

Neue Hybride - Formfindung und Konstruktionsentwicklung des Turms des Bauhaus-Archivs Berlin

Christoph Gengnagel^{1,2}, Moritz Heimrath³

¹Fachgebiet für Konstruktives Entwerfen und Tragwerksplanung UdK Berlin,

²B+G Ingenieure Bollinger und Grohmann GmbH, Berlin

³Bollinger und Grohmann ZT GmbH, Wien

Zusammenfassung: Bei der Entwicklung und Realisierung des 20m hohen Turms des Bauhaus Archivs wurde das Tragwerk in einer hybride Formfindung mit Hilfe einer teilautomatisierten multiobjektiven Optimierung generiert. Das betraf vor allem die Entwicklung von geometrischen Regeln als auch die Analyse für die 670 „leicht tanzenden Stahlstützen“ des außen liegenden Primärtragwerks, die mit einem maximalen Außendurchmesser von 100 mm das wesentliche Gestaltungselement des Turms sind.

1 Einleitung

Das Gebäudeensemble des Bauhaus-Archiv in Berlin bedurfte nach vielen Jahren intensiver Nutzung, vielen Reparaturen und kleinen Veränderungen einer umfassenden Instandsetzung und Modernisierung. Den dafür ausgeschriebenen Architekturwettbewerb konnten Staab Architekten 2015 für sich entscheiden. Der vollständige Abschluss des Projekts wird noch bis 2025 dauern. Fertiggestellt ist aber schon ein wichtiges Element des Gesamtentwurfs: der Turm auf dem neuen Vorplatz des Museums. Das 20m hohe, fünfgeschossige Gebäude erschließt auf einer Grundrissfläche von 14x14m in Zukunft das Museum im Erdgeschoss und bietet in den darüber liegenden Geschossen ein digitales Studio, Flächen für die Museumspädagogik sowie einer Lounge Raum (siehe Abb. 1). Volker Staab sah in dem Baukörper das komplexeste Bauteil des Gesamtprojekts. Entsprechend intensiv begann schon in der Wettbewerbsphase die Auseinandersetzung mit Form und Konstruktion des Bauwerks. Am Ende einer umfangreichen Variantenstudie entstand das Konzept eines gläsernen Turms, mit stützenfreien Innenräumen, der von sehr schlanken, „leicht tanzenden Stahlstützen“ umgeben ist (siehe Abb. 2). Die kontrollierte Unregelmäßigkeit dieses außenliegenden Stahltragwerks sollte die neuen Planungs- und Gestaltungsmöglichkeiten eines computergestützten experimentellen Arbeitsprozesses widerspiegeln [1].

2 Computergestütztes Entwerfen - hybride Formfindung

Um die unterschiedlichen Strukturkonzepte einerseits spielerisch, aber auch rasch und effizient auf ihre Anwendbarkeit und ihr Gestaltungspotential zu untersuchen, wurde die Werkzeugumgebung von McNeel Rhino (Rhino3d), Grasshopper (GH) und Karamba3d verwendet, die es erlaubt Strukturen in Echtzeit zu generieren, statisch zu berechnen und zu bewerten. Die grafische Programmierumgebung von GH erlaubt dabei, ohne die Kenntnisse von Skript- oder Programmiersprachen, eindeutige Abfolgen von Funktionen zu definieren, die mit veränderten Eingangsparameter die gesamte Entwicklung von statischer Modellierung, Simulationen von Lasteinwirkung und Reaktion sowie die entsprechende Bemessung automatisieren.

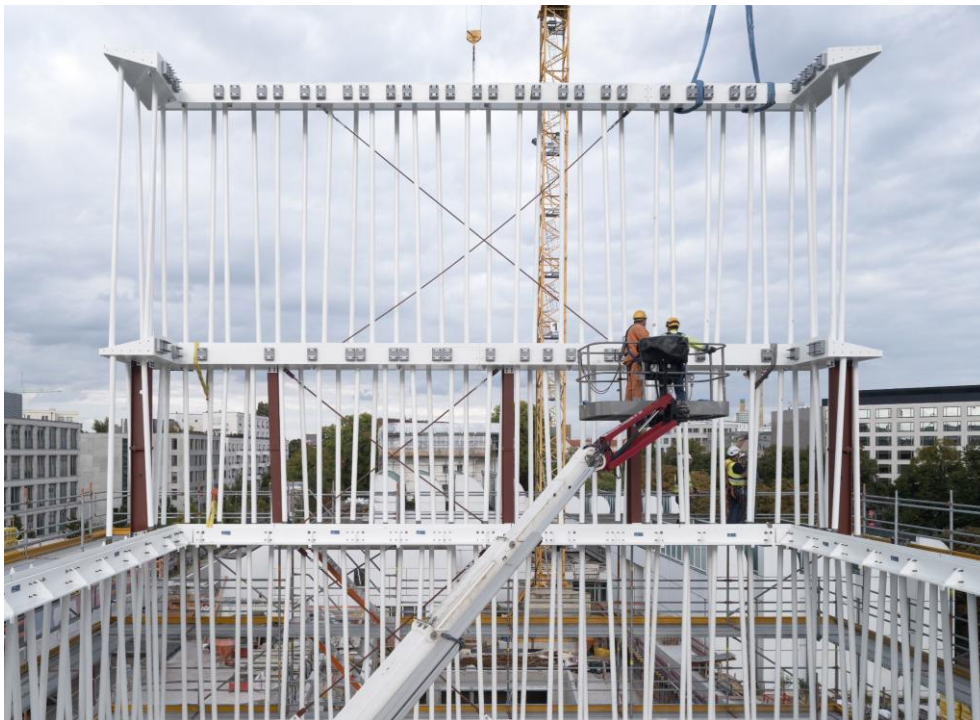


Abbildung 1: Realisierung des Turms der Erweiterung des Bauhaus Archivs 2022, Foto: Marcus Ebner

Der Aufbau eines statischen Berechnungsmodells in Karamba3d über GH erfolgt durch vordefinierte Komponenten, die aus geometrischen Objekten wie Linien, Kurven oder Flächen statische Elemente wie Stäbe oder Schalen erzeugen. Dabei werden für Elemente und Elementgruppen Querschnitte mit dazugehörigem Material definiert. Elemente können weiter modifiziert und durch zusätzliche Eigenschaften wie Gelenke und Federsteifigkeiten konfiguriert werden. Ein Modell in Karamba3d wird aus den Elementen zusammengesetzt und um für eine statische Berechnung notwendige Konditionen wie Auflager, Lasten, Lastkombinationen erweitert. Integrierte Bemessungsroutinen für die Querschnittszuweisung anhand von Schnittkräften und zu definierenden Profilgruppen

sorgen dafür, dass aus annähernd jeder Geometrie eine "tragfähige" Struktur entsteht. Effekte aus der Berechnung nach Theorie II können dabei berücksichtigt werden. Der Vorteil dieser Arbeitsweise besteht darin, dass die zeitaufwendigen Prozesse einer manuellen Strukturgenerierung durch automatisierte Prozesse ersetzt werden und damit Freiräume für vergleichende Parameterstudie und einen kreativen Entwurfsprozess entstehen. Das Ziel dieses "Mensch- Maschine- Dialogs" ist dabei weniger die Entwicklung eines umfassenden computergestützten Optimierungsprozesses als vielmehr die Erzeugung eines experimentellen Aufbaus, der durch iterative Exploration Erfahrungswissen für kombinierte Fragestellungen vermittelt. Aus der Kombination von explizitem und implizitem Wissen entstehen dann ganzheitliche und gestalterische Entwurfsentscheidungen.

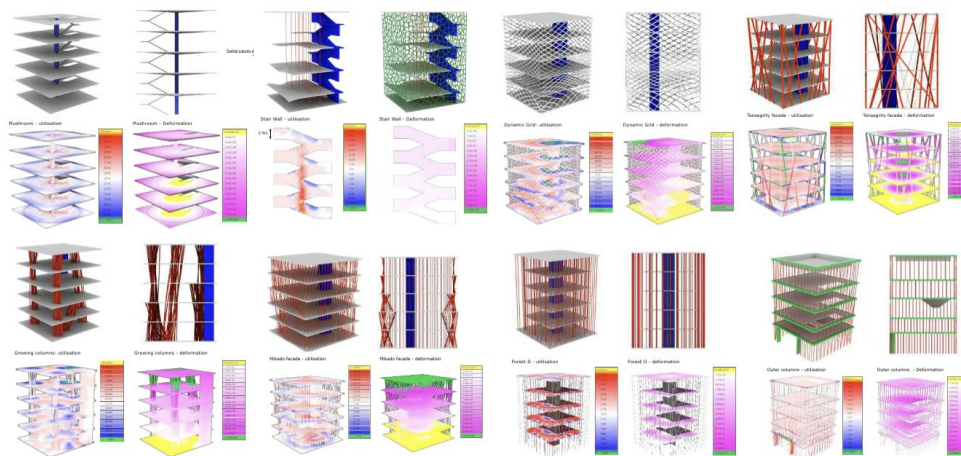


Abbildung 2: Tragwerksvarianten aus der Wettbewerbsphase, Werkzeugumgebung Rhino3d/GH/Karamba3d, Grafik: B+G

Für das Grundkonzept der Turmkonstruktion, einer durch das außenliegende filigrane Tragwerk hinreichend ausgesteiften und standsicheren Struktur, stellt z.B. bei Einhaltung aller zulässigen Verformungen der Vergleich der Gesamtmassen der Tragwerke ein maßgebendes Kriterium für die Effizienz in Hinblick auf Kosten und GWP [2] dar, das über Einheitspreise und generische EPD [2] quantifiziert werden kann. Aber selbst bei dieser sehr fokussierten Betrachtung verhalten sich die Kriterien in der Regel reziprok. So wird z.B. durch eine starke Differenzierung der Stabquerschnitte entsprechend ihrer Beanspruchung die Gesamtmasse des Tragwerks und damit der Wert des GWP maßgeblich reduziert. Gleichzeitig entstehen durch eine fehlende Rationalisierung aber höhere Fertigungskosten oder das GWP erhöht sich durch längere Beschaffungsketten.

Im Projekt Bauhaus-Archiv war insbesondere die variable Verteilung der außenliegenden Fassadenstützen mit unterschiedlichen Neigungswinkeln und Abständen eine entscheidende Gestaltungsaufgabe mit wesentlichen Auswirkungen auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur. Das Zusammenspiel von wahrnehmbarer Ordnung und Unordnung der sichtbaren Tragelemente prägt maßgeblich das Erscheinungsbild des Gebäudes und stellt einen spannenden Aspekt in der kollaborativen Entwicklung der Architektur und des Tragwerks dar.

3 Formoptimierung und Konstruktionsentwicklung

Das für den Wettbewerbsbeitrag entscheidende Tragwerkskonzept, bestand aus einer außerhalb der Fassade liegenden Doppel-Stützenreihe. Dabei sind alle Stützen als schlanke Rundrohre konzipiert, welche sich in der Achse orthogonal zur Fassade alternierend neigen. Entgegen den Erwartungen wirkt eine Gebäudeseite also nicht nur entlang ihrer Achse aussteifend, sondern quer dazu. Die Effektivität dieses Tragkonzepts entsteht somit durch die Tiefe der Fassadenkonstruktion und durch einen effizienten Rhythmus abwechselnder und unterschiedlich geneigter Elemente.

Dem Wettbewerb folgte ein VgV- Verfahren für die Fachplaner, in dem B+G Ingenieure nicht erfolgreich waren. Die beauftragten Tragswerkplaner scheiterten in der Weiterentwicklung des experimentellen und spielerischen Charakters des Entwurfskonzepts. Nach mehr als 3 Jahren kam es zu einem grundsätzlichen Diskurs über die Machbarkeit der Wettbewerbsidee, die mehrfach durch die Prüfungenieure für Standsicherheit Schlaich Bergermann & Partner bestätigt wurde. Am Ende entschied sich 2019 der Auftraggeber für eine Neuvergabe der Tragwerksplanung des Turms an B+G Ingenieure und ermöglichte damit die Fortsetzung der Entwurfsarbeit von 2015 durch die Verfasser.

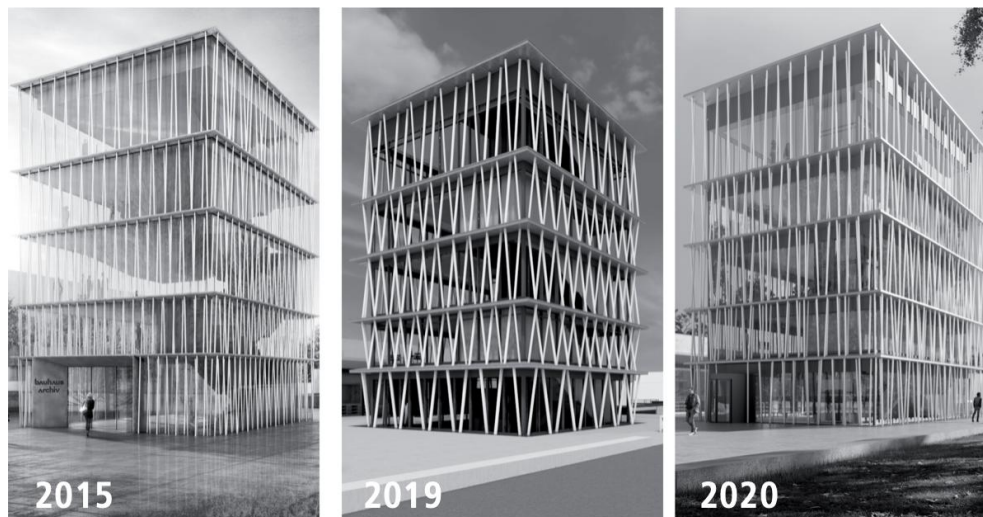


Abbildung 3: Entwicklung der Konstruktion des Turms: Wettbewerb 2015, Bearbeitung 2015 bis 2019, "Neuentwurf" 2019 bis 2020. Grafik : Staab Architekten

3.1 Geometrie- und Formoptimierung

Die intensive Phase der Geometrie- und Formoptimierung in tragwerksplanerischer und gestalterischer Hinsicht fokussierte sich zu Beginn im Wesentlichen auf das außenliegende Stabwerk. Ziel war die Realisierung des Grundkonzepts der "tanzenden schlanke Stützen" mit möglichst geringem Materialaufwand. Entscheidend dafür war das Schwingungsverhalten und damit die Größe der ersten Eigenfrequenzen (EF) der Gesamtstruktur. In ersten Studien wurden deshalb folgende Parameter auf ihre Auswirkung auf die ersten drei Eigenfrequenzen untersucht

- unterschiedliche Stützenstellungen, -Querschnitte und -Verteilungen
- Laufplatten der Treppenanlage
- Wandscheiben der Treppenanlage
- Reduzierung des Eigengewichts der Deckenkonstruktion

Die Basisvariante entstand aus architektonischen Vorgaben. Den Stützen wurden als Vollquerschnitte mit einem Durchmesser von 100mm, die Deckenkonstruktion als Stahlbetonplatte mit 35cm Stärke angenommen. Die Sensitivitätsanalysen erfolgten für den Lastfall Eigengewicht mit FE- Modellen, die in Karamba3d generiert wurden. Für die weiterführenden Analysen (Stützenkräfte, Stützenbemessung, Optimierung Profile, Auswirkung weiterer Bauteilmassen für die Eigenfrequenz, Einfluss Deckenkonstruktion auf Tragverhalten des Gesamtsystems) wurde die Software RFEM eingesetzt.

Für die Variationen der Stützenstellungen wurden maximale Neigungen in x- und y - Richtung und die Fusspunkte definiert. Das Basis FE-Modell (ohne Treppenanlage) wies für die 1. und 2. Eigenfrequenz (Mx, My) Werte deutlich unter 1,0 Hz auf. Die 3. Eigenfrequenz (Torsion) lag bei ca.1,0 Hz. Als erste mögliche Variation wurde eine Anpassung der Stützenpositionen in den Eckbereichen des Erdgeschoßes vorgenommen, so dass durchgehende Stützenverläufe zwischen EG und OG1 gewährleistet sind. Dadurch wird eine geringe Erhöhung der Eigenfrequenz um ca. 8 % erreicht. Durch eine zusätzliche Verdichtung dieser Bereiche (zusätzliche Stützen) kann eine Erhöhung der Eigenfrequenz um insgesamt 13 % erreicht werden. Wird die Verdichtung mit über den Geschossen durchlaufenden Stützenverläufe kombiniert erhöht sich die Eigenfrequenz weiter.

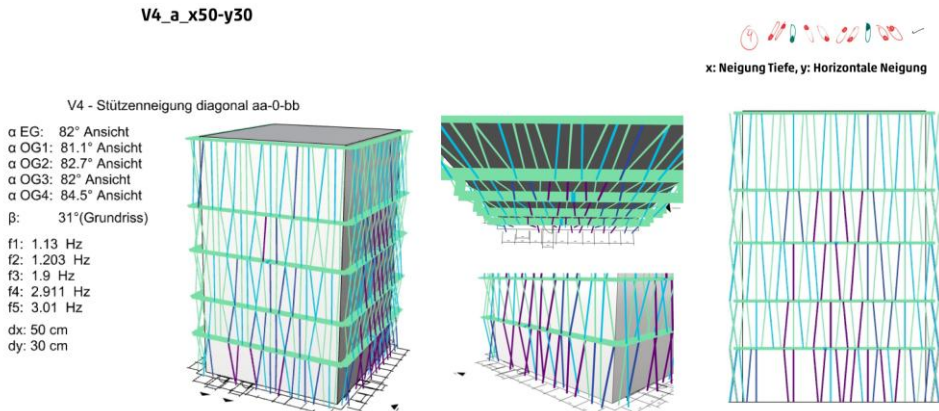


Abbildung 4: Sensitivitätsanalyse Einfluss der Stützenstellungen auf die Eigenfrequenz des Haupttragwerks, Werkzeugumgebung Rhino3d/GH/Karamba3d, Grafik: B+G

In weiteren Variationen wurden unterschiedliche Neigungen, Positionen bzw. Verteilungen der Stützen und die Erhöhung der Stützenquerschnitte untersucht. Zunächst wurden die Stützen des Basismodells stärker geneigt, wodurch ein um 150 mm vergrößerter Hebelarm entsteht. Diese Variation hat keinen Einfluss auf die Eigenfrequenz. Dagegen verursacht eine Verkleinerung der Stützenabstände zu den Ecken gegenüber einer Aufweitung in den Mittelbereichen eine Erhöhung der Eigenfrequenz um 14 %. Eine Erhöhung der Steifigkeit

der Stützen durch um 30% vergrößerte Stützenquerschnitte führt zu einer deutlichen Erhöhung der Eigenfrequenz um ca. 18 %.

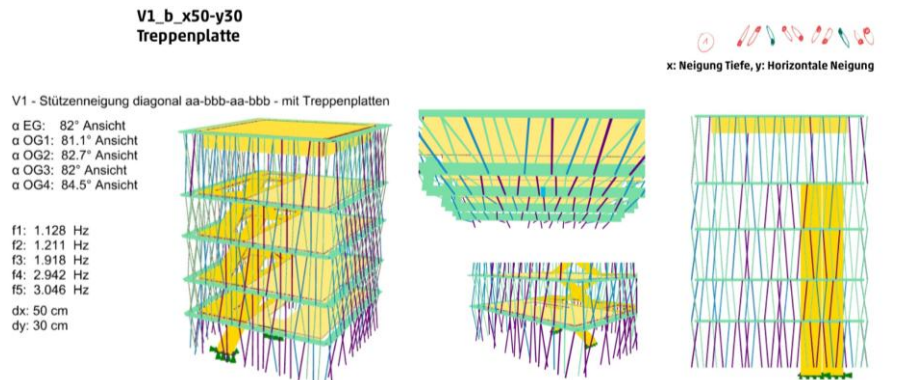


Abbildung 5: Sensitivitätsanalyse Einfluss der Treppenläufe auf die Eigenfrequenz des Haupttragwerks, Werkzeugumgebung Rhino3d/GH/Karamba3d, Grafik: B+G

Im nächsten Schritt wurden die Möglichkeiten der Erhöhung der Gesamtsteifigkeit der Struktur und damit der Eigenfrequenzen durch die Berücksichtigung weiterer Konstruktionselemente analysiert. Die Aktivierung der Laufplatten der gegenläufigen Treppe als Tragelemente im Strukturmodell erzeugt eine X-förmige Verbindung zwischen den Geschosdecken (siehe Abb. 5) und erhöht die Eigenfrequenz gegenüber der Basisvariante um ca. 20%.

Die Mittelwand zwischen den Treppenläufen stellt eine Z-förmige vertikale Scheibe dar (siehe Abb. 7). Ein zusätzliches Heranziehen dieser Scheibe erhöht die Eigenfrequenz um bis zu 45,0%. Die Außenwände des Treppenanlage bilden ähnlich zur Mittelwand vertikale Z-förmige Scheiben. Werden diese ebenfalls in das Tragwerk integriert, erhöht sich die Eigenfrequenz weiter deutlich.

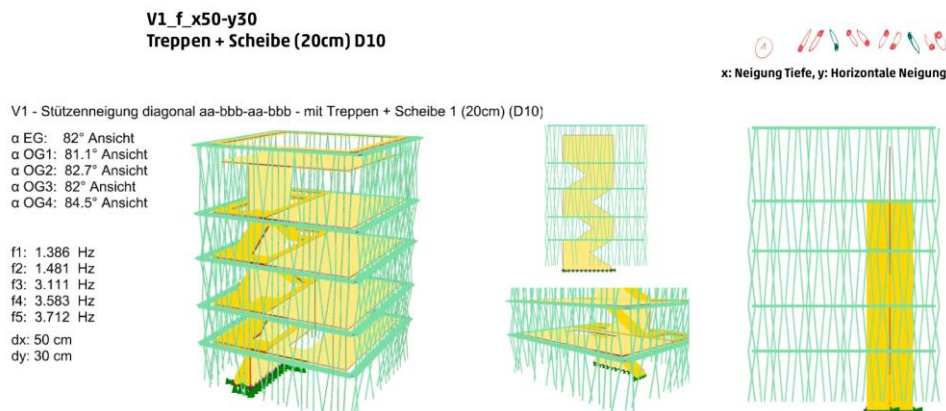


Abbildung 6: Sensitivitätsanalyse Einfluss der Wände Fluchtreppen auf die Eigenfrequenz des Haupttragwerks, Werkzeugumgebung Rhino3d/GH/Karamba3d, Grafik: B+G

Verschiedene Kombinationen des Schwingungsverhalten verbessernder Maßnahmen zeigen, dass nicht alle Effekte synergetisch wirken können. Durch die Konzentration von Stützen zu den Gebäudeecken wird das Trägheitsmoment insbesondere gegenüber der Torsion verbessert. Unter Einbeziehung der Wandscheiben des Treppenhauses verlagert sich der Schubmittelpunkt exzentrisch, so dass der Effekt aus der Konzentration der Stützen in den Gebäudeecken vernachlässigbar ist. Interessant ist, dass bei der Konstruktion, welche in ihrem Prinzip schwingungsanfällig ist, eine Erhöhung der Stützenquerschnitte im Vergleich zu geometrischen Änderungen, geringen Einfluss auf die Eigenfrequenz hat.

Auf der Grundlage aller Studien entstanden geometrische Grundregeln für die Positionierung und Ausrichtung der "tanzenden" Stützen" (max 87° Neigung der Stützen, Ausrichtung auf 4 Grundrisslinien mit einem Versatz von 45° oder 90° zueinander) die statischen, gestalterischen und baukonstruktiven Fragen miteingeschlossen. Die finale Form des Stabwerks wurde über diese Regeln generiert und bildete die Basis der Optimierung zum Erreichen einer ausreichend hohen Eigenfrequenz des Gesamttragwerks.

Zur Reduzierung der aufgehenden Bauwerksmasse, welche maßgebend das Schwingungsverhalten bestimmt, wurden verschiedene Stahlbetonvarianten der Deckenkonstruktion (Hohlkörperdecken, Rippendecken etc.), Stahlbaulösungen und schlussendlich Holzbausysteme untersucht. In allen Variationen zeigte sich eine sehr positive Beeinflussung der Eigenfrequenzen durch die Reduktion des Konstruktionsgewichts der Deckenkonstruktion.

3.2 Konstruktionsentwicklung

Der Wettbewerbsentwurf hatte als Deckenkonstruktion eine von Randträger zu Randträger freitragende vorgespannte Stahlbetonplatte vorgesehen. Die Formfindungsstudien für das Stabwerk (siehe 3.1) und die allgemeine entwurfliche Weiterentwicklung stellten dieses Konstruktionsprinzip grundsätzlich in Frage. Neben der Frage, ob eine monolithische Stahlbetonkonstruktion für ein so exemplarisches Bauwerk ein zukunftsweisendes Tragsystem in Hinblick auf GWP und Zirkularität ist, entwickelte sich auch aus den baukonstruktiven und bauphysikalischen Detailfragen sowie Fragen des Bauablaufs die Suche nach Konstruktionsweisen mit hohem Vorfertigungsgrad und Präzision. Die Lösungsmöglichkeiten für diese Multikriterien-Fragestellung entstanden durch den gedanklichen Sprung zum Werkstoff Holz als Material für die Deckenkonstruktion und letztendlich aller tragenden Innenbauteile. Für die Deckenkonstruktion reduzierte die relativ große Spannweite von ca. 12m die Auswahlmöglichkeit an Bauweisen. Die ersten Überlegungen fokussierten sich deshalb auf eine 40cm starke Kastendecke. Aufgrund der fehlenden ausreichenden zweiachsigen Lastabtragung und den sich daraus ergebenden notwendigen Abfangkonstruktionen um die großen Öffnungen des Treppenhauses (siehe Abb. 7) entstand die Notwendigkeit einer weiteren wichtigen Entwurfsentscheidung oder gedanklichen Sprung. Aus der Interpretation des schmalen Haustechnikschachts als Tragelement, mit Holzstützen als Querwände entstand die Möglichkeit eines Abfangeträgers mit geringer Bauhöhe und die Reduktion der max. Spannweite der Deckenplatten auf 7m. Dadurch wurde der Einsatz einachsig gespannter Brettspertholzplatten für beide Haupttragrichtungen der Deckengrundrisse möglich. Auch die Realisierung der Öffnungen für den Aufzug und das Treppenbauwerk ließen sich sehr einfach lösen (siehe Abb. 7).

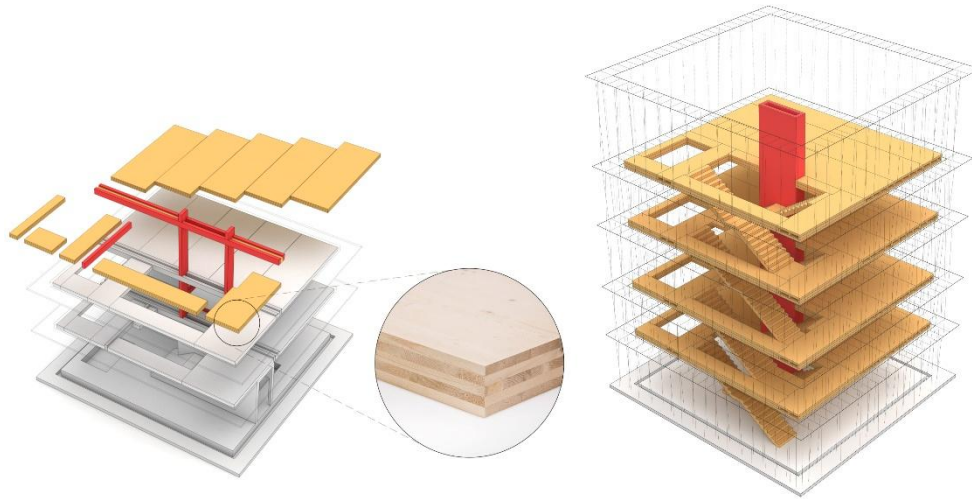


Abbildung 7: Tragelemente der Deckenkonstruktion: Deckenplatten aus Brettsper Holz (BSP), Trägern und Stützen aus Baubuche, Grafik: B+G

Das ursprüngliche Konzept der Abtragung der horizontalen Einwirkungen aus Wind und Imperfektionen beruhte auf der Aktivierung der lokal und global aussteifenden Rahmentragwirkungen der unterschiedlich geneigten und zueinander versetzten Stahlstützen. Ein aussteifender Kern war explizit nicht vorgesehen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zur Formfindung des Stabwerks (siehe 3.1) hatte sich der erhebliche Einfluss der Treppenläufe und eventueller Treppenhauswände gezeigt. Mit der Entscheidung, alle inneren Bauteile aus Holzwerkstoffen auszuführen, ergaben sich auch für die Elemente der Treppenanlage neue statische Potentiale. Da ein Teil der Treppenanlage als Fluchraum mit Wänden von den freien Grundrissen der Geschosse getrennt werden musste, konnten Wandscheiben aus CLT-Elementen geplant werden. Entsprechend ihrer Steifigkeit (unter Berücksichtigung ihres nachgiebigen Verbunds) übernehmen diese Elemente einen Teil der Lastabtragung der horizontalen Einwirkungen in beide Gebäuerichtungen. Allerdings schränken die geometrischen architektonischen Randbedingungen ihre aussteifende Wirkung deutlich ein. Die Wandscheiben parallel zu den Treppenläufen sind nicht durchgehend in einer Länge gehalten, sondern folgen der Treppe in einem z-förmigen Verlauf. Die fassadenseitige Südwand läuft vertikal nicht durch, sondern bildet nur geschossweise einen Raumabschluss. Das Treppenhaus stellt ein hybrides räumliches Flächentragwerk dar, das mit dem außenliegenden Stabtragwerk interagiert.

Die entstehende hybride Tragwirkung des Stahl- Holztragwerks wurde in einem FE-Gesamtmodell in RFEM simuliert, das zur Ermittlung von Schnittgrößen und Verformungen in unterschiedlichen Grenzwertbetrachtungen diente (siehe Abb. XX). Die Bemessung der einzelnen Tragelemente erfolgte über teilautomatisierte Routinen in einem Tabellenkalkulationsprogramm (EXCEL). Für die Modellierung in RFEM aus einem in Rhino erzeugten Geometriemodell wurde erneut ein GH-Plug-In genutzt. Das hybride Gesamtmodell diente auch der Bestimmung der Eigenfrequenzen zur Ermittlung der Windlasten durch den Windgutachter. Die final ermittelten Werte nach Abschluss der Ausführungsplanung lagen etwas über den im Entwurf ermittelten und dem Windgutachten zu Grunde liegenden Werten. Schlussendlich wurde durch den Materialwechsel für die

Deckenkonstruktionen und die Treppenanlage das Eigengewicht des Gesamttragwerks deutlich reduziert, die Eigenfrequenzen positiv beeinflusst und damit das Erreichen des Entwurfsziels der “tanzenden” schlanken Außenstützen ermöglicht (siehe Abb. 3).

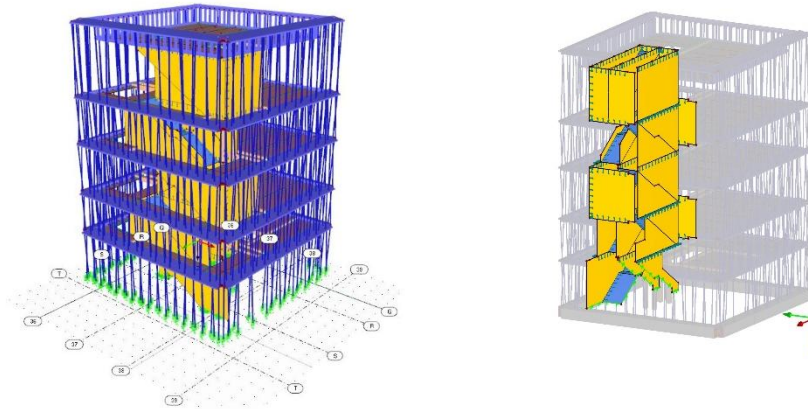


Abbildung 8: Gesamtmodell der Tragkonstruktion. Modellierung in Dlubal RFEM über ein GH-Plug-In aus dem Geometriemodell, Grafik: B+G

4 Schlussfolgerung

Die Entwicklung der Gesamtkonstruktion demonstriert sehr anschaulich die Möglichkeiten eines computergestützten Konstruktionsentwurfs, aber auch seinen grundsätzlich hybriden Charakter als Dialog zwischen Menschen und Maschine. Ausgangspunkt ist das der Entwurf von Architektur oder Baukunst nicht nur ein technischer, sondern auch ein kultureller Prozess ist, der nur abschnittsweise algorithmisch zu lösen ist. Im Fall des neuen Turms des Bauhaus Archivs entstand die Inspiration zum Gestaltungskonzept durch die Möglichkeiten aus einer großen Anzahl computeranalysierter Tragwerksvarianten. Die Möglichkeit durch computergestützte Experimente explizites und implizites Wissen als Lösungsmethode zu kombinieren, fand seine Fortsetzung bei weiteren Konstruktionsentwicklung. Die dabei programmatisch entstehende Komplexität einer Mehrfachzieloptimierung wurde dabei erfolgreich mit „sprunghafte“ Entscheidungen aufgrund der experimentell ermittelten Erfahrungen beantwortet. Grundvoraussetzung war eine sehr intensive und konstruktive interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Planungspartner, bis hin zum Prüfenieur für Standsicherheit (sbp vertreten durch Thomas Schoknecht) und den ausführenden Firmen.

Literatur

- [1] Gengnagel C. und Débonnaire M.: Der Turm des Bauhaus-Archivs – die Entwicklung eines hybriden Stahl- Holztragwerks. Bauingenieur Nr. 06 (2023), S. 179- 187
- [2] Gengnagel, C Apellaniz D.: LCA im Konstruktiven Entwurf – aktuelle Praxis und Ausblick, nbau - Nachhaltig Bauen Nr. 3(2023), Ernst & Sohn, S. 23-31