualitätskontrollen die geforderte Genauigkeit und Funktionalität der Fassadenkonstruktion gewährleistet wurden [42].



Abb. 62: Lamellenfertigung links und Einbau rechts

Zusammenfassend wurde mit der Fassadenkonstruktion des Themenpavillons "One Ocean" ein innovatives, bio-inspiriertes kinetisches Konzept umgesetzt, das sowohl

technisch-funktionale als auch gestalterisch-ästhetische Ansprüche erfüllt und ein zentrales architektonisches Highlight der EXPO 2012 darstellte.

5.2.3 Enzo Ferrari Museum

Die Planung und Errichtung der Fassadenkonstruktion des Enzo Ferrari Museums in Modena stellte aufgrund der komplexen Geometrie und der hohen ästhetischen Anforderungen besondere Herausforderungen an Ingenieurwesen und Fertigungstechnik dar. Die Gebäudefassade ist charakterisiert durch eine geschwungene Glasfassade, welche durch Edelstahlspiralseile mit einem Durchmesser von 32 mm getragen wird. Diese vertikal angeordneten Seile sind an einem doppelt gekrümmten, 62 m langen Rundhohlprofil aus Stahl angeschlossen (Abb. 63). Aufgrund der nicht analytisch definierbaren Geometrie des Stahlprofils erfolgte, wie in der Abb. 64 ersichtlich, eine Segmentierung in einfach gebogene Stahlprofile mit variablen Wandstärken von bis zu 40 mm, welche vor Ort miteinander verschweißt wurden [43].



Abb. 63: Enzo Ferrari Museum – Glasfassade [43]

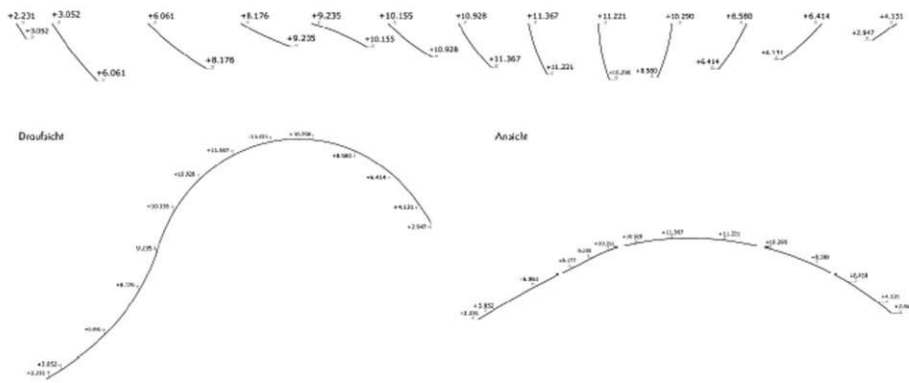


Abb. 64: Stahlprofil – Aufteilung [43]

Die bis zu 11 m hohe Glasfassade neigt sich um $12,5^\circ$ nach innen und ist geometrisch durch die Überschneidung zweier Kegelflächen definiert, wodurch die Verwendung von trapezförmigen, planen Glasscheiben ermöglicht wurde. Lediglich die oberste Reihe erforderte wegen der räumlich gekrümmten Schnittfläche individuell angepasste Sonderdetails, deren Lösung parametrisch erfolgte. Die Anbindung der Fassade erfolgte mittels 21 typisierter Sonderdetails (Abb. 65). [43].

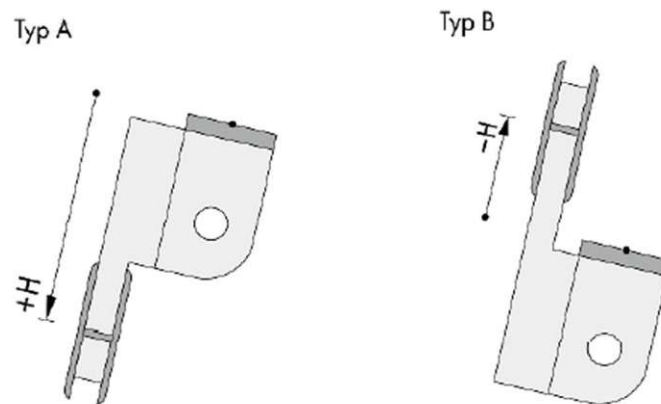


Abb. 65: Anbindung der Fassade mit typisierten Details [43]

Die Glasfassade besteht aus Argon-gefüllter Isolierverglasung mit außenliegenden ESG-Glasscheiben von jeweils 10 mm Stärke und einem innenliegenden Verbund aus zwei laminierten TVG-Glasscheiben von je 6 mm Stärke mit einer SentryGlas®Plus-Schicht. Der Sonnenschutz erfolgt durch schwarz beschichtete Aluminiumelemente, welche optisch an Kühlergrills aus dem Automobilbau erinnern. Diese Aluminiumelemente enthalten zudem integrierte Heizbänder, um winterlichen Schneefall abzuwehren [43].

Ein speziell entwickeltes Edelstahlelement, wie in der Abb. 66 veranschaulicht, dient sowohl als Seilklemme als auch als Glashalter und wurde zur Minimierung des Materialeinsatzes und Harmonisierung des ästhetischen Erscheinungsbildes vollständig in 3D geplant und gefertigt [43].

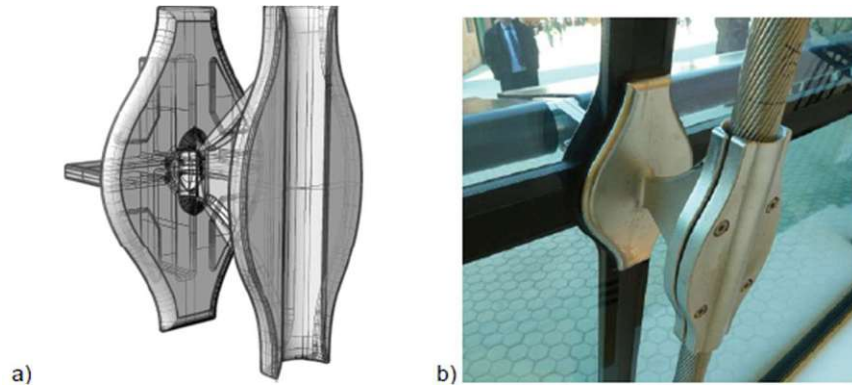


Abb. 66: Fassadenhalterung – a) 3D-Modell, b) Montage auf der Fassade [43]

Die Tragwerksplanung musste insbesondere horizontale Verformungen unter extremen Windlasten berücksichtigen. Diese Verformungen konnten durch individuelle Optimierung der Seilvorspannungen zwischen 80 und 330 kN auf maximal 133 mm beschränkt werden, um die zulässigen Verformungen der Glasscheiben nicht zu überschreiten. Aufgrund der Fassadenkrümmung erfolgte eine besondere Bemessung der Silikonfugen [43].

Die Tragkonstruktion wird durch ein zentrales Stahlportal ergänzt, welches mittels Y-förmiger, geneigter Stahlstützen mit variablen Rohrquerschnitten aus drei zusammengeschweißten Rohren und gelaserten Stahlblechen in das Tragwerk integriert ist (Abb. 67). Diese Konstruktion gewährleistet eine effiziente Kraftübertragung bei gleichzeitig minimaler optischer Präsenz [43].

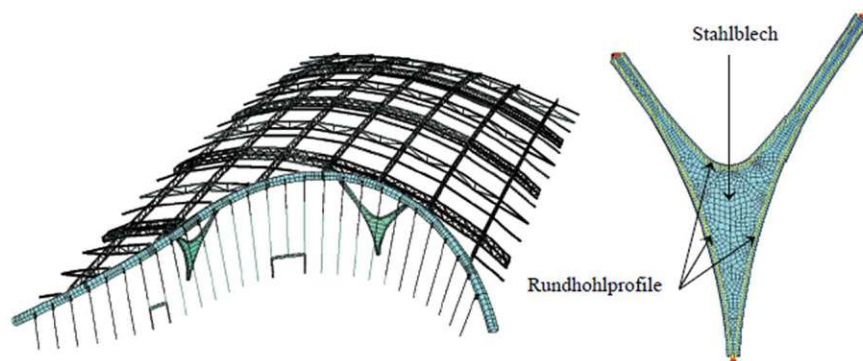


Abb. 67: Gesamttragwerk der Glasfassade und 3D-Modell der Stütze [43]

Die Fassadenplanung des Enzo Ferrari Museums vereint auf innovative Weise Technologien aus dem Schiffsbau und Automobilbau und setzt damit neue Maßstäbe in der Realisierung komplexer architektonischer Formen.

5.2.4 Planung und Ausführung von Gebäudehülle des Heydar Aliyev Cultural Centre

Die Gebäudehülle des Heydar Aliyev Cultural Centre in Baku zeichnet sich durch ihre komplexe Freiformgeometrie aus, welche im Entwurfsprozess und bei der Realisierung besondere Anforderungen stellte. In der Gebäudehülle werden großteils die Dach- und Fassadenkonstruktion nahtlos miteinander verschmolzen. Die Architektur stammt aus der Feder von Zaha Hadid Architects und verfolgt eine organische, fließende Formgebung, welche sich sowohl in der Außen- als auch in der Innenhülle widerspiegelt.

Die Dachkonstruktion wurde als Raumfachwerk in MERO-Systembauweise ausgeführt. Dieses wurde in mehreren Planungsschritten entwickelt, wobei zunächst eine Strukturzone zwischen den architektonischen Freiformflächen der Außen- und Innenhaut definiert wurde. Nach einem festgelegten Design-Status erfolgte die detaillierte Ausarbeitung des Raumfachwerks hinsichtlich Querschnittsabmessungen und Knotenpunkten in einem FE-Programm sowie die Abstimmung mit dem Haupttragwerk. Besonderes Augenmerk wurde auf die Kompatibilität mit der äußeren Geometrie und die Optimierung der Stahlmassen gelegt (Abb. 68).



Abb. 68: Montage der Gebäudehülle [44]

Die äußere Gebäudehülle, genannt „Solid Skin“, besteht aus mehreren funktionalen Schichten. Ein vorgefertigtes elementiertes Dachmodul-System stellt hierbei die unterste Schicht dar. Diese Elemente, bestehend aus U-Profil-Pfetten, Trapezblech, Dampfsperre, Steinwolle-Dämmung und Wettermembran, wurden aufgrund der komplexen und variablen Geometrie vor Ort vormontiert und anschließend auf die Knoten des Raumfachwerks montiert (Abb. 69) [44].



Abb. 69: Montage der äußeren Gebäudehülle [44]

Die sekundäre Stahlunterkonstruktion bildet die Verbindung zwischen dem regulären Raster des Raumfachwerks und der freien Formgebung der Solid Skin. Diese Struktur umfasst primäre und sekundäre Stahlrohre, welche spezifisch für dieses Projekt entwickelt wurden, um die komplexen Krümmungen exakt abzubilden. Das Spannen zwischen den Knoten des räumlichen Rahmens wird mit den Rohren in Gebäudequerrichtung und Montage der Befestigungselementen für Dachhaut mit Rohren in Gebädelängsrichtung realisiert, siehe Abb. 70. Alle Elemente wurden individuell geplant und produziert, was eine computergestützte Optimierung der Stahlrohrkrümmungen erforderte, um die Produktionsprozesse praktikabel zu gestalten [44].



Abb. 70: Montage von Primär- und Sekundärpfetten mit Befestigungspunkten [44]

Auch die Innenverkleidung des Gebäudes folgt der komplexen Freiformgeometrie der Außenhülle. Für die Realisierung wurde ein sogenanntes Cold-Bending-Verfahren gewählt. Hierbei wurden dünne, flexible, GFK-Platten vor Ort gebogen und an einer ebenfalls komplex geformten Stahlunterkonstruktion befestigt. Diese Konstruktion erforderte eine exakte Planung und sorgsame Umsetzung, insbesondere aufgrund der Installationshöhe von bis zu 40 Metern [44].

Die verglaste Gebäudehülle stellt eine weitere wesentliche Komponente des Entwurfs dar und erfüllt höchste Anforderungen hinsichtlich Transparenz, thermischer Belastung und struktureller Beanspruchung durch Wind- und Erdbebenkräfte. Das gewählte System basiert auf vorgefertigten festverglasten Elementfassaden, deren Verglasungseinheiten mittels struktureller Silikonverklebung an Adapterrahmen befestigt sind. Diese Fassadenelemente wurden hängend montiert, um die notwendigen Bewegungen durch thermische und seismische Belastungen zuzulassen. [44]. Die Glasfassade ist in der Abb. 71 ersichtlich.

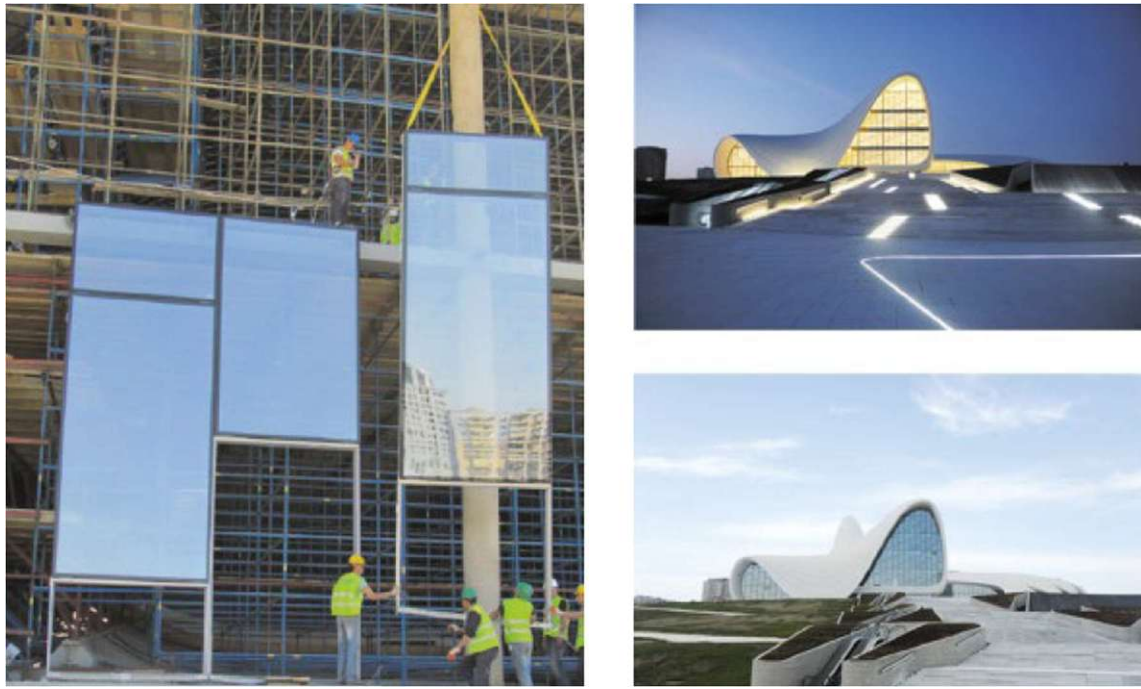


Abb. 71: Montage der Glasfassade links und fertige Glasfassade rechts [44]

Insgesamt stellte die Planung und Realisierung der Gebäudehülle des Heydar Aliyev Cultural Centre in Baku aufgrund der Komplexität und Präzision hohe Anforderungen an Engineering und Ausführung, welche nur durch spezialisierte Methoden und computergestützte Planungsverfahren erfüllt werden konnten.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, inwiefern die kontinuierliche technologische Entwicklung von Planungssoftware die Anforderungen an Tragwerksentwürfe erhöht und welche Herausforderungen sich dabei für die Planung und Ausführung ergeben. Ein besonderer Fokus wurde auf parametrische Entwurfsprozesse, spezialisierte Softwarelösungen, die Tragwerksherstellung sowie innovative Fassadensysteme gelegt.

Die wesentlichen Vorteile der parametrischen Architektur bestehen in der gesteigerten Flexibilität und Effizienz des Planungsprozesses. Durch die Einführung von parametrischen Modellierungen und computergestützten Entwurfswerkzeugen wie Rhino3D, Grasshopper, Dlubal RFEM und Ideastatica wird die Entwicklung komplexer Geometrien erheblich erleichtert. Diese Werkzeuge ermöglichen eine hohe Präzision, optimierte Materialausnutzung sowie eine Reduktion von Entwicklungszeiten durch die Automatisierung von Designvariationen und die unmittelbare Rückkopplung von Änderungen. Zusätzlich wird die nahtlose Integration von Struktur- und Entwurfsmodellen gefördert, was eine ganzheitliche Optimierung der Tragwerksplanung im Sinne der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, geometrisch komplexe Bauwerke zu realisieren, die mit konventionellen Methoden nicht oder nur schwer umsetzbar wären. Projekte wie das Heydar Aliyev Centre oder der Metropol Parasol in Sevilla demonstrieren diese Potenziale anschaulich.

Den Vorteilen stehen jedoch auch erhebliche Herausforderungen gegenüber. Die Komplexität der Entwürfe erfordert eine enge Verzahnung zwischen Planung und Fertigung, um Präzision und Maßhaltigkeit sicherzustellen. Fertigungsprozesse müssen häufig angepasst werden, wobei der Einsatz spezialisierter Technologien wie CNC-Fräsen oder robotergesteuerter Systeme erforderlich ist. Die Herstellung maßgeschneiderter Verbindungen in Stahl-, Stahlbeton- und Holzbauweisen wird als besonders kritisch bewertet, da diese individuellen Lösungen erfordern und die geometrische Konsistenz der Tragwerke beeinflussen können.

Ein weiteres Defizit ergibt sich aus der hohen Abhängigkeit von Software und Schnittstellenkompatibilität. Die notwendige Interoperabilität zwischen Entwurfs-,

Analyse- und Fertigungstools stellt eine erhebliche Herausforderung dar und kann zu Fehlerquellen führen, wenn Daten nicht korrekt übertragen oder interpretiert werden. Zudem ist ein hoher Schulungsbedarf sowohl für Architekten als auch Bauingenieure erforderlich, um die neuen Technologien adäquat nutzen zu können.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass parametrische Architektur signifikante neue Möglichkeiten für Entwurf und Ausführung komplexer Bauwerke bietet, gleichzeitig jedoch hohe Anforderungen an Planungskompetenz, Fertigungstechnologie und Projektkoordination stellt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] V. Maghsoudloumotlagh, *Calculating an optimization of Geodesic domes structure through Parametric modeling*, Torino: Masterthesis, 2022.
- [2] A. / W. F. Tedeschi, AAD - Algorithms-Aided Design. Parametric Strategies Using Grasshopper, Brienza: Le Penseur Publisher, 2014.
- [3] M. u. a. Sternal, „31. Forum Bauinformatik. 11. bis 13. September 2019 in Berlin: Proceedings,“ Berlin, 2019.
- [4] „SCIA: Parametrisches Design und visuelle Skripterstellung,“ [Online]. Available: <https://www.scia.net/de/news/parametrisches-design-und-visuelle-skripterstellung>. [Zugriff am 20 05 2024].
- [5] AutoCAD, „Autodesk Auto CAD 2025,“ 2024. [Online]. [Zugriff am 2024 05 2024].
- [6] C. Leopold, *Über Form und Struktur - Geometrie in Gestaltungsprozessen*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [7] R. A. / R. Woodbury, „Multi-level Interaction in Parametric Design“. *Lecture Notes in Computer Science*.
- [8] P. J. a. R. Stouffs, „Types of Parametric Modelling,“ in *Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design in Asia (CAADRIA)*, 2015.
- [9] L. S. u. A. L. Inês Caetano, „Frontiers of Architectural Research, Heft 2,“ *Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design*, pp. 287-300, 2020.
- [10] O. A. P. W. I. M. u. R. L. Kevin Herrmann, *Methodischer Aufbau von Entwicklungsumgebungen nach dem Generative Parametric Design Approach*, The Design Society, 2021.
- [11] M. H. u. B. Bähre, *Informierte Architektur. Building Information Modeling für die Architekturpraxis*, Basel: Birkhäuser, 2020.
- [12] K. K. T. L. Aftab Ifra, „Automating Scan to BIM Operations Using Grasshopper,“ *Periodica Polytechnica Civil Engineering in 2020*, pp. 1-6, 2020.
- [13] A. W. M. K. Z. Milena Stavric, „Osnove primjene programa Rhinoceros 3D i Grasshopper u poverzivanju matematike, geometrije i arhitekture,“ *Hrvatski matematički elektronički casopis*, 2017.
- [14] A. M. B. R. W. K.-U. B. Ann-Kathrin Godbach, „Der CAD-intergrierte parametrische Entwurfsprozess von Membrantragwerken,“ *Stahlbau 89*, Bd. 8, Nr. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co., pp. 684-692, 2020.
- [15] R. V. Diegeo Apellaniz, „Enhancing structural design with a parametric FEM toolbox,“ *Steel Construction 15*, Bd. 15, Nr. Ernst & Sohn GmbH, pp. 188-195, 2022.
- [16] J. Mirtschin, „Engaging Generative BIM Workflows,“ 2011.

- [17] D. V. P. Niharika Sharma, „Scope of Unconventional Grid in Tall Building: A Way Forward,“ in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024.
- [18] „IDEA StatiCa: effizientes Design von Stahl- & Betonbauteilen.,“ IDEA StatiCa, 2024a. [Online]. Available: https://www.ideastatica.at/?gclid=EAlalQobChMIxK-gtvfdhgMVmEpBAh2tswlMEAAAYASAAEgJVqfD_BwE. [Zugriff am 11 06 2024].
- [19] „IDEA StatiCa: effizientes Design von Stahlverbindungen in Minuten.,“ IDEA StatiCa, 2024b. [Online]. Available: <https://www.ideastatica.at/stahl/>. [Zugriff am 11 06 2024].
- [20] „Component-based Finite Element Method (CBFEM),“ [Online]. Available: www.cbfem.com/about-cbfem. [Zugriff am 30 05 2024].
- [21] „Detail: Sesign-Lösung für Betonbauteile in Minuten,“ IDEA StatiCa, 2024c. [Online]. Available: <https://www.ideastatica.at/beton/>. [Zugriff am 11 06 2024].
- [22] J. Kubicek, „IDEA StatiCa,“ 5 9 2024. [Online]. Available: https://www.ideastatica.com/de/blog/checkbot-es-gibt-bim-fur-bauingenieure?utm_campaign=newsletter&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-9NwY7fkY2GI9aBewJlBtTYynNtXuUyITuDqEv4iwxhv7fG2K4NesmQ2Dn16ncp1UJJC_8D9poK98_r5lGa-hSOeVzsvw&_hsmi=94327597&utm_content=9432. [Zugriff am 01 2025].
- [23] P. Topinkova, „IDEA StatiCa,“ 29 05 2024. [Online]. Available: https://www.ideastatica.com/de/blog/verbindungen-mit-nur-wenigen-klicks-bemessen?utm_campaign=newsletter&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-quCg5xs0uQaLdYpou5pyf9q0gcp5wSzYXfp4FDvP81u3JlZvJbDxMGdsmfO-lvZ4IWpMbeT3APPSrs1hg4b55Q5w8yQ&_hsmi=88561544&utm_content. [Zugriff am 2025].
- [24] „IDEA StatiCa,“ [Online]. Available: https://www.ideastatica.com/de/case-studies/entwurf-einer-von-der-dna-helix-inspirierten-wasserrutschen-treppe?utm_campaign=newsletter&utm_medium=email&_hsmi=84770435&_hsenc=p2ANqtz--NeR5OIS4F0Dv47Orj-JAaqOeV_A-mhrYayJAqsB3k0ThcmvLkmoFICbSmlRJ7ZiUNpziokY7. [Zugriff am 2025].
- [25] J. / K. F. Knippers, „Einfluss parametrischer Architektur auf die Tragwerkplanung und umgekehrt,“ [Online]. Available: https://sofistik-sonar.ams3.digitaloceanspaces.com/pub/infoline/SOFiSTiK-Seminar/2012/V01_Kamp.pdf. [Zugriff am 13 06 2024].
- [26] A. Flury, Kooperation. Zur Zusammenarbeit von Ingenieur und Architekt, Basel: De Gruyter, 2012.
- [27] BDA, „Jübergturn Hemer,“ [Online]. Available: www.bda-nrw.de/awards/juebergturn-hemer-aussichtsturm-im-rahmen-der-landesgartenschau-hemer-2010/. [Zugriff am 10 06 2024].
- [28] „Guggenheim-Museum Bilbao - LAB42 - Architekturinformatik und Entwerfen,“ [Online]. Available: <https://lab42.architektur.uni-siegen.de/j3/index.php/beitragsuebersicht/227-guggenheim-museum-bilbao>. [Zugriff am 17 06 2024].
- [29] R. McNeel, „Was sind NURBS?,“ [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/de/features/nurbs/>. [Zugriff am 17 05 2024].
- [30] T. Flandera, AutoCAD. Referenz - Beispiele - Nachschlagewerk [auf Basis von AutoCAD 2015], München: Hanser, 2014.

- [31] T. Shihua, „www.yicaiglobal.com,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.yicaiglobal.com/news/china-to-build-usd18-billion-third-runway-at-shenzhen-airport>. [Zugriff am 2025].
- [32] F. Maier, *Parametric Design in New Dimensions: Shenzhen Bao'an International Airport*, 2013.
- [33] M. / S. S. / L. J. Fleischmann, „Forschungspavillon ICD/ITKE - Universität Stuttgart,“ [Online]. Available: <https://archplus.net/de/forschungspavillon-icd-itke-universitaet-stuttgart/>. [Zugriff am 16 05 2024].
- [34] C. D. O. B. T. G. Romain Mesnil, „Form finding of nexorades using the translations method,“ *Automation in Construction*, pp. 142-154, 2018.
- [35] M. E. A. V. J. W. Helmut Pottmann, „Architectural geometry,“ *Computers & Graphics*, pp. 145-164, 2015.
- [36] A. W. Julian Lienhard, „Digitaler Formschluss - Zahn-Steckverbindungen für komplexe Stahlbauknoten,“ *Stahlbau* 87, pp. 673-679, 2018.
- [37] M. E. R. V. A. F. A. O. C. P. A. H. Moritz Heimrath, „Hyundai Motorstudio Goyang,“ *Stahlbau* 88, pp. 223-233, 2019.
- [38] M. G. Klaus Bollinger, „Beton: Material und Formgebung in der Baupraxis,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, pp. 617-625, 2020.
- [39] J.-P. K. G. F. Volker Schmid, „Metropol Parasol in Sevilla - Innovative Hybridkonstruktion in Holz, Beton und Stahl,“ *Bautechnik* 88, Bd. 88, Nr. 10, pp. 715-722, 2011.
- [40] J.-P. K. A. T. Volker Schmid, „Neue Konzepte im Holzbau mit Furnierschichtholz - Die Holztragkonstruktion des Metropol Parasol in Sevilla,“ *Bautechnik*, Bd. 88, Nr. 10, pp. 707-714, 2011.
- [41] M. P. Andreas Fuchs, „Parametrisches Fassadensystem,“ in *Glasbau 2014*, Berlin, Ernst & Sohn GmbH, 2014, pp. 313-321.
- [42] H. J. F. S. M. O. Jan Knippers, „Bio-inspirierte kinetische Fassade für den Themenpavillon "One Ocean" EXPO 2012 in Yeosu, Korea,“ Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [43] T. S. T. W. W. S. Lucio Blandini, „Das Enzo Ferrari Museum - eine Fusion zweier Designwelten,“ in *Glasbau 2013*, Berlin, Ernst & Sohn, 2013, pp. 2-10.
- [44] W. S. R.-F. B. A. T. Thomas Winterstetter, „Die Gebäudehülle des Heydar Aliyev Cultural Centre in Baku, Aserbaidshan,“ in *Glasbau 2015*, Berlin, Ernst & Sohn, 2015, pp. 145-155.

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: BIM-Level [11].....	11
Abb. 2: Red Bull Arena, Leipzig: a) Stadion nach Abschluss der Bauarbeiten b) Rhino-Modell und RFEM-Modell [15].....	15
Abb. 3: Darstellung der Grundgeometrie mit unkonventionellem Gitter in Rhino 3D bei Verwendung von Grasshopper Plugin [17].	18
Abb. 4: Grasshopper-Interface zur Gittererstellung [17].....	19
Abb. 5: Rhino 3D Modell bei Verwendung von Grasshopper Plugin [17].	20
Abb. 6: a) AutoCAD Modell; b) 3D-Modell in einem FEM-Programm; c) 2D-Modell in einem FEM-Programm [17].....	21
Abb. 7: Workflow von Grasshopper zu RFEM [15].....	22
Abb. 8: Workflow von RFEM zu Grashooper [15]	23
Abb. 9: Tondo Brücke in Brüssel a) Grasshopper 3D-Modell, b) RFEM Berechnungsmodell und c) Bild der Brücke nach Ausführung [15].....	24
Abb. 10: Wien Museum – Anschlussdetail in Rhino 3D und RFEM (oben), und Ausführung (unten) [15].....	25
Abb. 11: Erweiterung des Austria Center Wien: Rhino3D und RFEM Modelle (oben) und Tragwerksausführung (unten) [15].....	26
Abb. 12: ArcelorMittal Hauptsitz: a) RFEM-Modell und b) extrudiertes Rhino 3D-Modell [15]	27
Abb. 13: Automatisierung von Erdbebennachweisen für Stützen in RFEM, Grasshopper und Excel. [15]	28
Abb. 14: Optimierung einer Fachwerkstruktur in RFEM [15]	29
Abb. 15: Typische Knotengeometrien als Stahl- Beton- und Holzanschlüsse eingegeben werden [18].	30
Abb. 16: Kombination der Komponenten- und FE-Methode [19].....	31
Abb. 17: Berechnung eines Stahlanschluss mit unkonventioneller Geometrie [19].....	31
Abb. 18: Beispiel Ideastatica/Träger [21]	33
Abb. 19: Übernahme eines FEM-Modells im Checkbot und anschließende Dimensionierung der Verbindungen [22].....	33
Abb. 20: Automatische Anpassung der verknüpften Anschlusselementen [23].....	36
Abb. 21: Modellierung eines Anschlusses in Grasshopper und Analyse in IDEA StatiCa [23]	37
Abb. 22: Tragwerksmodell des Stahlturms von Wasserrutschentreppe [24]	38
Abb. 23: Analyse der Anschlussgeometrie der tragenden Säulen in IDEA StatiCa [24]	39
Abb. 24: Montage der tragenden Struktur der DNA-Helix-inspirierten Treppe [24].....	40

Abb. 25: Darstellung des geometrischen Konzepts des Jüberturms [25]	42
Abb. 26: Sun Valley – trichterförmige Tragstruktur [25]	43
Abb. 27: Bao'an International Airport in Shenzhen - Generierung der Fassadengeometrie über Kontrollpunkte [25]	45
Abb. 28: Flughafen Shenzhen [31]	46
Abb. 29: Montage der Einzelemente des Forschungspavillons [33]	48
Abb. 30: Fertiges Forschungspavillon, Universität Stuttgart [25]	49
Abb. 31: Anschluss in einer Nexorade-Struktur [34]	51
Abb. 32: Yas Marina Hotel – Knotenachsen und hervorgehobener Streifen aus ebenen Vierecken (links), Montagezustand (rechts) [35]	52
Abb. 33: Montage von Eiffelturmpavillons [35]	53
Abb. 34: Kreod-Pavillon links und Rokko-Shidare Observatory rechts	54
Abb. 35: Fertiges Gebäude Hyundai Motorstudio [37]	55
Abb. 36: Hyundai Motorstudio-Tragwerksmodell bestehend aus Betonkernen, Stahlfachwerk und Stützencluster [37]	56
Abb. 37: Auflagerrahmen rechts, Stützencluster links [37]	57
Abb. 38: Gitterschale Mitoseum Bautzen [36]	58
Abb. 39: Probebleche für die Definition der Zahntoleranzen links und parametrische Definition des Knotens mit einer FEM-Software [36]	59
Abb. 40: links Einsteinturm in Potsdam, Mitte Goetheanum von Rudolf Steiner, rechts Guggenheim New York	60
Abb. 41: Museum Marta Herford, Deutschland [38]	60
Abb. 42: Rechts: Schalung, Links: Stahlbetonrohbau [38]	61
Abb. 43: Rolex Learning Center, Lausanne [38]	62
Abb. 44: Verlegung der Bewehrung der großen Schale [38]	63
Abb. 45: Betonschalen [38]	64
Abb. 46: Metropol Parasol Sevilla [39]	66
Abb. 47: Holztragwerk links und Schnittmuster der Furnierschichtholzplatte rechts [39]	67
Abb. 48: FE-Modell der Schirm- und Stämmenkonstruktion [40]	67
Abb. 49: Momentenanschluss: A) eingeklebte Gewindestangen und B) vorgespannte Schrauben [40]	68
Abb. 50: Verbindungen mit 450 verschiedenen Größen unterteilt in 15 Grundtypen [40]	69
Abb. 51: Verbindungen im Schirmbereich [40]	69
Abb. 52: Endgültige Anschlussgeometrie [40]	70
Abb. 53: 2 bis 3 mm dicke PUR-Beschichtung links und beschichteter Stammteil rechts [40]	70
Abb. 54: Verschnittoptimierte Konfiguration der Bauteile [40]	71

Abb. 55: Abgetrepptes Gerüst links und Montage der Stämme rechts [40]	72
Abb. 56: Kinetische Fassade „One Ocean“ [42]	74
Abb. 57: Ausgestellte Exponate, Parametrisches Fassadensystem, BAU 2013 [41]	75
Abb. 58: Produktion [41]	76
Abb. 59: Fassade Themenpavillon „One Ocean“ [42]	77
Abb. 60: GFK-Lamellen mit Antrieben [42]	78
Abb. 61: Versuchsaufbau [42]	79
Abb. 62: Lamellenfertigung links und Einbau rechts	79
Abb. 63: Enzo Ferrari Museum – Glasfassade [43]	80
Abb. 64: Stahlprofil – Aufteilung [43]	81
Abb. 65: Anbindung der Fassade mit typisierten Details [43]	81
Abb. 66: Fassadenhalterung – a) 3D-Modell, b) Montage auf der Fassade [43]	82
Abb. 67: Gesamttragwerk der Glasfassade und 3D-Modell der Stütze [43]	82
Abb. 68: Montage der Gebäudehülle [44]	83
Abb. 69: Montage der äusseren Gebäudehülle [44]	84
Abb. 70: Montage von Primär- und Sekundärpfetten mit Befestigungspunkten [44]	85
Abb. 71: Montage der Glasfassade links und fertige Glasfassade rechts [44]	86