

DIPLOMA THESIS

OPTI_BIM: Development of a digital method for variant analysis of industrial structures using Parametric Design & Building Information Modeling

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

OPTI_BIM: Entwicklung einer digitalen Methode zur Variantenuntersuchung von Industriebautragwerken mittels Parametric Design & Building Information Modeling

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Philipp Ruffinatscha

Matr.Nr.: 01515921

unter der Anleitung von

Univ.Prof.in Dipl.-Ing. Dr.in techn. Iva Kovacic
Dipl.-Ing. Dr.in techn. Julia Reisinger

Institut für Hoch- und Industriebau
Forschungsbereich Integrale Planung und Industriebau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/210-01, A-1040 Wien

Wien, im Juni 2023

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Kurzfassung

Die frühe Planungsphase von Industriegebäuden ist eine wichtige Phase für die Entscheidungsfindung, da sie sich direkt auf die Kosten und die Nachhaltigkeit des endgültigen Projekts auswirkt. In diesem Zusammenhang kann die Verknüpfung von Building Information Modeling (BIM) und Parametric Design während des frühen Entwurfsprozesses wertvolles Feedback zu Kosten und Lebenszyklusanalyse (LCA) liefern. Die Interoperabilität zwischen diesen beiden Ansätzen ist jedoch sehr begrenzt, was die potenziellen Vorteile ihrer kombinierten Nutzung behindert.

In dieser Arbeit wird ein Framework für die interoperable Anwendung von Parametric Design und BIM in der frühen Entwurfsphase von Industriegebäuden vorgestellt. Das vorgeschlagene Framework integriert parametrische Entwurfswerkzeuge mit einer BIM-Plattform und ermöglicht die Erstellung und Analyse von Entwurfsvarianten in Echtzeit. Das Feedback zu den Kosten und der Ökobilanz wird in die BIM-Software integriert. Zur Veranschaulichung der Anwendung des vorgeschlagenen Frameworks wird eine Fallstudie vorgestellt, die sich auf die Anwendung des Frameworks bei der Planung eines Industriegebäudes konzentriert. Mit Hilfe des vorgeschlagenen Frameworks konnte schnell eine Reihe von Entwurfsvarianten erstellt und in einer BIM-Software bewertet werden, wobei sowohl finanzielle als auch ökologische Aspekte des Industriebaus berücksichtigt wurden. Dies ermöglicht es dem Planer, fundierte Entscheidungen hinsichtlich des optimalen Entwurfs zu treffen.

Insgesamt stellt das vorgeschlagene Framework einen vielversprechenden Ansatz zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in der frühen Entwurfsphase von Industriegebäuden dar. Das Framework hat dadurch das Potenzial, den Entwurf von Industriegebäuden zu revolutionieren, indem es durch die integrierte Anwendung von Parametric Design und BIM eine schnelle und genaue Bewertung mehrerer Entwurfsvarianten unter Berücksichtigung finanzieller und ökologischer Aspekte in BIM ermöglicht

Abstract

The early design phase of industrial buildings is an important phase for decision making as it directly affects the cost and sustainability of the final project. In this context, linking Building Information Modeling (BIM) and Parametric Design during the early design process can provide valuable feedback on cost and life cycle analysis (LCA). However, interoperability between these two approaches is often limited, hindering the potential benefits of their combined use.

This paper presents a framework for the interoperable application of parametric design and BIM in the early design phase of industrial buildings. The proposed framework integrates parametric design tools with a BIM platform and enables the creation and analysis of design variants in real time. Feedback on cost and LCA is integrated into the BIM software. To illustrate the application of the proposed framework, a case study is presented that focuses on the application of the framework in the design of an industrial building. Using the proposed framework, a number of design alternatives could be quickly created and evaluated in BIM software, taking into account both financial and environmental aspects of industrial building. This enables the designer to make informed decisions regarding the optimal design.

Overall, the proposed framework represents a promising approach to support decision making in the early design phase of industrial buildings. As a result, the framework has the potential to revolutionize the design of industrial buildings by enabling a rapid and accurate evaluation of multiple design options, taking into account financial and environmental aspects in BIM, through the integrated application of Parametric Design and BIM.

Abkürzungsverzeichnis

AEC	Architecture, Engineering, and Construction
API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Modeling
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
FT	Fertigteil
GWP	Global Warming Potential
IFC	Industry Foundation Classes
JSON	JavaScript Object Notation
LCA	Life cycle assessment
LCC	Life cycle costs
MJ	Mega Joule
PENRT	Primary energy non-renewable, total
PERT	Primary energy renewable, total
PLGO	Production Layout Generation and Optimization
PMOOD	parametric framework for multi-objective optimization and decision support
REST	Representational State Transfer
SO ₂	Schwefeldioxid
STB	Stahlbeton
URL	Uniform Resource Locator

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, um all jenen zu danken, die mich während der Erstellung meiner Diplomarbeit unterstützt und begleitet haben.

Insbesondere gilt mein aufrichtiger Dank meiner Betreuerin, Dipl.-Ing. Dr.in techn. Julia Reisinger, für ihre fachliche Expertise und wertvolle Anleitung. Ihr kontinuierliches Feedback waren von unschätzbarem Wert für den Erfolg dieser Arbeit. Ebenso gebührt Frau Univ.Prof.in Dipl.-Ing. Dr.in techn. Iva Kovacic und Herr Ing. Markus Schlaffer mein herzlicher Dank für ihre wertvollen Anregungen und die großzügige Bereitschaft, ihre Zeit und ihr Wissen mit mir zu teilen.

Mein aufrichtiger Dank geht an meinen Bruder Samuel. Er hat mir eindrucksvoll vor Augen geführt, wie wichtig es ist, seine Träume zu verfolgen und auf dem Weg zum persönlichen Erfolg Risiken einzugehen. Seine ständige Unterstützung und Ermutigung waren eine große Bereicherung für die Erstellung dieser Arbeit.

Meinen Eltern, Emma und Karim, danke ich von Herzen für ihre Unterstützung und Motivation, nicht nur während der Anfertigung dieser Arbeit, sondern während meines gesamten Studiums. Ohne sie wäre mein Weg nicht möglich gewesen.

Abschließend möchte ich meiner Partnerin Laura für ihre Unterstützung, Geduld und Verständnis während der gesamten Zeit danken. Du hast mich in schwierigen Momenten aufgefangen und mir immer wieder den nötigen Rückhalt gegeben.

I Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Problemstellung	9
1.2	Zielsetzung und Forschungsfragen	10
2	State of the Art und Literaturrecherche	11
2.1	Building Information Modeling (BIM)	11
2.2	Parametric Design.....	13
2.3	Integrale Anwendung von Parametric Design und BIM	14
3	Methodische Vorgehensweise für die Entwicklung des Frameworks	15
3.1	Programmierung und Implementierung.....	15
3.1.2	Verwendete Softwareprodukte	15
3.1.2.1	Parametric Design Tool	15
3.1.2.2	Cloudbasierte Datenaustauschplattform	15
3.1.2.3	BIM-basierte Modellierung	16
3.2	Forschungsansatz.....	16
3.3	Variantenstudie	17
4	Framework Proposal – OPTI_BIM	19
4.1	Schnittstelle Parametric Design Tool und BIM-Software.....	22
4.1.1	Komponenten des Datenaustauschs	22
4.1.1.1	Client.....	23
4.1.1.2	REST-API.....	24
4.1.1.3	Webserver	26
4.1.1.4	Datenaustauschformat	26
4.1.1.5	Einbindung der parametrischen Berechnungen im BIM	27
4.2	Anforderungen an die Sicherheit und Datenschutz	29
5	Implementierung des Frameworks	30
6	Plausibilisierung des Forschungsansatzes	36

I Inhaltsverzeichnis

6.1	Realer Anwendungsfall	36
6.2	Grundlagen der Plausibilisierung	37
6.2.2	Kostenermittlung	40
6.2.2.1	Modell 1 – PMOOD Modell	42
6.2.2.2	Modell 2 – OPTI_BIM-Modell	43
6.2.2.3	Modell 3 – Reales BIM-Modell des realen Anwendungsfalls	44
6.2.3	Kostenvergleich	45
7	Variantenstudie	47
7.1	Workflow	47
7.2	Variantendefinition	53
7.2.2	Variante 1 – Holztragwerk	53
7.2.3	Variante 2 – Betontragwerk	54
7.2.4	Variante 3 – Stahltragwerk	56
7.2.5	Vergleich der Ergebnisse	57
8	Schlussfolgerung	60
	Literaturverzeichnis	62
	Abbildungsverzeichnis	64
	Tabellenverzeichnis	66
	Anhang A: Kostenberechnung Reales BIM Modell	67
	Anhang B: Kostenberechnung OPTI_BIM Modell	69

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im heutigen Zeitalter der Digitalisierung und Automatisierung werden Planung und Konstruktion von Industriebauten zunehmend durch den Einsatz von computergestützten Werkzeugen geprägt. Insbesondere das Building Information Modeling (BIM) hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen und wird von vielen Planer:innen und Ingenieur:innen als zukunftsweisende Methode für die Erstellung von digitalen Gebäudemodellen angesehen. Dabei werden alle relevanten Informationen über das Bauvorhaben in einem digitalen Modell zusammengeführt und können von verschiedenen Akteuren während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes genutzt werden. Eine weitere Methode, die im Kontext der Planung von Industriebauten immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist das parametrische Design. Hierbei werden Modelle nicht nur auf der Grundlage von geometrischen Formen erstellt, sondern auch durch die Verwendung von Parametern gesteuert, die es ermöglichen, verschiedene Varianten des Modells schnell und einfach zu generieren. Ein großer Vorteil der Durchführung von Variantenstudien direkt in BIM besteht darin, dass der Modellierungsaufwand für die Modelle entfällt, sollte eine geeignete Variante gefunden werden. Dadurch kann Zeit und Arbeitsaufwand gespart werden, was zu einer effizienteren Planung führt. Zudem können durch die Integration von BIM alle relevanten Informationen über das Bauvorhaben in einem digitalen Modell zusammengeführt werden, was zu einer besseren Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren führt. So können z.B. Kollisionsprüfungen oder Simulationen durchgeführt werden, um potenzielle Probleme bereits im Voraus zu identifizieren und zu lösen.

Allerdings gibt es bei der Integration von Parametric Design und BIM auch einige Herausforderungen. Insbesondere die fehlende Interoperabilität zwischen den verschiedenen Softwareanwendungen kann zu Problemen führen. Dies hat zur Folge, dass sich die Ergebnisse aus den parametrischen Entwurfswerkzeugen nur schwer in die BIM-Softwareprodukte importieren lassen. Traditionelle Datenaustauschformate wie das Industry Foundation Classes (IFC) sind nicht effizient genug, um die Anforderungen von Variantenstudien zu erfüllen. Wenn die Ergebnisse aus den parametrischen Design-Tools in das BIM-Modell importiert werden, erscheinen diese oft als sogenannte „dumme“ Geometrie ohne jegliche Informationen. Dies erschwert die weitere Bearbeitung im BIM-Modell und führt zu unnötigen Verzögerungen bei der Entwurfsentwicklung.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, ein Framework zu entwickeln, das eine interoperable Anwendung von Parametric Design und BIM ermöglicht, um Variantenstudien für Tragwerksmodelle von Industriebauten mit Feedback zu Kosten und LCA in BIM in der frühen Planungsphase von Industriebauten zu ermöglichen.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden folgende Forschungsfragen in dieser Arbeit behandelt:

1. Wie können Parametric Design Modelle in eine BIM-fähige Modellierungsumgebung effizient überführt werden, um Variantenstudien in BIM durchzuführen?
2. Wie können Kosten und LCA-Aspekte in die Variantenstudien integriert und in BIM dargestellt werden?
3. Wie können die Ergebnisse der Variantenstudien in der BIM-Software für eine effiziente Weiterbearbeitung der ausgewählten Variante genutzt werden?

Die Beantwortung dieser Forschungsfragen wird dazu beitragen, die Planung von Industriegebäuden zu verbessern und eine effiziente, interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Architekten, Ingenieuren und Fachleuten zu ermöglichen.

2 State of the Art und Literaturrecherche

Das Kapitel 2 stellt den aktuellen Stand der Forschung und der Praxis in Bezug auf die kombinierte Anwendung von Parametric Design und Building Information Modeling dar. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen und Konzepte von BIM und Parametric Design beschrieben und die Zusammenführung beider Ansätze in der integralen Anwendung erläutert. Es werden zudem verschiedene Softwarelösungen vorgestellt, die für die integrale Anwendung von Parametric Design und BIM genutzt werden können.

Im ersten Teil, Kapitel 2.1, wird die grundlegende Technologie von BIM behandelt. Hierfür werden die wichtigsten Konzepte von BIM vorgestellt, wie sie zur Verbesserung der Zusammenarbeit und zur Optimierung des Planungsprozesses eingesetzt werden können. Kapitel 2.2 widmet sich dem Thema Parametric Design. Dafür werden die Grundlagen dieses Planungsansatzes sowie dessen aktuelle Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis hervorgehoben. In Kapitel 2.3 wird die integrale Anwendung von Parametric Design und BIM vorgestellt. Es wird erläutert, wie BIM und Parametric Design in Kombination genutzt werden können, um komplexe Gebäudegeometrien zu erzeugen und diese anschließend in BIM weiterzuverarbeiten. Es wird zudem auf die Vorteile und Herausforderungen dieser integralen Anwendung eingegangen. Abschließend wird in Abschnitt 2.4 das Thema Variantenstudien im BIM-basierten Workflow behandelt. Hierfür werden verschiedene Ansätze vorgestellt, die für die Durchführung von Variantenstudien im BIM-basierten Workflow genutzt werden können.

2.1 Building Information Modeling (BIM)

Das Prinzip von BIM wurde bereits 1974 von Charles M. Eastman in seiner Publikation „*An outline of the building description system*“ thematisiert. Erst im Jahre 1992 wurde der Begriff „Building Information Modeling“ erstmals verwendet. (Egger, Hausknecht et al. 2013)

Building Information Modeling basiert auf der Erstellung eines virtuellen dreidimensionalen Modells, dem sogenannten Building Information Model oder Gebäudeinformationsmodell. Das Gebäudeinformationsmodell ist das zentrale Element von BIM und wird von den Projektbeteiligten während des gesamten Lebenszyklus (Entwurf-Planung-Ausführung-Umbau-Abbruch) des Projekts mit geometrischen und semantischen Informationen ergänzt. Geometrische Informationen sind alle auf die Geometrie bezogenen Informationen. Semantische Informationen sind Kosteninformationen, Bauteil- oder Typinformationen sowie Informationen zum Zeitmanagement. BIM zeichnet sich dadurch aus, dass nur ein einziges

Gebäudeinformationsmodell erstellt wird und alle Projektbeteiligten daran arbeiten. (Borrmann, König et al. 2018)

Die konsequente Nutzung des Gebäudeinformationsmodells ermöglicht einen beschleunigten Datenaustausch und gewährt den Projektbeteiligten Zugriff auf Gebäudeinformationen. Dadurch wird die Zusammenarbeit zwischen mehreren am Projekt beteiligten Personen erleichtert. (Azhar 2011) Die Möglichkeit zur Bereitstellung aller Informationen im Gebäudeinformationsmodell verschafft dem Auftraggeber zudem erhebliche Vorteile in Bezug auf Kosten, Nachhaltigkeit und Terminalsicherheiten. (Egger, Hausknecht et al. 2013) Kosten werden klar und überschaubar, da den im Gebäudeinformationsmodell vorzufindenden Objekten Kosteninformationen zugeordnet werden können. Darüber hinaus können sich Nachhaltigkeitsparameter in den semantischen Gebäudeinformationen befinden. Auf diese Weise können bereits in der Frühphase des Projekts nachhaltige Materialien in die Planung des Gebäudes miteinbezogen werden. (Albrecht 2014)

Ein wesentlicher Unterschied der BIM-gestützten Prozesse gegenüber konventionellen Planungsprozessen ist die frühzeitige Verlagerung von planungsrelevanten Abläufen. Dadurch entsteht ein wesentlicher Einfluss auf die Planung und die Kosten eines Projekts, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist.

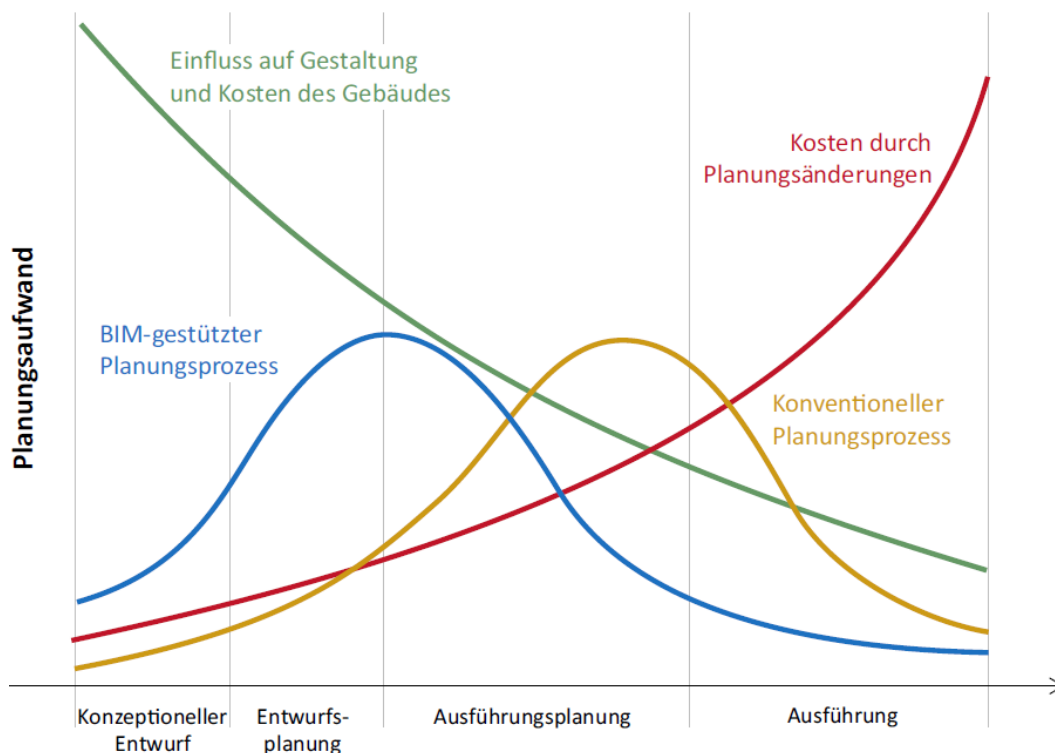


Abbildung 1 - Aufwandsverlagerung (Borrmann, König et al. 2018)

Der Grund dafür ist der hohe Aufwand bei der Erstellung des Gebäudeinformationsmodells. Dies hat aber den Vorteil, dass bereits in der Frühphase eines Bauprojekts Simulationen durchgeführt werden können, die einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung des Projekts haben. Spätere Änderungen im Projekt können durch die Existenz des Gebäudeinformationsmodells einfach und ohne großen finanziellen Aufwand vorgenommen werden. Im traditionellen Planungsprozess beginnt der große Arbeitsaufwand in einer späteren Phase des Projekts, jedoch können Änderungen am Projekt schwierig sein und zu kostenintensiven Problemfeldern führen. (Borrmann, König et al. 2018)

In der folgenden Tabelle 1 sind führende Softwareprodukte aufgeführt, die für die BIM-basierte Gebäudeplanung eingesetzt werden können.

Softwareprodukt	Hersteller	Sparte
Revit	Autodesk	Architektur, Ingenieurwesen, Bauwesen
Archicad	Graphisoft	Architektur
Vectorworks	Vectorworks	Architektur, Landschaftsbau, Innenarchitektur
Tekla Structures	Trimble	Stahlbau, Ingenieurwesen

Tabelle 1 - BIM-Softwareprodukte

2.2 Parametric Design

Parametric Design ist eine Planungsmethode, die im Bauwesen immer mehr an Bedeutung gewinnt. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Methode der "intelligenten" Modellierung, die es den Planern ermöglicht, verschiedene Szenarien eines Gebäudes zu erstellen und zu analysieren. Die Funktionsweise des parametrischen Designs beruht auf der Definition von Parametern, die die Form und Größe der einzelnen Bauteile und Elemente bestimmen. Diese Parameter können dann entweder manuell oder automatisch modifiziert werden, wodurch sich das Modell entsprechend ändert. Beispielsweise kann die Breite, Höhe oder Länge einer Industriehalle parametrisiert werden. Änderungen an einem dieser Parameter haben Auswirkungen auf das gesamte Modell, wodurch der Designer schnell verschiedene Szenarien des Gebäudes analysieren und vergleichen kann. Einer der größten Vorteile von Parametric Design ist die Möglichkeit, komplexe Geometrien und Strukturen zu entwerfen. Durch die Verwendung von parametrischen Modellen können Entwürfe erstellt werden, die mit traditionellen Methoden somit teils nur schwer oder gar nicht realisierbar wären. Des Weiteren können durch die Verwendung von Parametern verschiedene Entwurfsvarianten schnell und effektiv getestet werden, was zu besseren Planungsergebnissen in den Frühphasen einer

Projektplanung führt. Der Entwurf kann schneller und präziser umgesetzt werden, was somit Zeit und Kosten spart. Trotz der vielen Vorteile von Parametric Design im Bauwesen gibt es auch einige Nachteile, die berücksichtigt werden müssen. Einer der größten Nachteile ist die Notwendigkeit von speziellen Kenntnissen und Fähigkeiten. Der Designer muss in der Lage sein, die mathematischen Zusammenhänge zu verstehen und sie in der Modellierungsumgebung umzusetzen. Ein weiterer Nachteil ist die Tatsache, dass sich der Entwurf rein auf die verwendeten Parameter stützt. Sollte ein wichtiger Parameter nicht richtig definiert sein, so kann dies zu einer fehlerhaften Konstruktion führen. (Mourtis and Boyle 2022)

Zu den bekannten Softwareprodukten für parametrisches Design gehören unter anderem Grasshopper (Grasshopper 2023) als Add-On zum Modellierprogramm Rhinoceros3D (Rhinoceros3D 2023) und Dynamo (Dynamo 2023) als Add-On zum BIM-Softwareprodukt Revit. (Autodesk-Inc. 2023)

2.3 Integrale Anwendung von Parametric Design und BIM

Die Integrale Anwendung von Parametric Design und BIM ermöglicht die Erstellung eines parametrischen BIM-Modells. Der Prozess beginnt dabei mit der Erstellung eines Modells, das eine parametrisierte Geometrie eines Gebäudes beinhaltet. Mithilfe von Regeln und logischen Randbedingungen können verschiedene Varianten des Modells erzeugt werden und diese in Echtzeit in einer BIM-Umgebung analysiert und visualisiert werden. Des Weiteren werden durch die Verknüpfung des Parametric Design Tools mit dem BIM-Programm Änderungen am parametrischen Modell automatisch im BIM-Modell aktualisiert. Sollte im Zuge einer parametrischen-bim-basierten Variantenstudie eine geeignete Variante gefunden werden, so kann das BIM-Modell der Variante ohne Zeitverzögerung weiterverarbeitet werden.

Software	Hersteller	Kombatible Softwareprodukte	Datenaustausch-Methode	Aktiv	Letztes Update
Speckle Systems	AEC Ltd.	Dynamo...	Cloud	Ja	2023
Geometry Gym	Geometry Gym	Revit, Grasshopper, Rhino	.ifc (Lokal)	Ja	2022
Grevit	Grevit	Grasshopper, Rhino, Sketchup	Cloud	Nein	2021
Hummingbird	Hummingbird	Grasshopper, Revit	.csv (Lokal)	Nein	2016
Flux	Google	Dynamo, Revit	Cloud	Nein	2018

Tabelle 2 - Softwareprodukte zur kombinierten Nutzung von BIM und parametrischer Planung (Vignek 2017)

Wie in Tabelle 2 ersichtlich wird, sind nur eine geringe Anzahl von Softwareprodukten auf dem Markt, welche tatsächlich eine integrale Anwendung von Parametric Design Tools und BIM-Softwareprodukten ermöglichen.

3 Methodische Vorgehensweise für die Entwicklung des Frameworks

In dieser Arbeit wird ein Framework vorgestellt, das es erlaubt, mit einem parametrischen Entwurfsprogramm entwickelte Tragwerke von Industriegebäude in eine BIM-Software zu überführen, um Variantenstudien in BIM durchzuführen. Für die praktische Validierung und Anwendung des Frameworks wird das Parametric Design Tool PMOOD-Tool (Reisinger, Wang-Sukalia et al. 2022), welches im Rahmen des Forschungsprojekts BIM-Flexi (Österreichische Förderungsgesellschaft (FFG), Programm „30-Ausschreibung BRIDGE 1“ vom Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Projektnummer 877159) (Reisinger, Kugler et al. 2022) (Reisinger 2022) entwickelt wurde, herangezogen.

Im folgenden Kapitel 3.1 werden die für die praktische Implementierung des Frameworks eingesetzten Softwareprodukte aufgeführt.

3.1 Programmierung und Implementierung

3.1.2 Verwendete Softwareprodukte

3.1.2.1 Parametric Design Tool

Ein Parametric Design Tool ermöglicht es Benutzern, komplexe Geometrien und Designs durch visuelle Programmierung zu erstellen, indem sie Parameter und Regeln über eine grafische Benutzeroberfläche manipulieren. Eines der Hauptmerkmale dieser Tools ist die Fähigkeit, parametrisch entwickelte Designvarianten zu erzeugen. Dies ermöglicht ein hohes Maß an Flexibilität und Iteration im Designprozess, da der Benutzer schnell und einfach verschiedene Variationen seines Designs ausprobieren kann. (Gu, Yu et al. 2018)

Im Rahmen dieser Arbeit wird das im Forschungsprojekt BIM Flexi entwickelte parametrische Entwurfswerkzeug PMOOD-Tool (Reisinger, Kugler et al. 2022) zur Implementierung und Prüfung des im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Frameworks (OPTI_BIM) verwendet. Das PMOOD-Tool, basierend auf Grasshopper, ermöglicht die automatisierte Berechnung von parametrisch entwickelten Tragwerksstrukturen von Industriebauten.

3.1.2.2 Cloubasierte Datenaustauschplattform

Parametric Design und BIM sind komplexe und sich ständig weiterentwickelnde Bereiche, in die permanent neue Technologien und Arbeitsmethoden eingeführt werden. Eine dieser

Neuentwicklungen sind Cloudbasierte Datenaustauschprotokolle, die darauf abzielen, die Lücke zwischen Parametric Design Tool und BIM-Softwareprodukten zu schließen. Das zugrundeliegende Prinzip dieser Tools sind eindeutige Datenstrukturen, um Entwurfsinformationen in Echtzeit zwischen verschiedenen Softwareprodukten zu übertragen. Im Kern dieser Tools sind grundsätzlich Web-Server angesiedelt, die den Datenaustausch und die Synchronisierung von Änderungen ermöglichen. Die damit verbundenen Vorteile gehen somit weit über das übliche Maß hinaus, da der Benutzer die Möglichkeit hat, seine Entwürfe in Echtzeit auszutauschen, ohne dass die Daten zwischen verschiedenen Programmen manuell übertragen werden müssen. (Poinet, Stefanescu et al. 2020)

In dieser Arbeit wird das Softwareprodukt Speckle (Aec-Systems-Ltd. 2023) verwendet, um den Austausch von Geometrie-, Kosten- und Nachhaltigkeitsinformationen zwischen Grasshopper für Rhino und Autodesk Revit zu ermöglichen.

3.1.2.3 BIM-basierte Modellierung

Mit BIM-basierten Modellierwerkzeugen können Architekten, Ingenieure und weitere Fachleute detaillierte, dreidimensionale Modelle von Gebäuden und Strukturen erstellen. Darüber hinaus ermöglichen diese Softwareprodukte die Zusammenarbeit und den Austausch von Informationen mit anderen Teammitgliedern in Echtzeit, was es zu einem idealen Werkzeug für Bauprojekte macht. (Autodesk-Inc. 2023)

In dieser Arbeit wird das BIM-Softwareprodukt Autodesk Revit für die Variantenuntersuchung in BIM als Mittel zur effektiven Bewertung und Untersuchung von Industriebauten eingesetzt.

3.2 Forschungsansatz

Für die Prüfung des Forschungsansatzes werden die mit Hilfe des vorgestellten Frameworks in BIM transformierten Tragwerkssysteme auf ihre Kosten hin untersucht und mit den realen Materialkosten eines ausgewählten realen Fallbeispiels eines Industriebaus verglichen. Dabei handelt es sich um ein Hochregallager eines bekannten Frischekosmetikhersteller in Österreich. Die zugehörigen Planunterlagen werden vom Architektur- und Ingenieurbüro ATP Wien Planungs GmbH zur Verfügung gestellt.

Zu diesem Zweck wird das in der Bauindustrie weit verbreitete AVA-Softwareprodukt iTWO (RIB-Software 2023) verwendet. iTWO ist eine moderne Softwarelösung für das Bauprojektmanagement. Sie ermöglicht die umfassende Verwaltung und Überwachung der vielfältigen Bestandteile des Bauprozesses, wie Planung, Kostenkontrolle,

Ressourcenmanagement, Dokumentation und Kommunikation. Gleichzeitig erleichtert diese Software die Zusammenarbeit und Koordination verschiedener Beteiligter, wodurch die Effizienz und Effektivität des Projektmanagements insgesamt verbessert wird. (RIB-Software 2023)

3.3 Variantenstudie

Zur Veranschaulichung des dargelegten Frameworks wird im Rahmen dieser Arbeit eine Variantenstudie in BIM durchgeführt. Die Grundlage dieser Studie bildet der reale Anwendungsfall, welcher analog zur Plausibilisierung des Forschungsansatzes herangezogen wird. Die Geometrien und Materialien des realen Anwendungsfalles fungieren hierbei als Input für das PMOOD-Tool. Durch eine systematische Anpassung der Geometrie- und Materialparameter des Gebäudes mit Hilfe des PMOOD-Tools werden Entwurfsvarianten identifiziert, die dann mit Hilfe des vorgestellten Frameworks in Autodesk Revit übertragen werden, um ein umfassendes Feedback zu Lebenszykluskosten und Nachhaltigkeit in der BIM-Modellierungsumgebung zu ermöglichen.

Es ist zu beachten, dass bei der Berechnung der Lebenszykluskosten nur die Herstellungskosten der Materialien berücksichtigt werden, ohne Faktoren wie Inflation oder Zinseszins zu berücksichtigen, die den Wert dieser Kosten im Laufe der Zeit beeinflussen. Die Lebenszyklusanalyse (LCA) berücksichtigt die Lebenszyklusphasen A1-A3 (Herstellungsphase), um eine fundierte Beurteilung der Umweltauswirkungen der betrachteten Varianten zu ermöglichen. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Variantenstudie werden in Kapitel 7 dieser Arbeit ausführlich dargelegt.

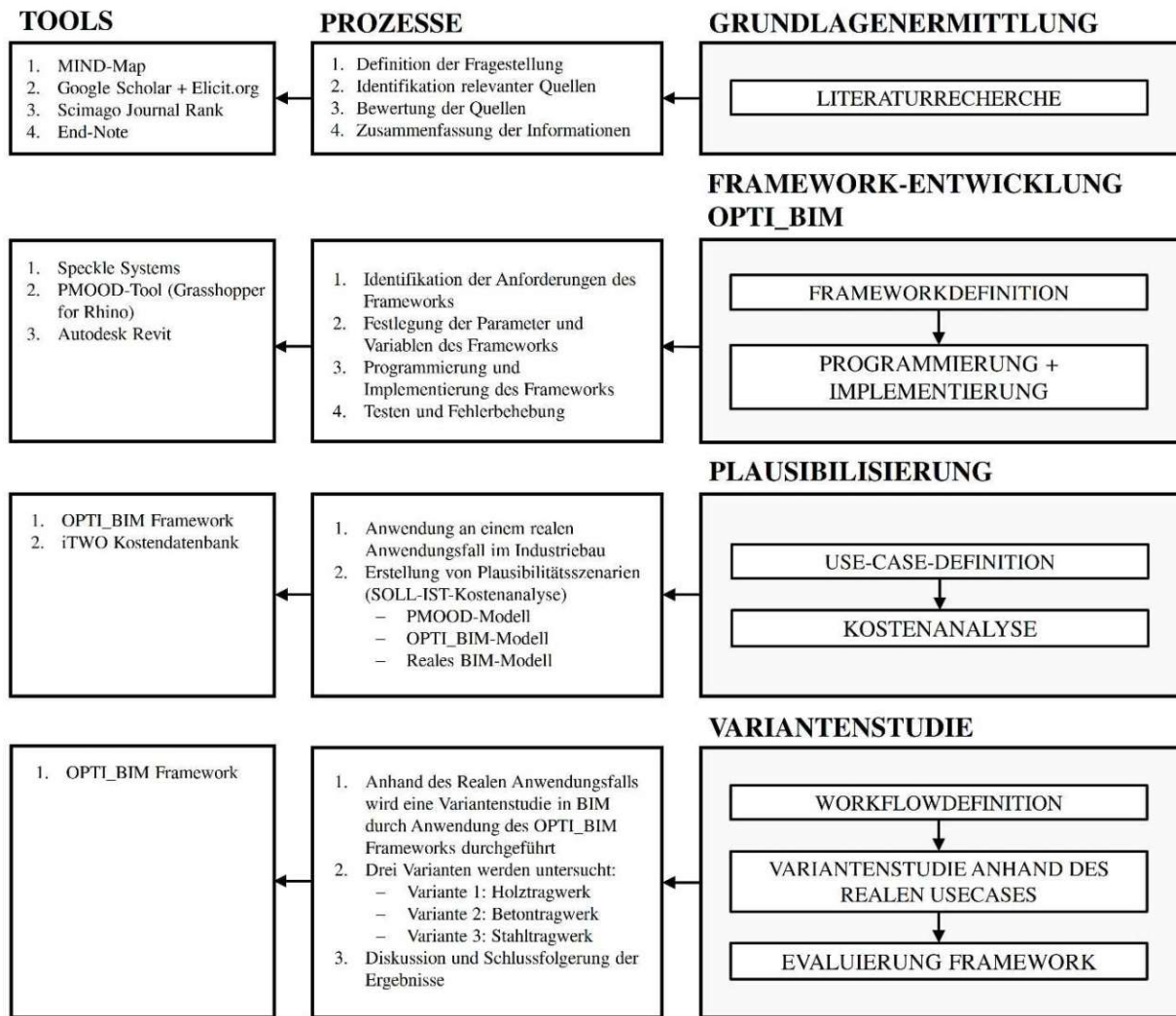


Abbildung 2 - Methodische Vorgehensweise zur Entwicklung eines Frameworks

4 Framework Proposal – OPTI_BIM

Ziel dieser Arbeit ist es, die Herausforderung der effektiven Integration von Parametric Design und BIM in der frühen Planungsphase von Industriegebäuden zu meistern, um Variantenuntersuchungen in BIM zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wird ein Framework mit dem Namen OPTI_BIM vorgestellt, welches eine interoperable Anwendung von Parametric Design und BIM ermöglicht.

Das Framework beruht auf der Erkenntnis, dass die frühe Planungsphase von Industriegebäuden eine entscheidende Phase im Entwurfsprozess ist, da sie die Grundlage für das gesamte Projekt bildet und das Endergebnis in Bezug auf Kosten und Nachhaltigkeit stark beeinflusst. (Dejaco, Mazzucchelli et al. 2020) Gleichzeitig ist diese Phase durch ein hohes Maß an Unsicherheit und Komplexität gekennzeichnet, was die Durchführung von Kosten- und Nachhaltigkeitsanalysen (LCA) erheblich erschwert. (Röck, Hollberg et al. 2018) Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wird ein ganzheitlicher und integrierter Ansatz vorgeschlagen, der die Stärken von parametrischem Design und BIM kombiniert.

Basis des Frameworks sind, wie in nachfolgender Abbildung 3 dargestellt, drei wesentliche Bestandteile: das Parametric Design Tool, der Web-Server und die BIM-Software.

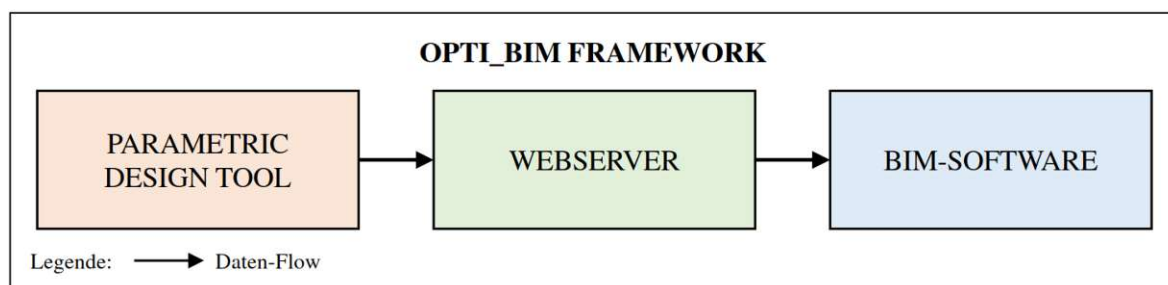


Abbildung 3 - OPTI_BIM Framework Schematisch

Das Parametric Design Tool dient zur Generierung von Entwurfsvarianten und zur Berechnung der für Kosten- und Nachhaltigkeitsanalysen notwendigen Kennwerte. Über die Funktionsweise des PMOOD-Tools wird auf (Reisinger, Wang-Sukalia et al. 2022) verwiesen. Der Webserver dient dazu, diese Informationen zu verarbeiten und zu organisieren und sie für die BIM-Software zugänglich zu machen. Die BIM-Software wiederum wird zur Durchführung von Variantenstudien verwendet. In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen Bestandteile des Frameworks näher erläutert und die entsprechenden Randbedingungen sowie Anforderungen definiert. Zunächst wird in Kapitel 4.1 die erste Stufe des vorgestellten

Frameworks, die Schnittstelle zwischen dem Parametric Design Tool, dem Webserver und der BIM-Software erläutert. In diesem Kapitel werden die technischen Aspekte ausführlich aufgezeigt. Zudem wird erläutert, wie die BIM-Software mit dem Webserver kommuniziert, um aus den parametrisch entwickelten Tragwerken funktionale BIM-Modelle zu entwickeln, mit deren Grundlage Variantenuntersuchungen durchgeführt werden können. Abschließend werden in Kapitel 4.2 die Anforderungen an die sicherheits- und datenschutzrelevanten Aspekte des in dieser Arbeit vorgestellten Frameworks definiert und aufgezeigt.

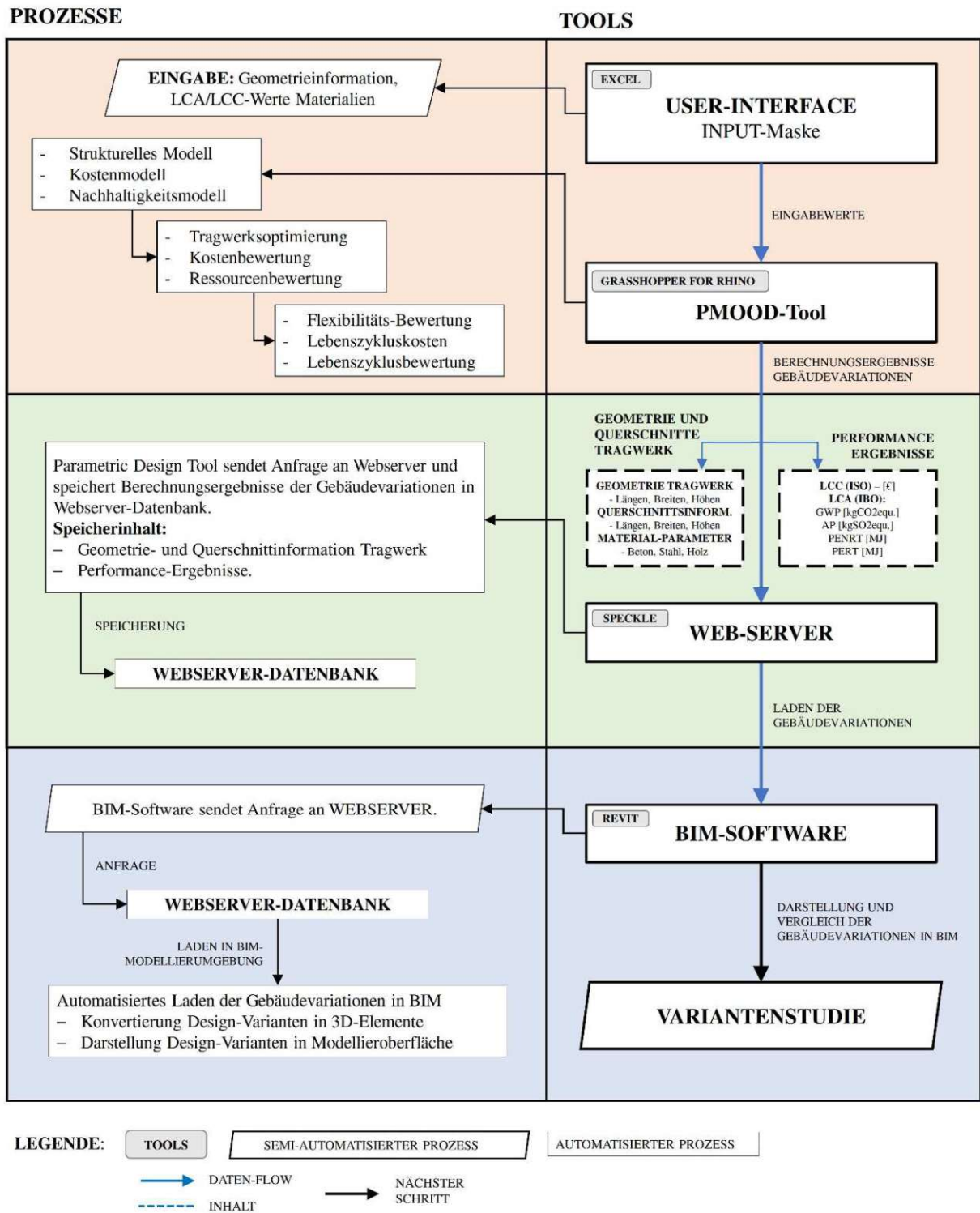


Abbildung 4 - Framework OPTI_BIM

4.1 Schnittstelle Parametric Design Tool und BIM-Software

Damit die Ergebnisse aus dem Parametric Design Tool für Variantenuntersuchungen in BIM genutzt werden können, ist es notwendig, diese Informationen zu erfassen und zu strukturieren. Angesichts der großen Datenmengen, die bei Parametric Design Tools anfallen, können diese Aufgaben teils nur mit leistungsfähigen Schnittstellen und durch den Einsatz moderner Datenbanklösungen bewältigt werden. Um das Potenzial der parametrischen Modellierung umfassend zu nutzen, ist es deshalb erforderlich, dass sowohl kleine als auch große Datenmengen berücksichtigt werden können. (Paschke, Neuhäuser et al. 2004) Zu diesem Zweck wird die Einführung eines zentralen Webservers als Schnittstelle zwischen dem Parametric Design Tool und der BIM-Software vorgeschlagen, welches als Kernstück des in dieser Arbeit vorgestellten Frameworks dient. Mit der Webserver-Schnittstelle wird angestrebt, eine durchgängige und gleichzeitig intuitive Lösung für die Datenverwaltung zu schaffen.

In diesem Kapitel soll daher ein umfassender Überblick über die vorgeschlagene Webserver-Schnittstelle einschließlich ihrer technischen Merkmale, Funktionalitäten und Vorteile gegeben werden. Um die Rahmenbedingungen für eine Variantenuntersuchung in BIM zu definieren, werden in Kapitel 4.1 die wichtigsten Komponenten des Datenaustauschs behandelt. Darüber hinaus werden die spezifischen Anforderungen an die im Kommunikationsprozess verwendeten Datenaustauschformate und -protokolle untersucht, wobei auf die unterschiedlichen Datenstrukturen in der Baubranche eingegangen wird. Schließlich werden in Kapitel 4.2 die mit dem Datenaustausch verbundenen Sicherheitserfordernisse untersucht, indem die verschiedenen Sicherheitsrisiken analysiert und geeignete Vorkehrungen vorgeschlagen werden.

4.1.1 Komponenten des Datenaustauschs

Der Kommunikationsprozess für den Datenaustausch zwischen dem Parametric Design Tool und dem Webserver bzw. zwischen der BIM-Software und dem Web-Server funktioniert als sogenannter Client-Server-Prozess. Dabei übernimmt das Parametric Design Tool bzw. die BIM-Software die Rolle des sogenannten Clients und der Webserver die des Servers. Diese beiden Komponenten kommunizieren, wie in Abbildung 5 dargestellt, über eine Programmierschnittstelle, die sogenannte REST-API. Diese Schnittstelle erfasst im Laufe dieses Prozesses die vom Parametric Design Tool übermittelten Informationen und stellt diese dem Webserver und nachfolgend der BIM-Software zur Verfügung.

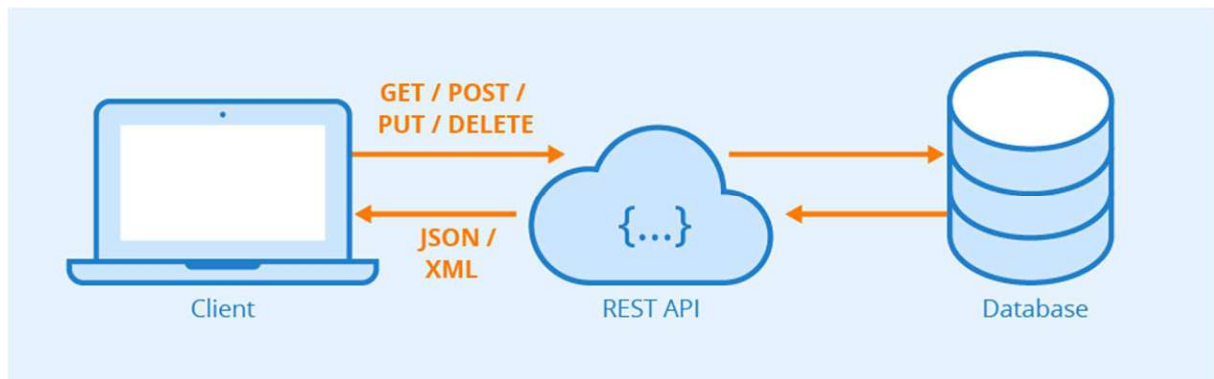


Abbildung 5 - Schema einer Client-Server-Verbindung (SDK_Finance)

Durch diese fortlaufende Strukturierung der Informationen aus der parametrischen Berechnung können die im Webserver gespeicherten Informationen dem BIM-Programm uneingeschränkt zur Verfügung gestellt werden. Zur Verdeutlichung dieses Vorgangs werden nachfolgend die entscheidenden Komponenten des Datenaustauschs beschrieben. Darüber hinaus wird der Prozess informationstechnisch aufgeschlüsselt, um zu verstehen, welche Informationen aus dem Parametric Design Tool in welcher Informationstiefe benötigt werden, damit Variantenstudien in BIM durchgeführt werden können.

4.1.1.1 Client

Das Parametric Design Tool, das in diesem Zusammenhang auch als Client bezeichnet wird, ist für die Sammlung und Erfassung sämtlicher Ergebnisse aus der parametrischen Tragwerksberechnung zuständig und dient somit als Initiator dieses Datenaustauschprozesses. Zu den Ergebnissen gehören Querschnittsinformationen, Materialparameter der Fundamente, Stützen und Träger. Darüber hinaus enthalten diese Ergebnisse auch die entsprechenden Kosten- und Nachhaltigkeitsberechnungen des Tragwerks. Die Sammlung und Erfassung dieser Ergebnisse bedeutet im Wesentlichen, dass die Ergebnisse im Parametric Design Tool in bereits korrekte Ergebnislisten eingeordnet werden. Auf diese Weise kann der Client die entsprechende Anfrage viel effizienter an den Webserver senden, so dass auch bei großen Datenmengen eine leistungsfähige Verarbeitung des Datensatzes durch die REST-API ermöglicht wird. Auf der anderen Seite wird auch das BIM-Programm als Client bezeichnet, da dieses die Datenmengen, welche in der Datenbank gespeichert wurden, abrufen. Dafür muss das BIM-Programm analog wie das Parametric Design Tool den Datenaustauschprozess initiieren.

4.1.1.2 REST-API

Die Representational State Transfer (REST) Application Programming Interface (API) dient als Schnittstelle zwischen dem Parametric Design Tool und dem Webserver sowie dem BIM-Programm und dem Webserver und stellt somit die zentrale Komponente der Client-Server-Architektur dar. Die REST-API verwendet sogenannte API-Endpunkte, auch Endpoints genannt, die zur effizienten Strukturierung der Ergebnisse aus dem Parametric Design Tool verwendet werden. Diese Endpoints sind dabei im Wesentlichen als eindeutige URLs definiert. Darüber hinaus verwendet die REST-API verschiedene Anfragemethoden wie GET oder POST, um bestimmte Aktionen mit den Ergebnissen durchzuführen. Die POST-Anfrage an die REST-API dient zur Übertragung von Ergebnissen aus der parametrischen Berechnung. Die GET-Anfrage hingegen dient zum Abruf der Ergebnisse aus der parametrischen Berechnung. (Doglio 2018) Um beispielsweise die geometrische Position einer tragenden Stütze für eine Variantenstudie zu ändern, kann das Parametric Design Tool eine Anfrage an den Endpoint „<https://optiBIM.com/Tragwerk/Entwurfsvariante1>“ senden und die aktualisierten Positionskoordinaten in die POST-Anfrage des Anfragetextes einfügen. Dieser REST-API-Endpoint verarbeitet dann die Anfrage und aktualisiert den Zustand des 3D-Modells in der entsprechenden Datenbank.

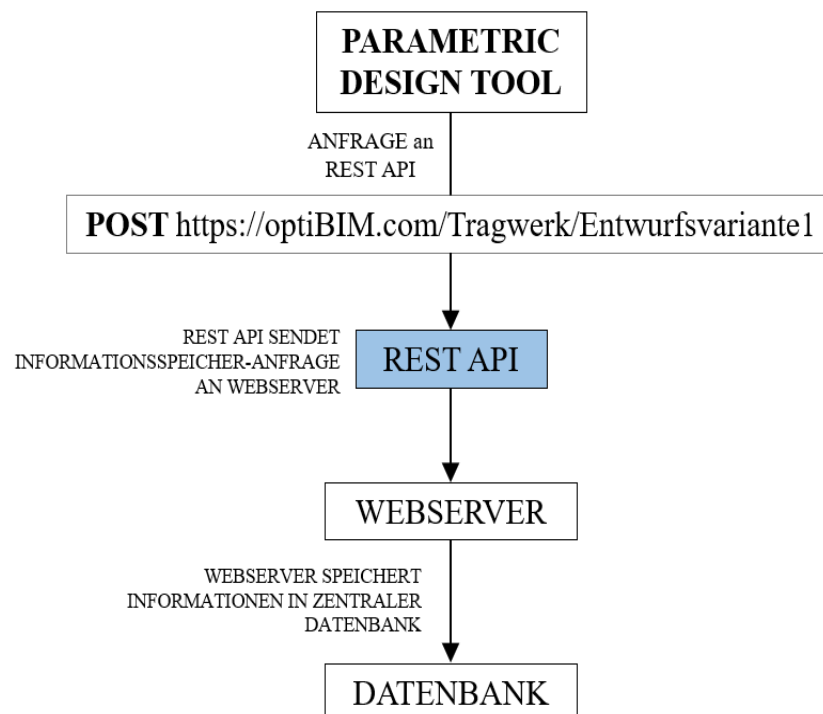


Abbildung 6 - POST-Anfrageprozess über eine REST-API zum Informationsabruf

Der Datenaustausch zwischen der BIM-Software und dem Webserver ist ebenfalls eine maßgebliche Bedingung für die kombinierte Anwendung eines Parametric-Design-Tools und eines BIM-Softwareprodukts, da er für das Abrufen der vom Parametric-Design-Tool erzeugten Ergebnisse und das Laden dieser in das BIM-Softwareprodukt verantwortlich ist. Diese Daten werden über verschiedene REST API-Endpoints übertragen, die vom Webserver verwaltet werden. Sobald eine Verbindung zwischen der BIM-Software und dem Webserver hergestellt ist, sendet die BIM-Software eine Anfrage an den REST-API-Endpoint. Der Webserver greift daraufhin auf die zentrale Datenbank zu und ruft die relevanten Daten ab. Diese Daten werden dann rekursiv an die BIM-Software zurückgegeben. Weil es sich bei dem diesem Datenaustauschprozess um eine GET-Anfrage handelt, bedeutet dies, dass das BIM-Programm die im Webserver gespeicherten Informationen lediglich abrufen und nicht abspeichert. (Doglio 2018) Zur Veranschaulichung dieses Datenabrufprozesses zeigt Abbildung 7, wie eine vom BIM-Programm initiierte Anfrage an den Webserver aussieht.

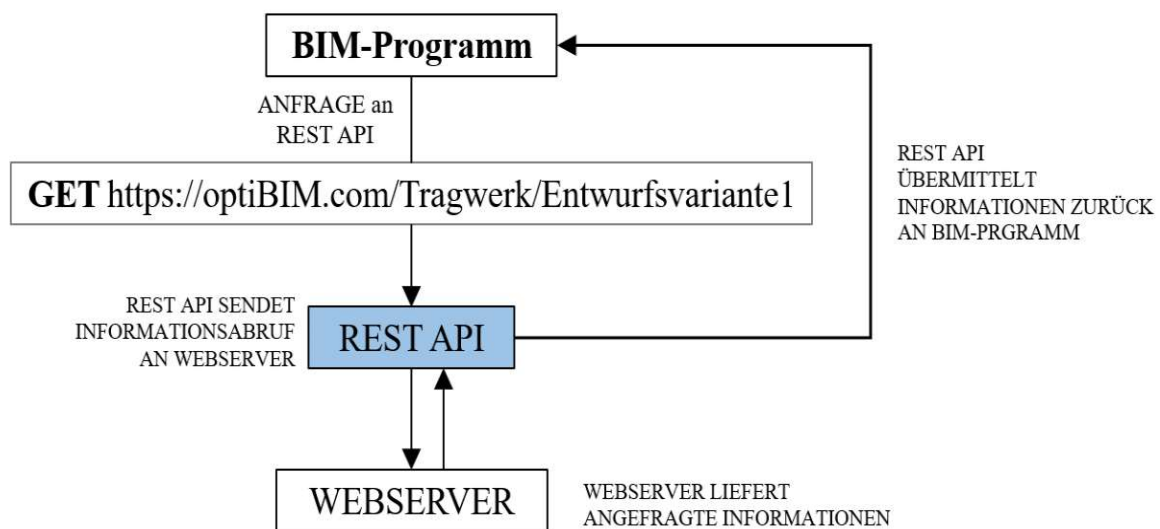


Abbildung 7 - GET-Anfrageprozess über eine REST-API zum Informationsabruf

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Datenaustauschprozess zwischen der BIM-Software und dem Webserver eine Schlüsselkomponente des Parametric Design Tools und des BIM-Softwareprodukts ist. Durch die Verwendung verschiedener REST-API-Endpoints ist der Webserver in der Lage, die von der BIM-Software an den Webserver gesendeten Anfragen zu verarbeiten, die relevanten Daten aus der zentralen Datenbank abzurufen und sie in der Modellierungsoberfläche der BIM-Software zu visualisieren.

Die REST-API kann im Prozess des Parametrischen Designs nicht nur eine effiziente Datenübertragung zwischen dem Parametric Design Tool und der BIM-Software gewährleisten, sondern ermöglicht auch die Integration anderer Programme und Systeme durch die Verwendung standardisierter Datenaustauschformate. Die Tatsache, dass die REST-API große Datenmengen verarbeiten und mehrere Clients unterstützen kann, macht den parametrischen Entwurfsprozess auch skalierbar und flexibel, um die Anforderungen an Variantenuntersuchungen in BIM von Projekten unterschiedlicher Größe und Komplexität zu erfüllen. (Doglio 2018)

4.1.1.3 Webserver

Der Webserver fungiert als zentraler Knotenpunkt für das Parametric Design Tool und die BIM-Software. Er empfängt die Ergebnisse der parametrischen Berechnung über die REST-API durch definierte Endpoints, analog zum Client. (Doglio 2018)

Diese Datenbank, die auf dem Webserver implementiert wird, hat den Vorteil, dass große Datenmengen aus der parametrischen Tragwerksberechnung geordnet hinterlegt werden können. Des Weiteren besteht der Vorteil, dass für jede berechnete Entwurfsvariante ein eigener Eintrag in der Datenbank vorgenommen werden kann, was die nachträgliche Einspielung von Modellvarianten in der BIM-Umgebung erheblich vereinfacht. (Iancu and Georgescu 2018) Bemerkenswert ist die Tatsache, dass dieser Prozess des Informationsabrufs von der REST-API und der Speicherung in der Datenbank in Echtzeit erfolgt, wodurch sichergestellt wird, dass das BIM-Programm und der Webserver immer mit den aktuellen Ergebnissen aus der parametrischen Tragwerksberechnung arbeitet. (Vinay; and Delis 2005) Dies ermöglicht eine schnellere und genauere Entscheidungsfindung während des Entwurfsprozesses sowie die Möglichkeit, Änderungen am parametrischen Tragwerksmodell einfach zu verfolgen und zu analysieren.

4.1.1.4 Datenaustauschformat

Die zur Verarbeitung der Daten erforderliche Kommunikation zwischen dem Parametric Design Tool und dem Webserver als auch der BIM-Software und dem Webserver soll grundsätzlich über ein standardisiertes Datenaustauschformat erfolgen. Das verwendete Datenaustauschformat sollte zudem eine einfache und effiziente Möglichkeit bieten, Daten zwischen verschiedenen Softwareprodukten auszutauschen, ohne dass es zu Inkonsistenzen oder Verzögerungen kommt. Ein dafür geeignetes Datenaustauschformat für den Austausch

von Informationen ist JSON (JavaScript Object Notation). Es ist ein leicht verständliches Format mit einfacher Lesbarkeit und unterliegt einer geringen Anzahl von Regeln. JSON ermöglicht zudem die Speicherung von Informationen in einer hierarchischen Struktur, was die Verarbeitung von tragwerksspezifischen Elementen einfach und effizient macht. (Sibenik, Kovacic et al. 2021) Ein Beispiel für ein JSON-Objekt für eine Stahlstütze kann analog Abbildung 8 aussehen. Dieses Beispiel demonstriert die Einfachheit und Lesbarkeit von JSON. Das klare Format der Daten erleichtert somit die Lesbarkeit für das BIM-Programm bzw. dem Webserver, was für einen effizienten Kommunikationsprozess unerlässlich ist.

```
1 {  
2   "typ": "Stütze",  
3   "material": "Stahl",  
4   "querschnitt": {  
5     "hoehe": 210,  
6     "breite": 220,  
7     "querschnitt": "HEA220"  
8   },  
9   "load_capacity": {  
10    "zugspannung_max": 235,  
11    "linienlast": 3  
12  }  
13 }
```

Abbildung 8 - JSON-Objekt einer Tragwerksstütze

4.1.1.5 Einbindung der parametrischen Berechnungen im BIM

Für die kombinierte Anwendung von BIM und Parametric Design mittels eines webserverbasierten Datenaustauschprozesses sind verschiedene Voraussetzungen für den Abruf und die Konvertierung von Tragwerkselementen aus der webserverbasierten Datenbank erforderlich. Eine zentrale Herausforderung bei diesem Prozess liegt in der Konvertierung der Daten in ein Format, das für die Verwendung im BIM-Modell geeignet ist. Sobald die tragwerksspezifischen Ergebnisse aus der webserverbasierten Datenbank abgerufen sind, müssen sie in ein Format konvertiert werden, das mit der BIM-Software kompatibel ist. Da der Großteil der Hersteller von BIM-Softwareprodukten jedoch mit herstellereigenen Datenaustauschformaten arbeiten, ist dieser Schritt grundsätzlich nur unter Anwendung der softwarebedingten Programmierschnittstellen oder über sogenannte JSON zu IFC-Konvertierer möglich. Bei der Konvertierung von JSON in IFC werden die im JSON-Format gespeicherten Ergebnisse auf die im IFC-Datenmodell verwendeten Datenstrukturen und Objektdefinitionen

abgebildet (mapping). Die Konvertierung kann unter Verwendung frei verfügbarer Programmierbibliotheken, wie z. B. ifcJSON von der Building Smart Foundation, durchgeführt werden, die die Konvertierung automatisch vornehmen. Der Prozess der Konvertierung von JSON nach IFC, wie in Abbildung 9 dargestellt, kann sich dabei in folgenden Schritten erstrecken: (Afsari, Charles et al. 2017)

- Aufbereitung der JSON-Daten in ein Format, das von einem Konvertier-Tool oder einer Programmier-Bibliothek verarbeitet werden kann.
- Zuordnung der JSON-Daten zu den im IFC-Datenmodell definierten Datenstrukturen.
- Generierung einer IFC-Datei aus den abgebildeten Daten, was die Verwendung einer IFC-Bibliothek voraussetzt

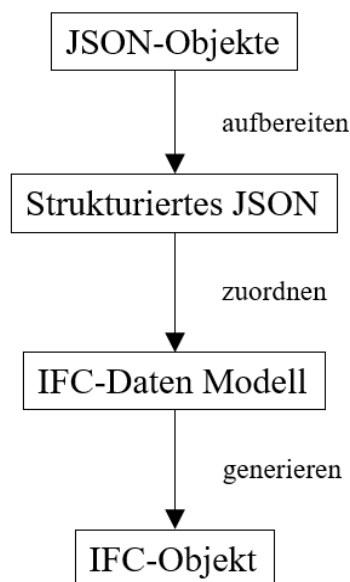


Abbildung 9 - Konvertierungsprozess JSON zu IFC

Wenn die JSON-Daten beispielsweise Informationen über spezifische Tragwerkselemente und deren statische Beziehungen untereinander enthalten, so muss auch der Konvertierungsprozess diese Informationen auf die entsprechenden IFC-Klassen abbilden. Es gibt verschiedene Softwaretools oder Programmier-Bibliotheken, die den Prozess der Konvertierung von JSON in IFC automatisieren können. Die Wahl dieser Lösungen hängt jedoch von den spezifischen Anforderungen des Konvertierungsprozesses ab, einschließlich der Komplexität der aus den parametrischen Berechnungen gewonnenen Daten und der vorhandenen technischen Ressourcen, welche vom vorhandenen BIM-Softwareprodukt abhängig sind.

Nachdem die zuvor parametrisch entwickelten Entwürfe der Tragwerksmodelle in eine BIM-fähige Modellierungsumgebung überführt worden sind, können letztendlich Variantenuntersuchungen in BIM durchgeführt werden. Diese Variantenuntersuchungen können beispielsweise mit sogenannten Bauteillisten durchgeführt, aus denen dann die gewünschten Varianten in Bezug auf Kosten und Nachhaltigkeit ausgewählt werden können. Hat sich der Anwender für eine Variante entschieden, kann er ohne Zeitverlust direkt mit dem BIM-Modell weiterarbeiten. Die herkömmliche Variantenuntersuchung in einem Tabellenkalkulationsprogramm wird damit hinfällig, da sich der Anwender den gesamten nachträglichen Modellierungsaufwand erspart.

4.2 Anforderungen an die Sicherheit und Datenschutz

Die Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen ist für den Schutz unternehmensinterner Informationen von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund ist es für Unternehmen unerlässlich, aktive Maßnahmen zum Schutz ihrer Daten zu treffen, sobald sie webserverbasierte Schnittstellen einsetzen. Was die Datensicherheit anbelangt, so muss sichergestellt werden, dass nur autorisierte Benutzer Zugriff auf die zwischen dem Parametric Design Tool und dem Webserver ausgetauschten Informationen haben. Dies kann gewährleistet werden, wenn der zentrale Webserver lokal im Unternehmen angesiedelt wird, damit keine unberechtigten Personen außerhalb des Firmennetzwerks Zugriff auf den Webserver haben. Ein Angriff von außen wird so weitgehend vermieden und die Verwaltung der Webserver erfolgt durch die jeweiligen internen Netzwerkadministratoren. Ergänzend sollte ein Authentifizierungs- und Zugriffskontrollmechanismus für den Zugriff auf die Schnittstelle zwischen dem Parametric Design Tool und dem Webserver sowie zwischen der BIM-Software und dem Webserver vorgesehen werden. Hierbei sind im Wesentlichen Systeme gemeint, die gewährleisten, dass nur berechtigte Personen Zugriff auf die entsprechenden Berechnungsdateien haben. Dabei wird eine Identitätsprüfung bei Start eines Datenaustauschprozesses durch Abfrage von Benutzernamen und Passwort durchgeführt. Kann sich der Benutzer erfolgreich anmelden, so wird der Prozess durchgeführt, ansonsten blockiert. Diese Identitätskontrolle soll zudem sogenannte Zugriffskontrollmechanismen enthalten. Zugriffskontrollmechanismen verhindern, dass unbefugte Personen auf sensible Informationen zugreifen, selbst wenn sie die richtigen Anmeldeinformationen für die Schnittstellen haben. Dies geschieht durch Gewähren oder Verweigern des Zugriffs basierend auf Kriterien wie der Benutzerrolle oder der Planungsabteilung. (Golubski 2020)

5 Implementierung des Frameworks

Wie bereits in Kapitel 3 Methodische Vorgehensweise beschrieben, wird für die Plausibilisierung des Frameworks das algorithmische Modellierungswerkzeug Grasshopper für Rhinoceros3D verwendet. Da auch das zur Verfügung gestellt parametrische Tragwerksberechnungstool PMOOD-Tool auf Grasshopper basiert, wird die komplette Implementierung des Frameworks in Grasshopper für Rhinoceros3D durchgeführt.

Das in (Reisinger, Wang-Sukalia et al. 2022) vorgestellte Framework besteht im Wesentlichen aus drei Bausteinen: Dem Interface, dem PLGO-Modell und dem PMOOD-Modell. Das Interface definiert dabei eine Benutzeroberfläche in einem Tabellenkalkulationsprogramm, wie z.B. Excel, in dem die aus dem realen Anwendungsfall resultierenden Eingabewerte im Zuge der Plausibilitätsprüfung des Frameworks definiert werden. Das PLGO-Modell, das ebenfalls in Grasshopper entwickelt wurde, dient als Modell zur Generierung eines optimalen Produktionslayouts unter Berücksichtigung der vorgegebenen Eingabewerte im Interface. Das PMOOD-Modell, dargestellt in Abbildung 10, generiert wiederum auf Basis der Ergebnisse des PLGO-Modells und der Eingabewerte des Interfaces ein statisch funktionierendes Strukturmodell. Außerdem wird das generierte Strukturmodell durch ein Kostenmodell und ein Nachhaltigkeitsmodell beschrieben.

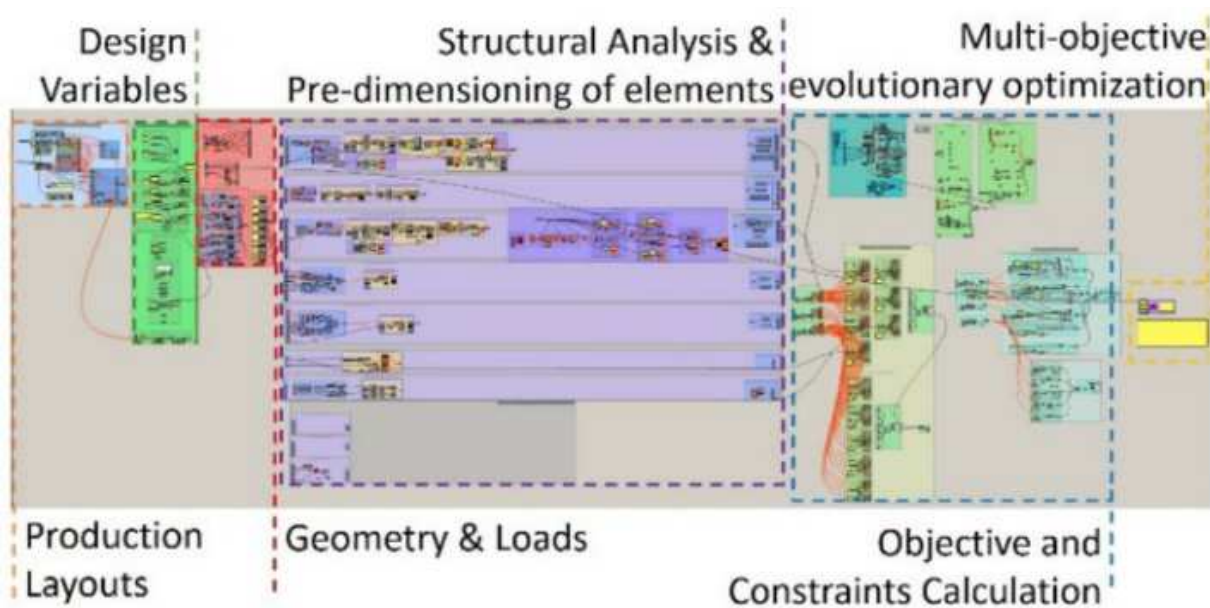


Abbildung 10 - PMOOD-Modell vorgestellt in (Reisinger, Wang-Sukalia et al. 2022)

Die Anwendung des in dieser Arbeit vorgestellten Frameworks lässt sich grundsätzlich in die folgenden Verfahrensschritte, unterteilen:

- a. Definition der Input Daten im Interface
- b. Automatisierte Berechnung des Strukturmodells mit dem Parametric Design Tool
- c. Sammlung der Berechnungsergebnisse im Parametric Design Tool
- d. Senden der Ergebnisse an den Webserver
- e. Abrufen der Ergebnisse im BIM-Programm
- f. Variantenstudie im-BIM-Programm

Nachfolgend ist in der Abbildung 11 das erweiterte Parametric Design Tool mit dem in dieser Arbeit implementierte Framework OPTI_BIM dargestellt. Die Prozesse a) und b) sind dabei Teil des PMOOD-Tools und werden ausschließlich für die Anwendung und Implementierung des Frameworks OPTI_BIM herangezogen.

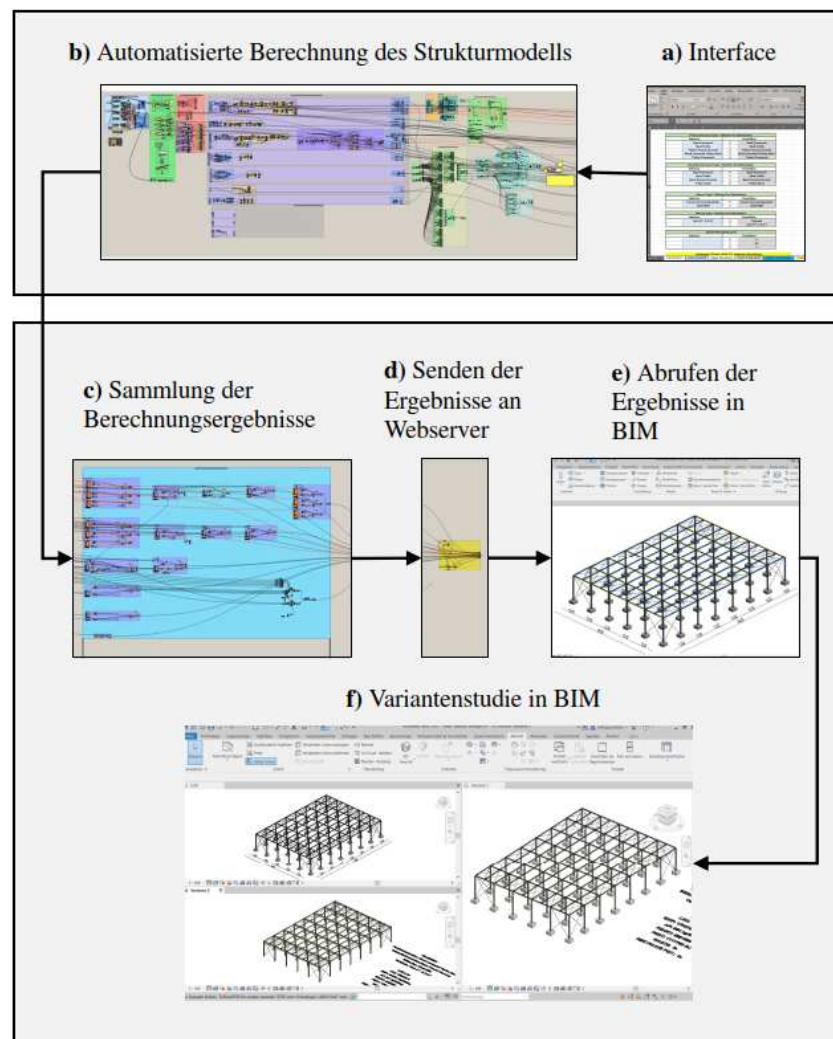


Abbildung 11 - Verfahrensschritte OPTI_BIM Framework

Im **Verfahrensschritt c)** werden die zugehörigen Geometrieäquivalente des Tragwerkes aus den parametrisch entwickelten Tragwerksmodellen verwendet, um die Tragwerkselemente einheitlich und konsistent zu erfassen und zu sammeln. Geometrieäquivalente sind z.B. für Träger und Stützen die Achslinie, die durch einen Anfangs- und einen Endpunkt definiert ist. Für Wände ist das geometrische Äquivalent die jeweilige Mittelfläche der Wand. Diese Geometrieäquivalenten beinhalten neben der geometrischen Lage noch weitere Metadaten, wie z.B. Querschnittswerte, Materialparameter, Massen, Kosten und Nachhaltigkeitsinformationen. In der Abbildung 12 ist beispielhaft dargestellt, wie für die Primärträger der Dachkonstruktion die Ergebnisse der parametrischen Berechnung erfasst und für den Versand an den Webserver aufbereitet werden.

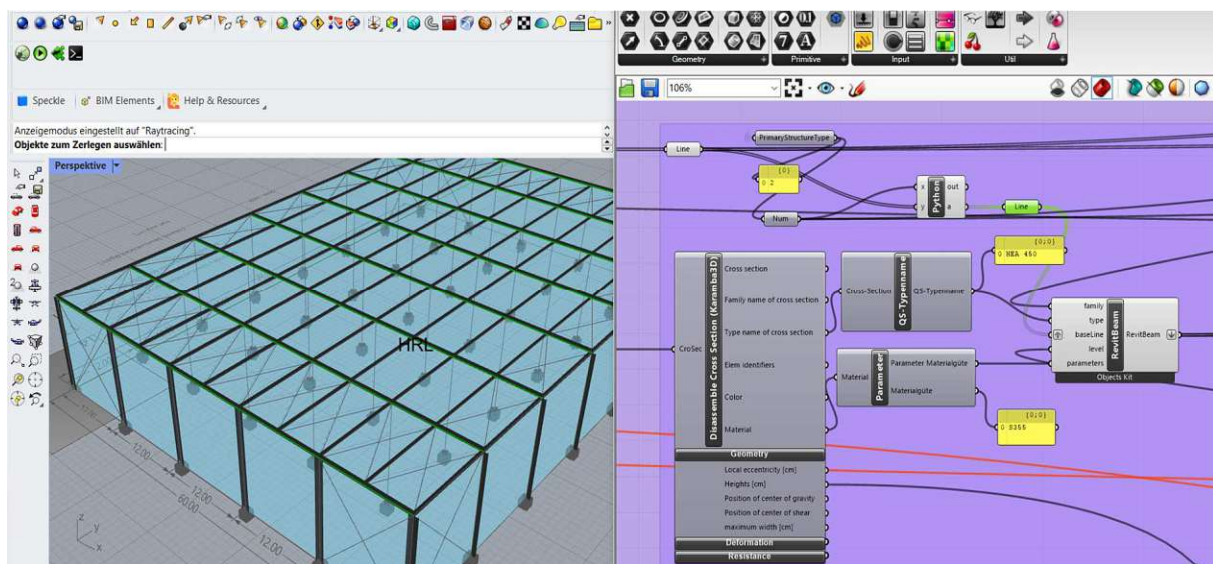


Abbildung 12 - Erfassung der Ergebnisse exemplarisch für die Primärträger

In **Verfahrensschritt d)** werden sämtliche erfassten Ergebnisse der Stützen, Balken und Fundamente, automatisch an den Webserver übertragen.

Werden im Zuge der parametrischen Berechnung mehrere Entwurfsvarianten für die anschließende BIM-Variantenuntersuchung ausgewählt, können diese jeweils an einen spezifischen, dafür vorgesehenen Rest-API-Endpoint übertragen werden. Abbildung 13 zeigt, wie der für die Entwurfsvariante vorgesehene Rest-API-Endpoint definiert wird und wie die Ergebnisse daraufhin automatisch an den Webserver gesendet werden.

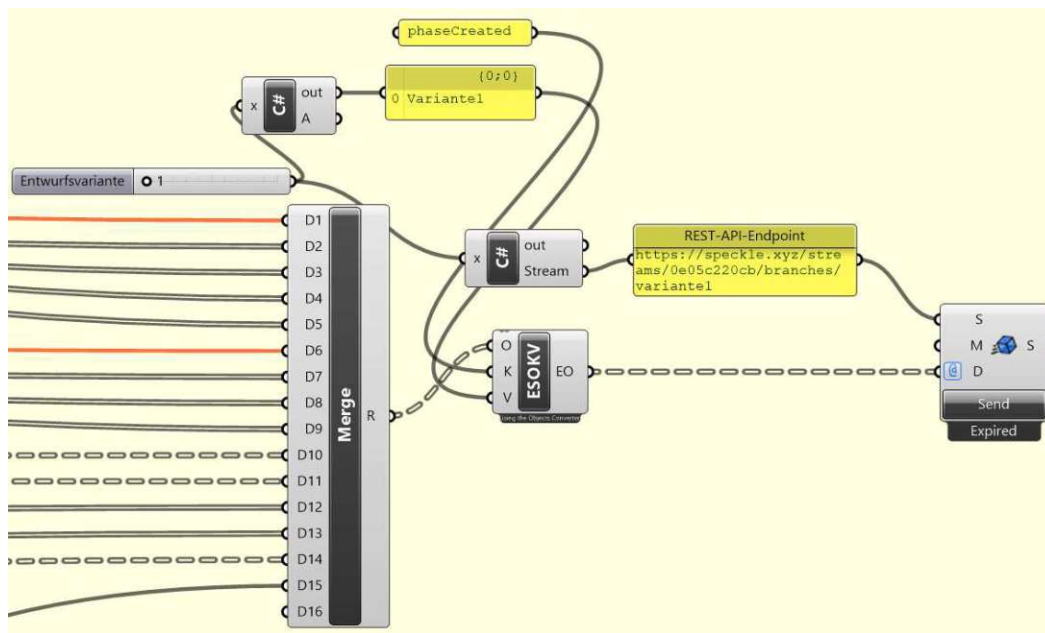


Abbildung 13 - Übertragung der Ergebnisse an den Webserver

Im **Verfahrensschritt e)** ruft das BIM-Programm automatisiert die im Web-Server gespeicherten Entwurfsvarianten ab und lädt diese als voll funktionsfähiges BIM-Modell in die BIM-Modellierungsoberfläche. Die Entwurfsvarianten können anschließend kosten- und nachhaltigkeitsstechnisch ausgewertet werden.

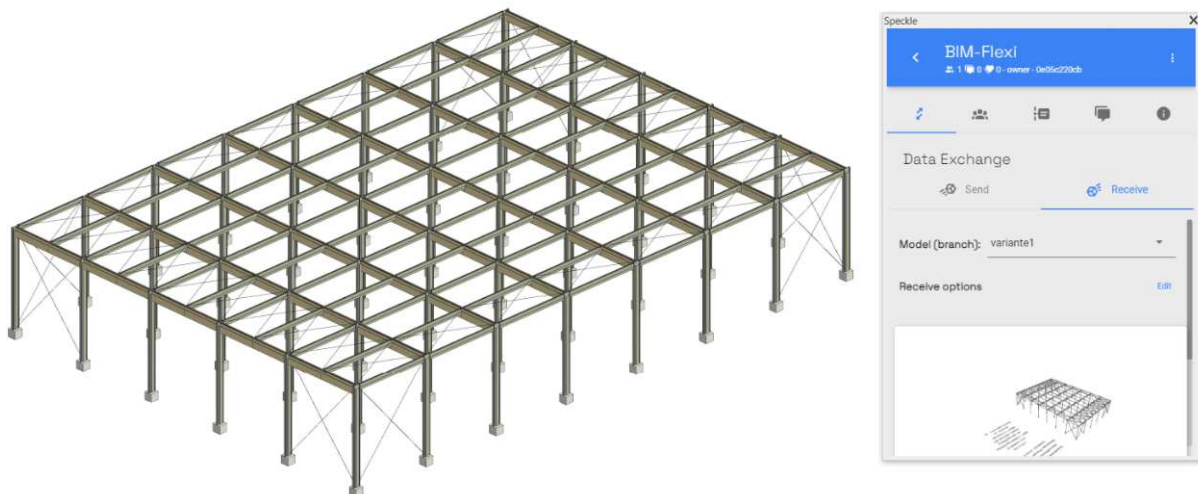


Abbildung 14 - Darstellung der Entwurfsvarianten in BIM

Für die Implementierung des in dieser Arbeit vorgestellte Framework OPTI_BIM wird das Tool Speckle herangezogen. Speckle ist ein Open-Source-Softwareprodukt, das für die Zusammenarbeit und den Datenaustausch in der Architektur-, Ingenieur- und Baubranche entwickelt wurde. Es ermöglicht Benutzern, Daten serverbasiert zwischen verschiedenen

Softwareprodukten auszutauschen und zu synchronisieren, um die Zusammenarbeit zu verbessern. (Aec-Systems-Ltd. 2023) Speckle wird des Weiteren herangezogen, weil es analog wie in Kapitel 4.1 beschrieben, eine Client-Server-Architektur ermöglicht. (Poinet, Stefanescu et al. 2020) Diese erweitert das PMOOD-Modell um die Funktion des Clients und ermöglicht es diesem, über eine für Bauteile spezifizierte REST-API direkt mit dem Speckle Webserver zu kommunizieren. Der Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwareprodukten mit Speckle funktioniert hierbei im Wesentlichen über sogenannte Software-Konnektoren. Diese Konnektoren erweitern genau diese Client-Server-Architektur im jeweiligen Softwareprodukt. Für die Anwendung in Grasshopper und für die weitere BIM-Verarbeitung in Autodesk Revit ist es daher notwendig, den Grasshopper-Speckle-Konnektor in Grasshopper und den Revit-Speckle-Konnektor in Revit zu installieren, damit diese Programme miteinander kommunizieren können. In Grasshopper wird nach der Installation des Konnektors, wie in Abbildung 15 dargestellt, das Menüband um die Registerkarte Speckle erweitert, die die zugehörigen Grasshopper-Nodes zum Sammeln und Übertragen der aus den parametrischen Berechnungen resultierenden Ergebnisse enthält.

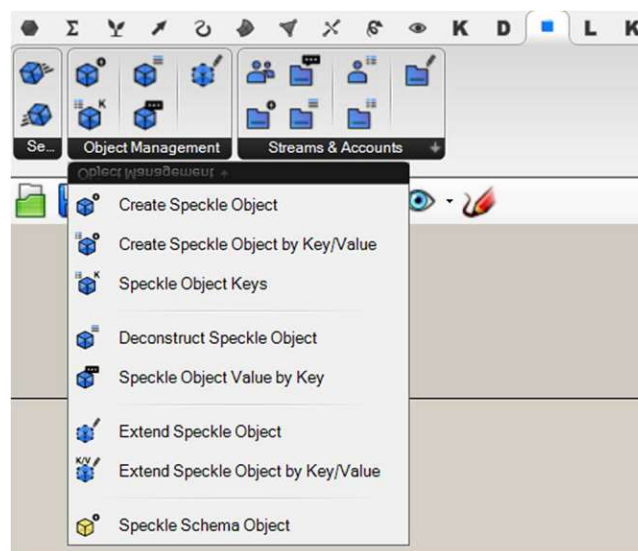


Abbildung 15 - Speckle-Connector in Grasshopper

In ähnlicher Weise wird in Revit, wie in Abbildung 16 dargestellt, nach der Installation des Revit Speckle-Konnektors eine neue Registerkarte Speckle im Menüband erstellt, über die die aus den parametrischen Berechnungen gespeicherten Ergebnisse abgerufen werden können.

Der Datenaustausch zwischen Grasshopper und Revit funktioniert, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, über eine Rest-API und demzufolge über die GET- und POST-Anfragemethoden.

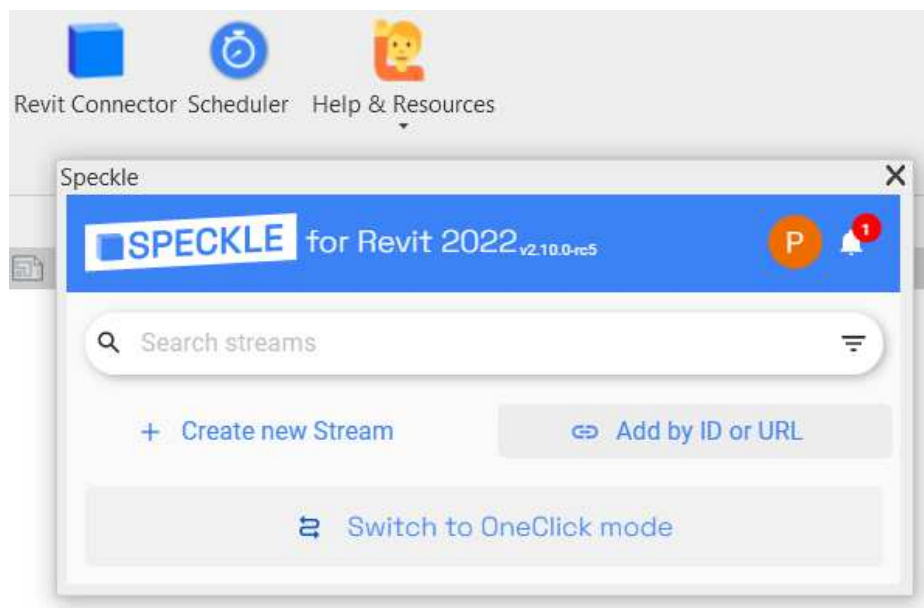


Abbildung 16 - Revit-Speckle-Connector in Revit

Diese Anfragen werden bei der Verwendung des Speckle-Webservers über sogenannte Speckle-Streams ermöglicht. Ein Speckle-Stream, der als REST-API-Endpoint fungiert, ist als eine eindeutige URL definiert, an die das Softwareprodukt eine POST-Anfrage zum Speichern von Informationen sendet oder die Informationen über eine GET-Anfrage abrufen. (Aec-Systems-Ltd. 2023) Diese eindeutige URL kann analog zu der in Kapitel 4.2.1 aufgeführten aussehen.

6 Plausibilisierung des Forschungsansatzes

Die Plausibilisierung des Forschungsansatzes dient der Validierung des in dieser Arbeit vorgestellten Frameworks OPTI_BIM. Zu diesem Zweck werden die Kosten des Tragwerkmodells resultierend aus dem Parametric Design Tool mit denen des BIM-Modells, das unter Verwendung des Frameworks erstellt wurde, und dem BIM-Modell des realen Anwendungsfalls verglichen. Im nachfolgenden Kapitel 6.1 werden dafür der Reale Anwendungsfall. Im Kapitel 6.2 werden die Grundlagen für den Kostenvergleich und die Inputwerte für das Interface des Parametric Design Tools festgelegt. Zudem werden die Ergebnisse des Kostenvergleichs dargelegt.

6.1 Realer Anwendungsfall

Bei dem vorliegenden realen Anwendungsfall handelt es sich um ein Hochregallager eines bekannten Frischekosmetikherstellers in Österreich. Das Industriegebäude, das in Abbildung 17 dargestellt ist, hat eine rechteckige Form und ist an der langen Seite 84 m lang und an der kurzen Seite 60 m breit. Der Industriebau besitzt eine lichte Höhe von 14m.

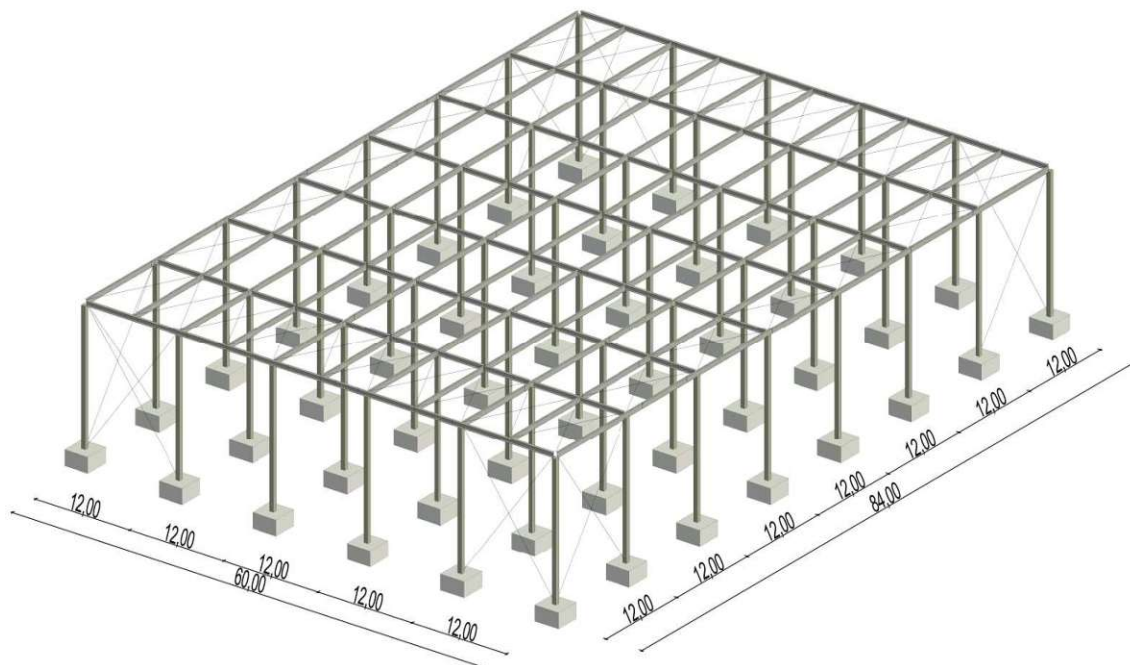


Abbildung 17 - Tragkonstruktion des Hochregallagers des realen Anwendungsfalls

Das Tragwerk des Industriegebäudes ist im Wesentlichen durch eine Stützen-Träger-Konstruktion definiert, wobei das Stützen-Achsraster sowohl in Längs- als auch in Querrichtung mit einem Abstand von 12 m ausgebildet ist. Die Stützen sind als Fertigteilstützen

mit einem Querschnitt von 50x50 cm ausgeführt. Die Dachkonstruktion hingegen ist eine Stahlkonstruktion, die aus Primärträgern, Sekundärträgern und aus Aussteifungen zur Aufnahme von Horizontallasten besteht. Die Primärträger sind dabei als HEA500, HEA400 und HEA180 in den Randbereichen der Konstruktion ausgeführt. Die Sekundärträger, die im Abstand von 6m als Durchlaufträger senkrecht zu den Primärträgern gespannt sind, sind als HEA450 ausgeführt. Ein Übersichtsplan kann dem Anhang entnommen werden.

Diese materialtechnischen und geometrischen Grundlagen dienen damit als Input-Werte für das PMOOD-Tool, das vom Institut für Integrale Planung und Industriebau der Technischen Universität Wien für die Plausibilisierung des Frameworks zur Verfügung gestellt wurde.

6.2 Grundlagen der Plausibilisierung

Die Prüfung ist ein Schlüsselpunkt des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Frameworks, um zu ermitteln, wo die Stärken und Schwächen des Frameworks liegen. Des Weiteren zeigt die Prüfung auf, inwieweit sich die Kosten der drei untersuchten Modelle voneinander unterscheiden. Die Prüfung des Frameworks gliedert sich grundsätzlich in drei Bausteine: die Definition der Modellvarianten, die Kostenermittlung und der Kostenvergleich. Der darauf basierende Workflow ist in Abbildung 18 dargestellt.

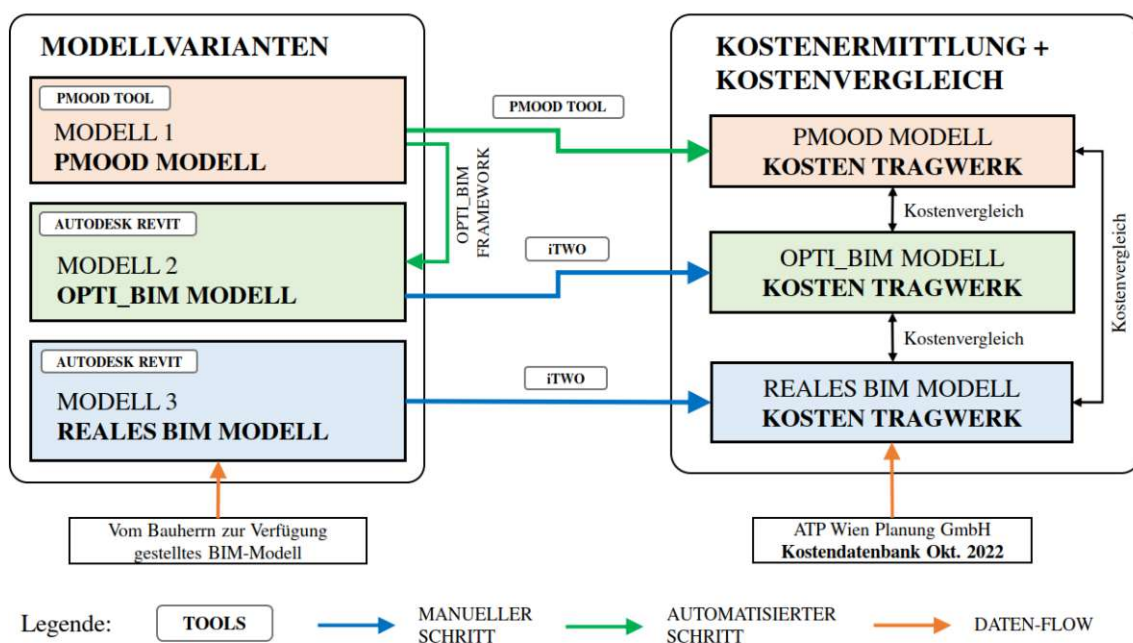


Abbildung 18 - Workflow Kostenvergleich

Für die Plausibilisierung des Frameworks werden drei unterschiedliche Modellvarianten untersucht:

- 1) **MODELL 1** – PMOOD Modell
- 2) **MODELL 2** – OPTI_BIM Modell
- 3) **MODELL 3** – Reales BIM-Modell des realen Anwendungsfalls

Das Modell 1 stellt das mit dem PMOOD-Tool entwickelte parametrische Strukturmodell dar. Dieses Modell ergibt sich aus den geometrischen, lasttechnischen und materiellen Rahmenbedingungen des realen Anwendungsfalls, die in Kapitel 6.1. beschrieben werden. Diese Rahmenbedingungen des Industriegebäudes sind daher im Interface des PMOOD-Modells hinterlegt und dienen als Grundlage für die Berechnung des Strukturmodells.

Die Inputwerte für das PMOOD-Modell sind in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellt:

Variable		Typ	Wert	Einheit
Horizontales und vertikales Modularitätstraster				
fi	Primäres Achsraster (x-)	kontinuierlich/beschränkt	12,00	m
gj	Sekundäres Achsraster (y-)	kontinuierlich/beschränkt	12,00	m
Nf	Primäre Achsfelder	kontinuierlich/beschränkt	5	Stück
Ng	Sekundäre Achsfelder	kontinuierlich/beschränkt	7	Stück
hk	Innere Hallenhöhe (z-)	Kontinuierlich	14	m
Tragwerk				
sj	Sekundäres Tragwerkssystem	diskret/ganzzahlig	Stahl Profil	-
ri	Primäres Tragwerkssystem	diskret/ganzzahlig	Stahl Profil	-
tij	Konstruktionsmaterial Stützen	diskret/ganzzahlig	Fertigteile-Stütze - quadratisch	-
bx	Aussteifung von Wand und Dach	diskret/ganzzahlig	2X2Y	-
Lasten				
gk	Ständige Last	kontinuierlich/beschränkt	1,10	kN/m ²
sk	Schneelast	kontinuierlich/beschränkt	1,68	kN/m ²
qk	Nutzlast	kontinuierlich/beschränkt	1,00	kN/m ²
wx	Windlast x-Richtung	kontinuierlich/beschränkt	0,55	kN/m ²
wy	Windlast y-Richtung	kontinuierlich/beschränkt	0,55	kN/m ²

Tabelle 3 - Input Bedingungen PMOOD-Tool

Die parametrische Berechnung führt somit zu einem Tragwerksmodell, das dem realen Anwendungsfall geometrisch angenähert ist, sich aber in den Querschnittsgrößen von der realen Struktur unterscheidet. In Abbildung 19 ist das parametrisch in Grasshopper entwickelte Modell 1 dargestellt.

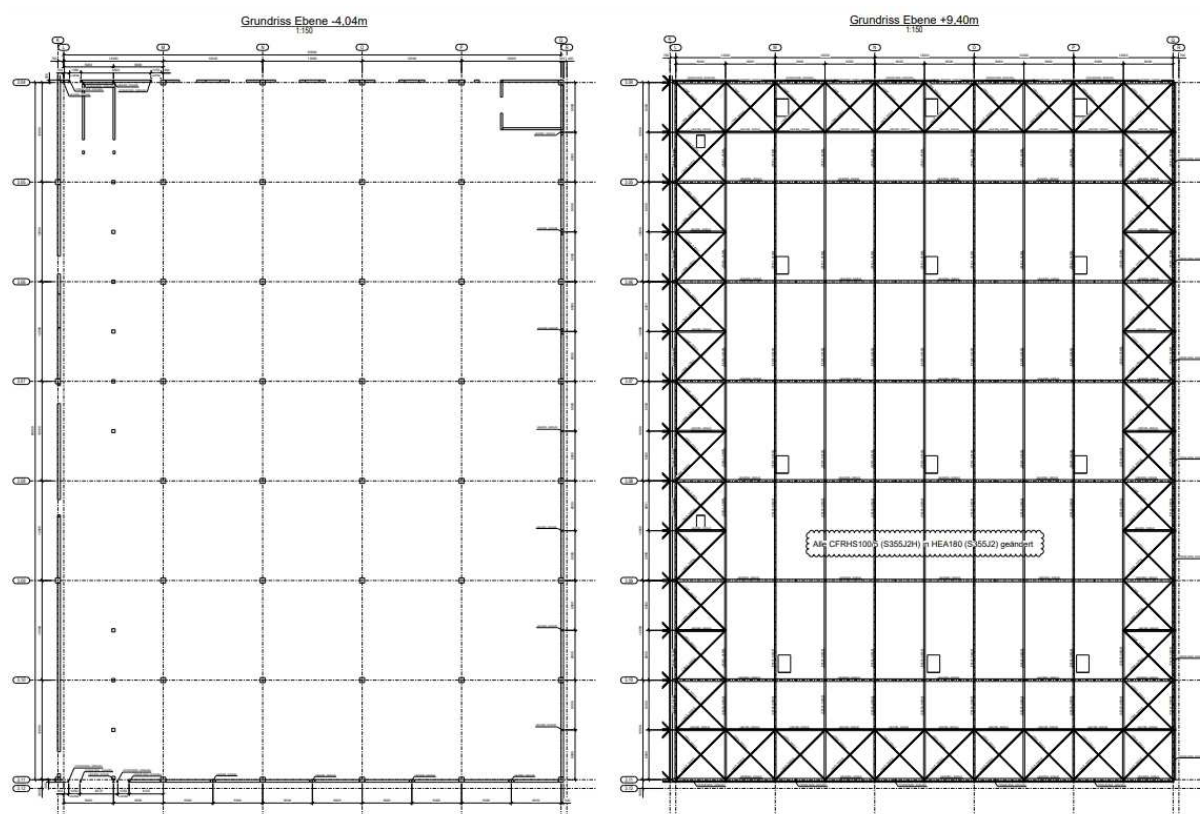


Abbildung 21 - Reales BIM-Modell des Realen Anwendungsfalls

Diese aus den Kostenberechnungen resultierenden Ergebnisse werden in weitere Folge miteinander verglichen. Dafür wird eine Delta-Soll-Ist-Analyse zwischen den Modell 1, Modell 2 und Modell 3 durchgeführt, um zu erkennen, wo die Stärken und Schwächen des Frameworks liegen, und ob es realistische Ergebnisse liefern kann.

6.2.2 Kostenermittlung

Für die Ermittlung der Kosten von Modell 1, Modell 2 und Modell 3 werden die Kostenparameter mit der Preisbasis Oktober 2022 im österreichischen Durchschnitt (excl. MwSt.) zu Grunde gelegt. Diese Kostenparameter sind in der nachfolgenden Tabelle 4 ersichtlich.

ELEMENT	MATERIAL	EH	EP-Herstellung [€/EH]
STAHLBAU			
Stahl-Profil S235	Stahl warmgewalzt	t	2.900,00 €/t
Stahl-Profil S355	Stahl warmgewalzt	t	3.600,00 €/t
Stahl-Fachwerk S235	Stahl warmgewalzt	t	3.000,00 €/t
Stahl-Fachwerk S355	Stahl warmgewalzt	t	3.800,00 €/t
STAHLBETONBAU - ORTBETON			
Einzelfundamente	Beton C25/30	m3	420,00 €/m3
Streifenfundamente	Beton C25/30	m3	380,00 €/m3
Frostschürze Ortbeton	Beton C25/30	m3	500,00 €/m3
Bewehrung B500	Bst 500B	t	1.200,00 €/t
Schalung Wand	Schalungsplatten	m2	45,00 €/m2
Schalung Decke	Schalungsplatten	m2	50,00 €/m2
STAHLBETONBAU - FERTIGTEIL			
Betonstütze C40/50	Beton-FT	m3	1.250,00 €/m3
Betonträger C40/50	Beton-FT	m3	1.100,00 €/m3
Betonstütze C50/60	Beton-FT	m3	1.300,00 €/m3
Betonträger C50/60	Beton-FT	m3	1.150,00 €/m3
Köcherfundamente	Beton-FT C25/30	m3	420,00 €/m3
HOLZBAU			
Holzfachwerk C28	BSH	m3	1.600,00 €/m3
BSH Träger/Stützen GL24h	BSH	m3	1.100,00 €/m3

Tabelle 4 - Kostenkennwerte (Preisbasis Oktober 2022)

Diese Kostenkennwerte dienen dabei als Input für das Interface des PMOOD-Modells bei der Modellvariante 1. Bei Modell 2 und Modell 3 wurden diese Kostenkennwerte manuell in iTwo eingepflegt und mit den entsprechenden Massen resultierend aus der Bauteil/Mengenlistenfunktion von Revit multipliziert.

6.2.2.1 Modell 1 – PMOOD Modell

Das Tragwerksmodell des parametrisch entwickelten Modells, weist eine Gesamtsumme von 830.478,70 € auf. Die Aufschlüsselung der Kostenbestandteile kann der nachfolgenden Tabelle 5 entnommen werden.

ELEMENT	QUERSCHNITT	LÄNGE [m]	ANZAHL [Stk.]	MASSE-GH [kg]	Kosten-GH [€]
PRIMÄRTRAGWERK	HEA 450	12,00	40,00	67.070,40	241.453,44
SEKUNDÄRTRAGWERK	IPE 500	12,00	77,00	84.139,44	302.901,98
DACH-VERBÄNDE	RD 020	13,42	64,00	338,81	1.219,71
WAND-VERBÄNDE	RD 020	18,43	16,00	116,41	419,08
FT-STÜTZEN	50x50cm	14,00	48,00	420.000,00	243.600,00
FT-KÖCHER	130x130x120cm	/	48,00	243.360,00	40.884,48
$\Sigma(\text{sum})$				815.025,06	<u>830.478,70</u>

Tabelle 5 - Kostenbestandteile der Tragwerkelemente von Modell 1

Insgesamt stellen die Dachkonstruktion, bestehend aus einer Primärkonstruktion mit 241.453€ und einer Sekundärkonstruktion mit 302.901 € und die FT-Stützen mit 243.600 € den größten Anteil an den Gesamtkosten des Tragwerks dar. Die Zusammensetzung der Gesamtkosten aufgeteilt in Tragwerkselementen ist nochmals in der folgenden Abbildung 22 dargestellt.

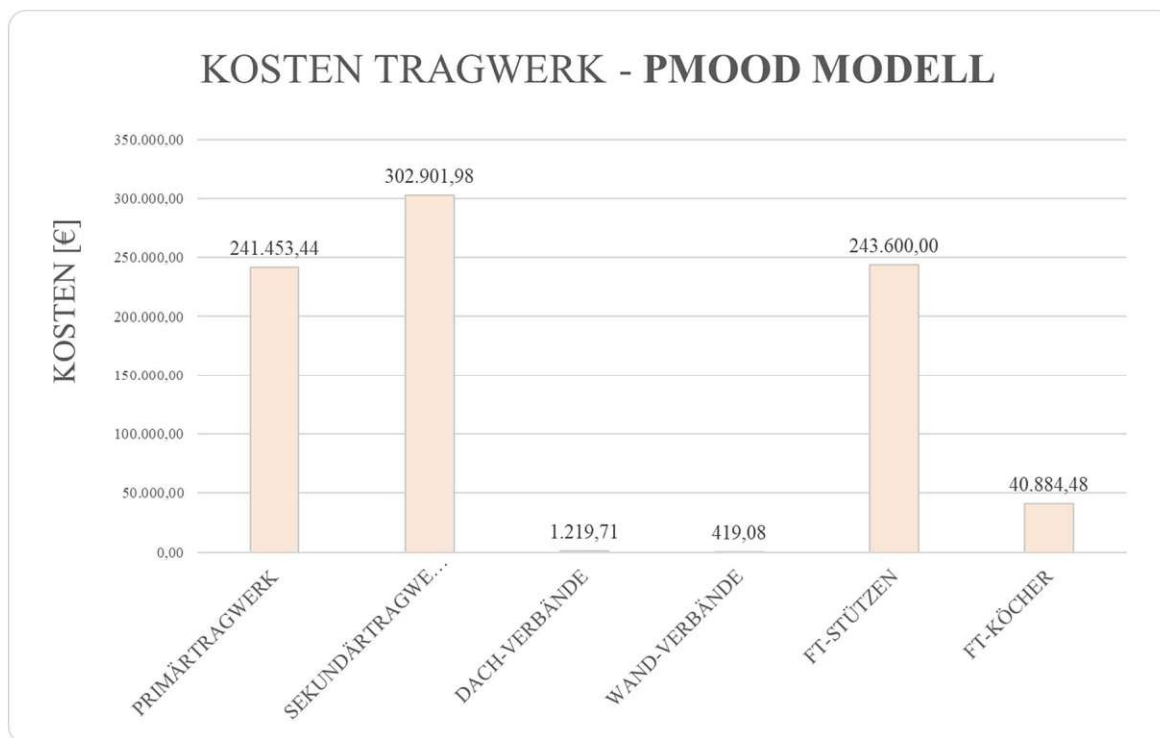


Abbildung 22 - Modell 1 - Kosten Tragwerk

6.2.2.2 Modell 2 – OPTI_BIM-Modell

Das Tragwerksmodell des BIM-Modells, welcher unter Anwendung des in dieser Arbeit vorgestellten Frameworks entwickelt worden ist, weist eine Gesamtsumme von 852.388 € auf. Die Aufschlüsselung der Kostenbestandteile kann der nachfolgenden Tabelle 6 entnommen werden.

ELEMENT	QUERSCHNITT	LÄNGE [m]	ANZAHL [Stk.]	MASSE-iTWO	Kosten-iTWO [€]
PRIMÄRTRAGWERK	HEA 450	12,00	40,00	67.200,00 kg	241.920,00
SEKUNDÄRTRAGWERK	IPE 500	12,00	77,00	89.628,00 kg	322.660,80
DACH-VERBÄNDE	RD 020	13,42	64,00	687,00 kg	2.473,20
WAND-VERBÄNDE	RD 020	18,43	16,00	236,00 kg	849,60
FT-STÜTZEN	50x50cm	14,00	48,00	168,00 m ³	243.600,00
FT-KÖCHER	130x130x120cm	/	48,00	97,34 m ³	40.884,48
$\Sigma(\text{sum})$					852.388,08

Tabelle 6 - Kostenbestandteile der Tragwerkelemente von Modell 2

Insgesamt stellen analog wie bei Modell 1 die Dachkonstruktion, bestehend aus einer Primärkonstruktion mit 241.920 € und einer Sekundärkonstruktion mit 322.660 € und die FT-Stützen mit 243.600 € den größten Anteil an den Gesamtkosten des Industriegebäudes dar. Die Zusammensetzung der Gesamtkosten aufgeteilt in Tragwerkselementen ist nochmals in der folgenden Abbildung 23 dargestellt.

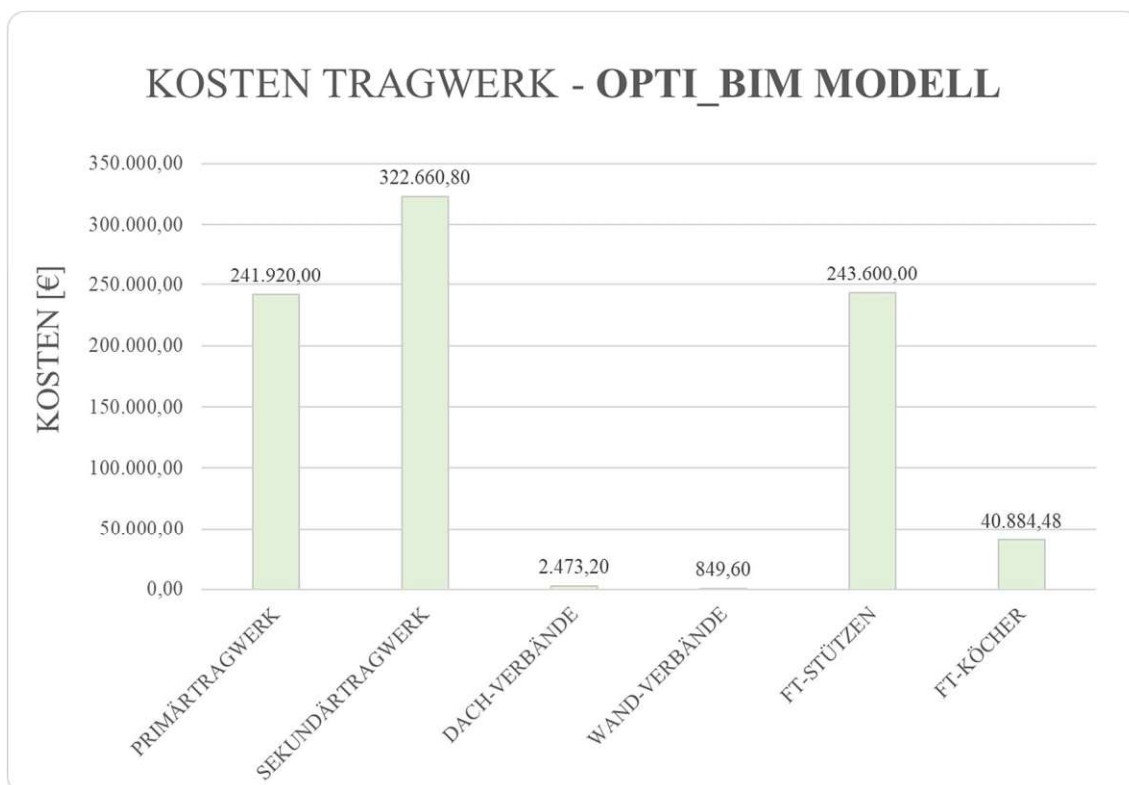


Abbildung 23 - Modell 2 - Kosten Tragwerk

6.2.2.3 Modell 3 – Reales BIM-Modell des realen Anwendungsfalls

Das Strukturmodell des BIM-Modells des realen Anwendungsfalls weist eine Gesamtsumme von 881.492 € auf.

ELEMENT	QUERSCHNITT	MASSE-iTWO	Kosten-iTWO [€]
PRIMÄRTRAGWERK	HEAA 500	25.509,00 kg	91.832,40
	HEAA 400	22.915,00 kg	82.494,00
SEKUNDÄRTRAGWERK	IPE 450	39.110,00 kg	140.796,00
	IPE 400	27.846,00 kg	100.245,60
	HEA 180	6.390,00 kg	23.004,00
DACH-VERBÄNDE	L 180x8	8.245,00 kg	29.682,00
FT-STÜTZEN	60x60 cm	221,76 m ³	321.552,00
FT-KÖCHER	130x130x120 cm	81,12 m ³	34.070,40
ORTBETON-FUNDAMENT	400x400x70 cm	44,80 m ³	18.816,00
ORTBETON-WAND	d=30 cm	3,00 m ³	39.000,00
$\Sigma(\text{sum})$			881.492,40 €

Tabelle 7 - Kostenbestandteile der Tragwerkelemente von Modell 3

Insgesamt stellen analog wie bei Modell 1 die Dachkonstruktion, bestehend aus einer Primärkonstruktion und einer Sekundärkonstruktion mit 468.054 € den größten Anteil an den Gesamtkosten des Industriegebäudes dar.

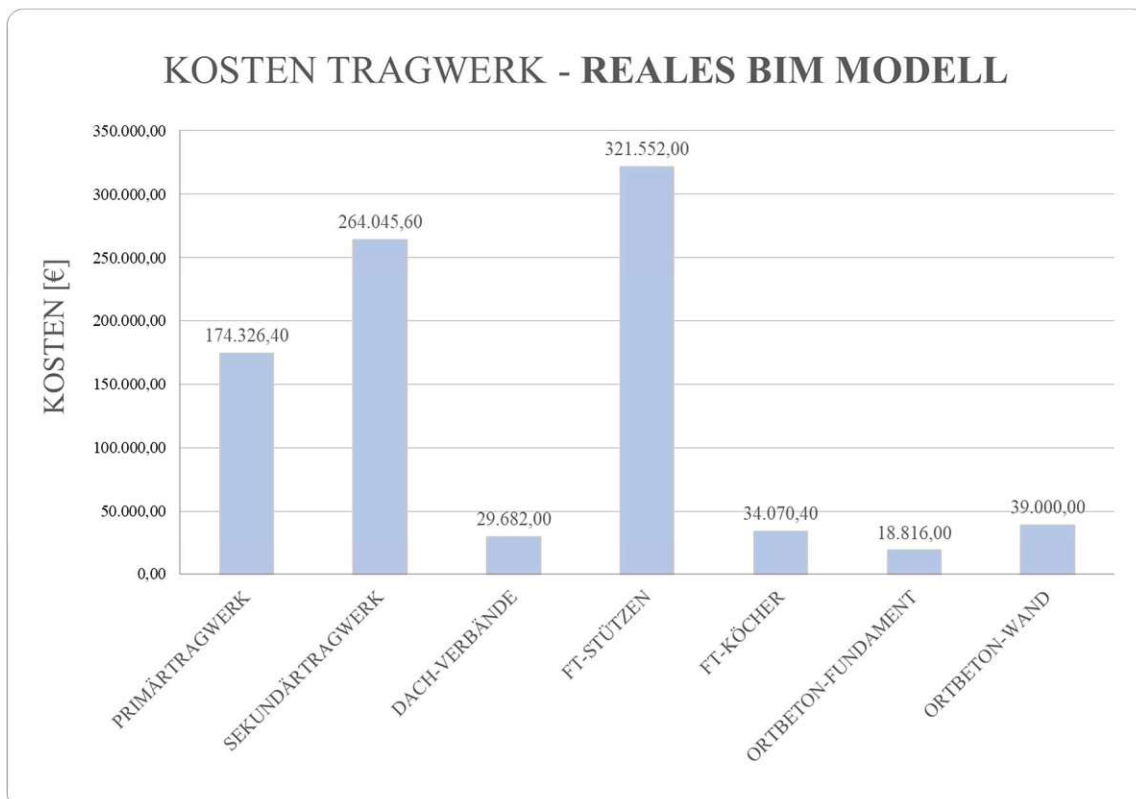


Abbildung 24 - Modell 2 - Kosten Tragwerk

6.2.3 Kostenvergleich

Wie in der Kostenberechnung von Modell 1, Modell 2 und Modell 3 zu sehen ist, unterscheidet sich das Strukturmodell Modell 3 des tatsächlichen Anwendungsfalls deutlich von der konstruktiven Ausbildung der Modelle 1 und 2. Die Primär- und Sekundärkonstruktion des Dachtragwerks, die in Modell 1 bzw. Modell 2 jeweils durch einen einzigen Trägerquerschnitt definiert sind, werden in der tatsächlichen Modellvariante beim Primärtragwerk in zwei Trägerquerschnitten (HEAA500, HEAA400) definiert und beim Sekundärtragwerk in drei Trägerquerschnitten (IPE450, IPE400, HEA180) aufgeteilt. Ein weiterer Unterschied in der Tragstruktur des Modells 3 im Vergleich zu den Modellen 1 und 2 besteht darin, dass in Modell 3 neben dem FT-Köchern auch die jeweils darunter liegenden STB-Einzelfundamente berücksichtigt wurden. Bei Modell 1 und Modell 2 wurden nur die Köcherfundamente in die parametrische Berechnung einbezogen. Bei der gebauten Variante gibt es zusätzlich eine tragende Stahlbetonwand entlang der linken Längsseite des Industriebaus, die in der Kostenberechnung berücksichtigt wurde. Die nachfolgende Abbildung 25 zeigt die Gesamtkosten der einzelnen Modellvarianten.

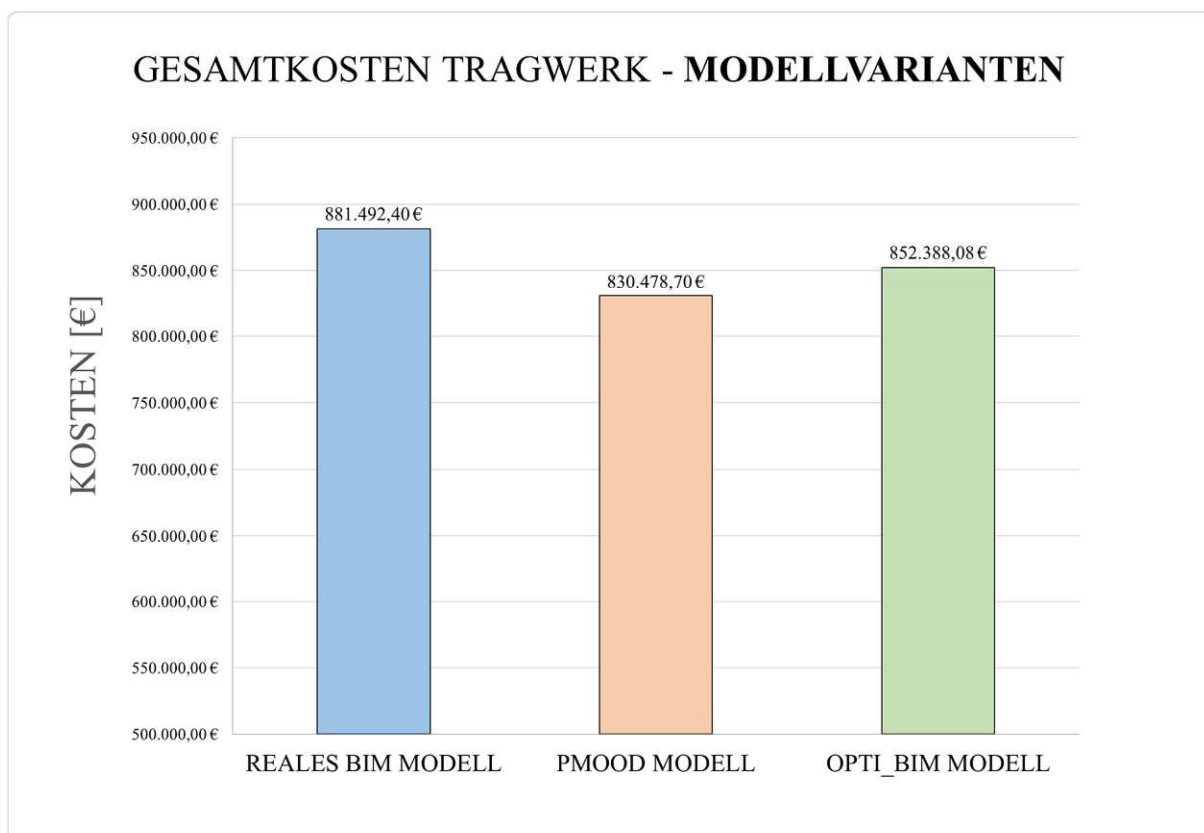


Abbildung 25 - Gesamtkosten der Modellvarianten

Die größte Kostendifferenz zwischen dem realen BIM-Modell und dem Parametric Modell wird dabei mit 51.013,70 € beziffert, was einer Abweichung von der tatsächlich gebauten Variante von etwa -5,7 % entspricht. Damit liegt diese Genauigkeit im angemessenen Bereich von +/-10 % für eine Kostenermittlung in der frühen Phase eines Industriegebäudes. Die Kostendifferenz zwischen dem Parametric Modell und mit dem Framework Generierten Modell liegt bei ca. 21.910 €. Diese Abweichung entspricht etwa 2,63 % und wird demnach als ausreichende Genauigkeit zwischen dem im PMOOD-Tool erstellten Modell und dem daraus generierten Modell eingeschätzt. Die Kostendifferenz zwischen dem Generierten Modell und dem Gebauten Modell liegt bei ca. 29.104 €. Um festzustellen, wo genau die Abweichungen zwischen dem generierten Modell und den realen Modellen liegen, werden die einzelnen Elemente der beiden Modellvarianten zerlegt und die jeweiligen elementweisen Kostenabweichungen ermittelt. Diese Kostenverteilung ist in der folgenden Tabelle 8 dargestellt.

VARIANTE	Gesamtkosten [€]	Stahlmenge [kg]	STB Fundierung [m3]	STB Wände [m2]	FT-Stützen [m3]
REALES BIM MODELL	881.492,40	130.015,00	125,92	300,00	221,76
OPTI_BIM MODELL	852.388,08	157.751,00	97,34	0,00	168,00
SUMME	29.104,32	-27.736,00	28,58	300,00	53,76

Tabelle 8 - Kostenaufschlüsselung zwischen Modell 2 und Modell 3

Hier ist zu erkennen, dass die größten Abweichungen durch die Dachkonstruktion entstehen. Diese ist im generierten Modell etwa 27 to größer. Einen ebenfalls deutlichen Unterschied gibt es bei den FT-Stützen. Diese sind im gebauten Modell als 60x60 cm ausgelegt, was zu einer erhöhten Menge von 53 m³ führt. Beseitigt man diese Unterschiede, wie in der Tabelle 9 dargestellt, wird deutlich, dass das implementierte Framework für die kombinierte Anwendung eines parametrischen Designwerkzeugs wie Grasshopper mit einem BIM-Programm wie Autodesk Revit geeignet ist.

ELEMENT	EP	MENGE	GESAMTKOSTEN [€]
STAHL	3,60	-27.736,00	-99.849,60
STB-Fundierung	420,00	28,58	12.001,92
STB-Wände	130,00	300,00	39.000,00
FT-Stützen	1.450,00	53,76	77.952,00
		SUMME	29.104,32
		DELTA Δ - NEU	0,00

Tabelle 9 - Berechnung Delta Abweichung Modell 2 und Modell 3

7 Variantenstudie

In diesem Kapitel wird eine Variantenstudie für den in Kapitel 6.1 vorgestellten realen Anwendungsfall durchgeführt. Ziel dieser Studie ist es zu zeigen, wie Variantenstudien in einer BIM-Umgebung mit Hilfe des OPTI_BIM Frameworks einfach und effizient durchgeführt werden können.

Die Durchführung einer Variantenstudie erfordert ein hohes Maß an Planung und Strukturierung, um sicherzustellen, dass alle relevanten Faktoren in das parametrische Modell berücksichtigt werden. Daher werden in Kapitel 7.1 die verschiedenen Schritte, Prozesse und Randbedingungen erläutert, die zur Durchführung der Studie notwendig sind. Die Ergebnisse der Variantenstudie werden in Kapitel 7.2 präsentiert. Hierbei werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Varianten ausführlich beleuchtet und bewertet. Die Diskussion der Ergebnisse liefert eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die weitere Entwicklung des Projekts. Es wird gezeigt, wie das OPTI_BIM Framework dabei hilft, die Entscheidungsfindung zu erleichtern und zu optimieren. Insgesamt zeigt diese Variantenstudie auf, wie einfach und effizient es ist, Variantenstudien unter Anwendung des OPTI_BIM Frameworks in eine BIM-Umgebung zu integrieren. Das OPTI_BIM Framework stellt somit eine ideale Grundlage für die Durchführung von Variantenstudien in BIM dar.

7.1 Workflow

Für die Variantenstudie für den in Kapitel 6.1 vorgestellten realen Anwendungsfall müssen vor der eigentlichen Durchführung grundlegende Anforderungen an das OPTI_BIM Framework definiert werden. Zu diesen Anforderungen gehören die Eingaben und Randbedingungen für das PMOOD-Tool, der daraus resultierende Design Space und die Modellvarianten des Tragwerks, welche für die Variantenstudie verwendet werden. Anschließend werden drei Tragwerkssystemvarianten mithilfe des Speckle Webservers an das BIM Softwareprodukt Revit übermittelt. Diese drei Varianten werden letztendlich in BIM miteinander verglichen und die Unterschiede zueinander in Bezug auf Kosten und Nachhaltigkeit aufgezeigt. Der Ablauf der Variantenstudie kann der nachfolgenden Abbildung 26 entnommen werden.

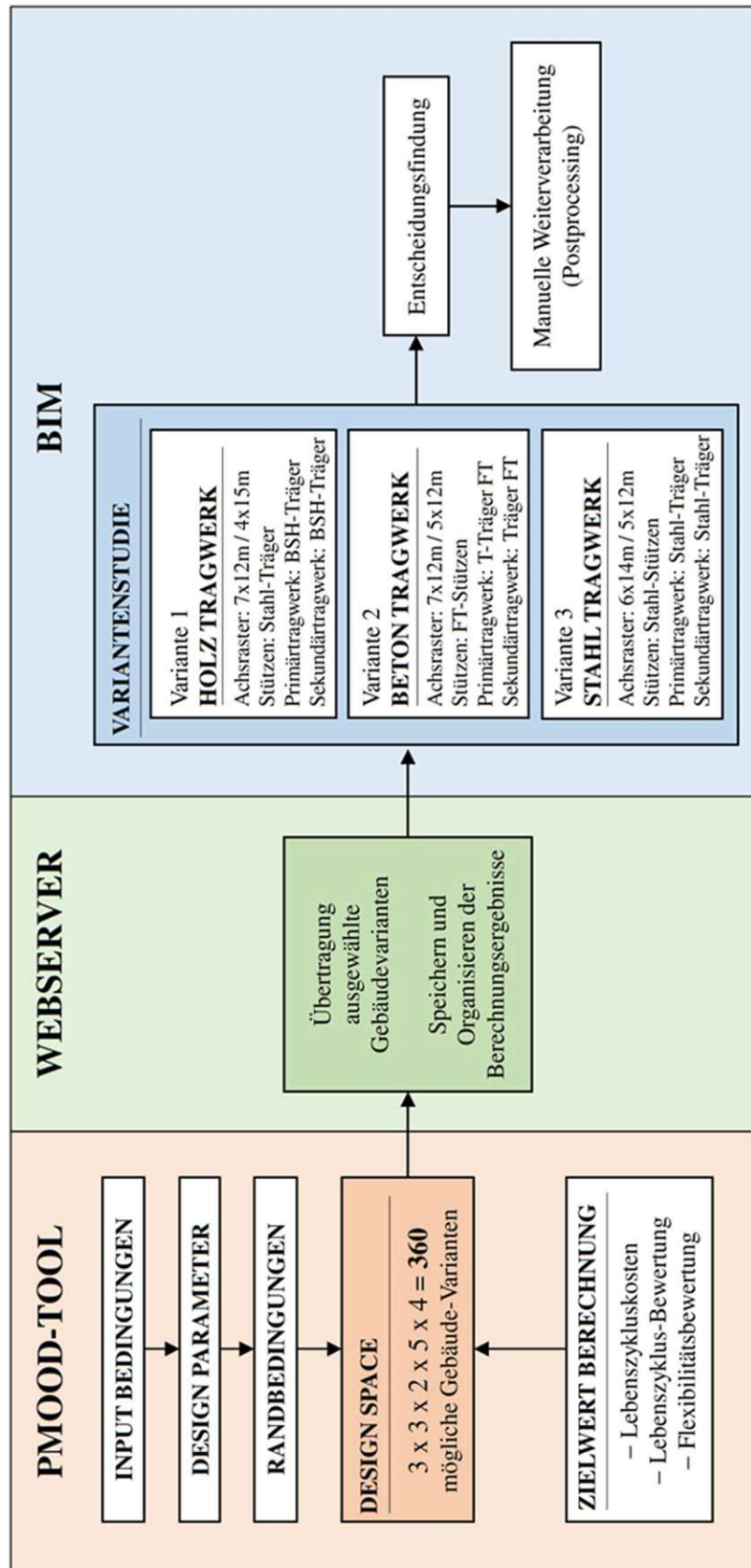


Abbildung 26 - Workflow zur Durchführung von Variantenstudien unter Verwendung des OPTI_BIM Frameworks mit Einbeziehung von Kosten- und LCA-Informationen

Grundlage für das PMOOD-Tool und die darauf aufbauende Zielwertberechnung sind die Inputbedingungen, die die Ausgangsstruktur des parametrischen Tragwerksystems definieren. Diese Inputbedingungen, wie in Tabelle 10 dargestellt und analog dazu bereits in Kapitel 6.2 vorgestellt, werden in das Input-Interface des PMOOD-Tools eingepflegt und umfassen das Modularitätsraster des Anwendungsfalls, die strukturbezogenen Vorgaben des Tragwerks und die Lasten, welche auf das Tragwerks des Industriebaus wirken.

Variable		Typ	Wert	Einheit
Horizontales und vertikales Modularitätsraster				
fi	Primäres Achsraster (x-)	kontinuierlich/beschränkt	12,00	m
gj	Sekundäres Achsraster (y-)	kontinuierlich/beschränkt	12,00	m
Nf	Primäre Achsfelder	kontinuierlich/beschränkt	5	Stück
Ng	Sekundäre Achsfelder	kontinuierlich/beschränkt	7	Stück
hk	Innere Hallenhöhe (z-)	Kontinuierlich	14	m
Tragwerk				
sj	Sekundäres Tragwerkssystem	diskret/ganzzahlig	Stahl Profil	-
ri	Primäres Tragwerkssystem	diskret/ganzzahlig	Stahl Profil	-
tij	Konstruktionsmaterial Stützen	diskret/ganzzahlig	Fertigteile-Stütze - quadratisch	-
bx	Aussteifung von Wand und Dach	diskret/ganzzahlig	2X2Y	-
Lasten				
gk	Ständige Last	kontinuierlich/beschränkt	1,10	kN/m ²
sk	Schneelast	kontinuierlich/beschränkt	1,68	kN/m ²
qk	Nutzlast	kontinuierlich/beschränkt	1,00	kN/m ²
wx	Windlast x-Richtung	kontinuierlich/beschränkt	0,55	kN/m ²
wy	Windlast y-Richtung	kontinuierlich/beschränkt	0,55	kN/m ²

Tabelle 10 - Input Bedingungen PMOOD-Tool

Das Industriegebäude, das eine Länge von 84 m, eine Breite von 60 m und eine Höhe von 14 m hat, stellt somit den Ausgangspunkt für die weitere Anwendung des OPTI_BIM-Frameworks dar. Damit in weiterer Folge eine Zielwertberechnung für das Tragwerk des realen Anwendungsfalls durchgeführt werden kann, müssen neben den grundlegenden Input-Bedingungen, Design Parameter und Randbedingungen definiert werden. Design Parameter sind im Wesentlichen Variablen, die das Erscheinungsbild des Tragwerks verändern. Durch das systematische Variieren dieser Design-Parameter können unterschiedliche Entwurfsvarianten des Tragwerks definiert werden. Für die in diesem Kapitel vorgestellte Variantenstudie werden Design Parameter für das horizontale Modularitätsraster und für das Tragwerk vorgesehen, die in der nachfolgenden Tabelle 11 dargestellt sind.

Design Parameter
Achsraster
Primärachsraster
10 m
12 m
15 m
Sekundärachsraster
12 m
14 m
21 m
Tragwerk
Stützen
Fertigteil-Stütze – quadratisch
Stahl HEM-Querschnitt
Primärtragwerk
Stahl Fachwerk
Stahl Profil
Fertigteil-T-Träger
Brettschichtholzträger
Holz-Fachwerk
Sekundärtragwerk
Stahl Fachwerk
Stahl Profil
Fertigteil-Träger - quadratisch
Brettschichtholzträger

Tabelle 11 - Design Parameter für Zielwertberechnung

Im Rahmen des parametrischen Entwurfsprozesses sind für das Primär- und Sekundärachsraster jeweils drei verschiedene Optionen für die Rastergeometrie definiert worden. Das Achsraster kann entlang der x-Achse entweder 10m, 12m oder 15m und entlang der y-Achse entweder 12m, 14m oder 21m betragen. Aus tragwerkstechnischer Sicht werden für die Stützen zwei materialspezifische Design Parameter festgelegt, wodurch diese als Fertigteil-Stütze oder HEM-Stahlprofil ausgeführt werden können. Das Primärtragwerk hingegen wird durch fünf Design Parameter beschrieben und kann als Stahl-Fachwerk, Stahl-Profil, Fertigteil-T-Träger, Brettschichtholzträger oder Holz-Fachwerk ausgeführt werden. Das Sekundärtragwerk wird durch vier Design Parameter beschrieben und kann als Stahl-Fachwerk, Stahl-Profil, Fertigteil-T-Träger oder Brettschichtholzträger ausgeführt werden. In der Summe ergeben die gesamten Design Parameter den sogenannten Design Space, der die Anzahl der möglichen Designvarianten definiert. Der Design Space enthält somit $3 \times 3 \times 2 \times 5 \times 4 = 360$ mögliche Entwurfsvarianten, die vom PMOOD-Tool in weiterer Folge automatisch generiert, statisch dimensioniert und berechnet werden. Die Entwurfsvarianten der Tragwerksysteme werden im Zuge der automatisierten Berechnung zudem statisch/konstruktiv als auch geometrisch auf Übereinstimmung mit den in Tabelle 12 definierten Randbedingungen überprüft. Die

parametrische Berechnung einer Entwurfsvariante führt somit zu einem funktionalen Tragwerksystem, welches für die weitere Anwendung des OPTI_BIM Frameworks, bzw. für die Variantenstudie geeignet ist.

	Randbedingungen	Erlaubte Werte
Statisch / Konstruktiv	Ausnutzungsgrad der Tragwerks ≤ 1	[0,1]
	Verformung \leq zulässige Verformung	[0,x]
	Abstand Sekundärtragwerk $\leq 6\text{m}$	[0,6]
	Stabilität des Tragerks	[wahr, falsch]
Geometrie	Gebäudehöhe \leq max. Grundstückshöhe Höhe	[0,1]
	Gebäudeabmessung $>$ Produktion-Layout-Grenze	[0,1]
	Gebäudeabmessung $<$ Grundstücksabmessung	[0,1]

Tabelle 12 - Statisch/Konstruktive- und Geometrische Randbedingungen

Im Zuge des parametrischen Entwurfsprozesses der Tragwerksysteme stellt die Berücksichtigung von Lebenszykluskosten sowie die Analyse des Lebenszyklus ebenfalls ein wichtiger Aspekt dar. Daher werden bei der Untersuchung der Entwurfsvarianten ergänzend zu den geometrischen und statisch/konstruktiven Kriterien auch die zugehörigen Lebenszykluskosten sowie Werte für die Lebenszyklusanalyse (LCA) nach den Vorgaben der Norm ISO/TC59 und des IBO aus dem Jahr 2018 berechnet. Unter Annahme, dass das Gebäude für eine Dauer von 50 Jahren ausgelegt wird, werden für die Lebenszykluskosten der Materialien die Kostenkennwerte, wie in Kapitel 6.3.2. definiert, herangezogen. Die Kostenkennwerte entsprechen dabei die Herstellungskosten. Die materialspezifischen LCA-Kennwerte werden der öffentlichen Online-Plattform für nachhaltiges Bauen und Sanieren www.baubook.at entnommen, wobei für die Berechnung der Lebenszykluskosten die Lebenszyklusphasen A1-A3 (Herstellungsphase) berücksichtigt wurde.

O	Zielwert	Berechnung
O1	Lebenszykluskosten [€]	(ISO/TC59)
O2	Global Warming Potential (GWP) [kgCO ₂ equ.]	(IBO, 2018b)
O3	Versauerungspotential [kgSO ₂ Äqu.]	(IBO, 2018b)
O4	Primärenergiebedarf [MJ]	(IBO, 2018b)
O5	Primärenergie Nicht erneuerbar [MJ]	(IBO, 2018b)

Tabelle 13 - Zielwerte die im PMOOD-Tool ermittelt werden

Für die Variantenstudie in BIM werden drei unterschiedliche Tragwerksmodelle (Tabelle 14), welche jeweils eine spezifische Materialkategorie repräsentieren, ausgewählt. Die erste Variante umfasst ein Holztragwerk, wobei lediglich die Stützen aus Stahl bestehen. Die zweite

Variante besteht aus einem Betontragwerk, während die dritte Variante ein Stahltragwerk darstellt.

	Variante 1 HOLZBAU	Variante 2 BETONBAU	Variante 3 STAHLBAU	Einheit
Horizontales und vertikales Modularitätstraster				
Primäres Achsraster (x-)	15,00	12,00	12,00	m
Sekundäres Achsraster (y-)	12,00	12,00	14,00	m
Primäre Achsfelder	4	5	5	Stück
Sekundäre Achsfelder	7	7	6	Stück
Innere Hallenhöhe (z-)	14	14	14	m
Tragwerk				
Primärtragwerk	BSH-Träger 0220x1600 - GL28h	FT-T-Träger T 1000 - C30/37	Stahl Profil HEA 500 - S355	-
Sekundärtragwerk	BSH-Träger 0300x0800 - GL28h	FT-Träger 0200x0800 - C30/37	Stahl Fachwerk Obergurt/Untergurt/Vertikale: HEA100 - S355 Diagonale: HEA140 - S355	-
Stützen	Stahl Profil HEM 1000 - S235	FTI-Stütze - quadratisch 0500x0500 - C50/60	Fertigteile-Stütze - quadratisch HEM 1000 - S235	-
Aussteifung	2X2Y RD 20 - S235	2X2Y RD 20 - S235	2X2Y RD 20 - S235	-
Lasten				
Ständige Last	1,10	1,10	1,10	kN/m ²
Schneelast	1,68	1,68	1,68	kN/m ²
Nutzlast	1,00	1,00	1,00	kN/m ²
Windlast x-Richtung	0,55	0,55	0,55	kN/m ²
Windlast y-Richtung	0,55	0,55	0,55	kN/m ²

Tabelle 14 - Ausgewählte Entwurfsvarianten für die Variantenstudie

Die Tragwerksysteme mit Berechnungsergebnissen werden anschließend mithilfe von Speckle-Nodes in Grasshopper erfasst und über einen Speckle-REST-API-Endpoint an den Speckle-Webserver übermittelt. Dort werden sie in die entsprechende Datenbank automatisiert gespeichert und organisiert. Im nachfolgenden Schritt werden die Modelle in Revit abgerufen und in die grafische Modellierungsoberfläche der Software geladen.

Da sich diese wissenschaftliche Arbeit im Kern auf die Entwicklung des Frameworks konzentriert, verfolgt die in diesem Kapitel vorgestellte Variantenstudie den Zweck, zu demonstrieren, wie eine solche Variantenstudie mit dem BIM_Opti Framework durchgeführt werden kann. Folglich werden keine Materialien, Beschichtungen etc. berücksichtigt, die im Laufe der Nutzungsdauer ausgetauscht werden müssen bzw. eine Ertüchtigung oder Instandsetzung der Industriehalle erforderlich machen.

7.2 Variantendefinition

Mit dieser Variantenstudie soll gezeigt werden, wie Variantenstudien mit dem BIM_OPTI-Framework einfach und effizient durchgeführt werden können. Die im vorangegangenen Kapitel definierten Modellvarianten werden dabei auf ihre Kosten und Nachhaltigkeit hin untersucht. Anschließend wird eine Einschätzung gegeben, welches der Tragwerksystemvarianten sich am besten für das Industriebauvorhaben eignet.

7.2.2 Variante 1 – Holztragwerk

Das Holztragwerk ist durch ein Achsraster in x-Richtung von 4x15m und in y-Richtung von 7x12m charakterisiert. Die gesamte Dachkonstruktion des Industriebaus ist dabei komplett in Holzbauweise realisiert. Die Primärtragkonstruktion des Holztragwerks besteht aus einem Brettschichtholz-Träger mit einem Querschnitt von 220x1600mm. Die Sekundärkonstruktion des Tragwerks wird ebenfalls durch einen Brettschichtholzträger realisiert und weist einen Querschnitt von 300x800mm auf. Die Stützen des Holztragwerks sind als HEM1000-Stahlprofile ausgeführt. In nachfolgender Abbildung 27 ist das aus dem OPTI_BIM Framework resultierende BIM-Modell in Autodesk Revit dargestellt.

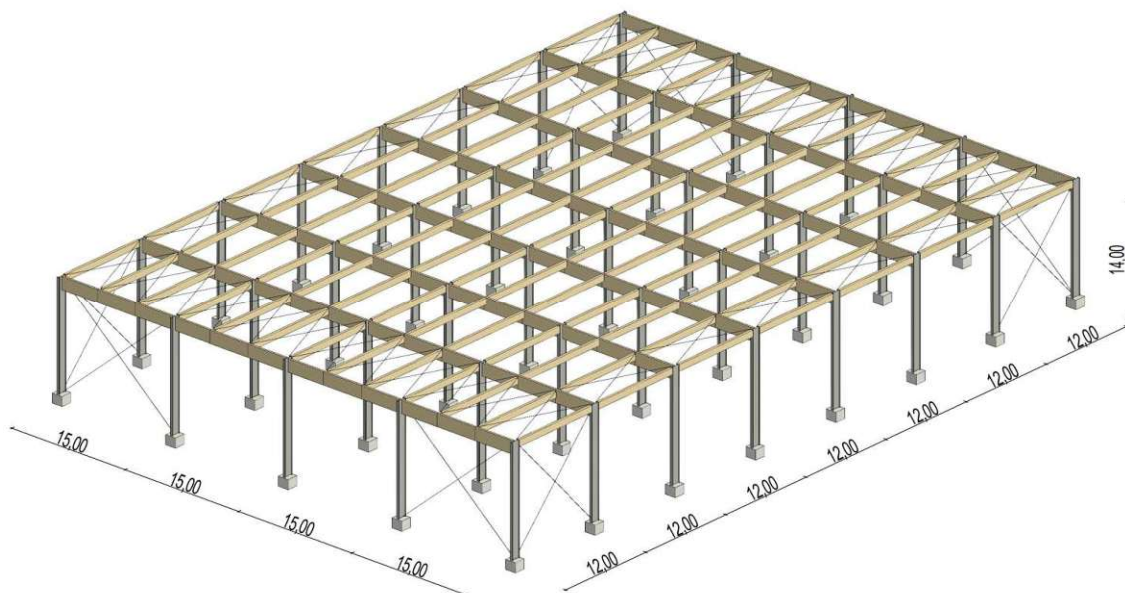
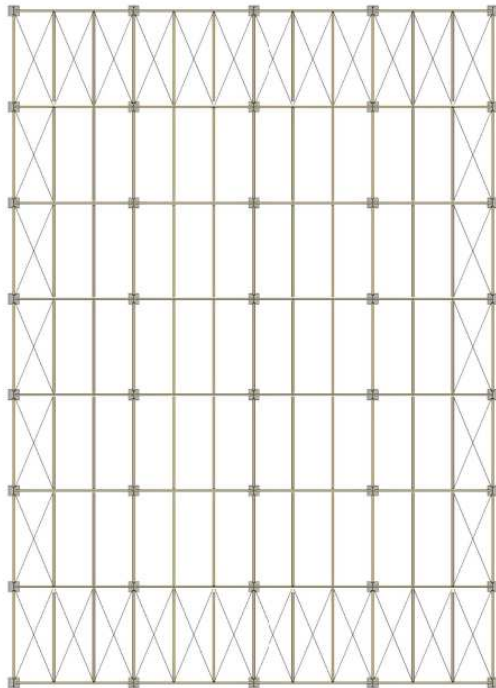


Abbildung 27 - 3D-Visualisierung Variante 1 in BIM

Gemäß der parametrischen Berechnung und Auswertung in Revit weist das gesamte Tragwerk eine Gesamtsumme der Lebenszykluskosten von 1.283.000 € auf. Zusätzlich ist bei dieser Variante ein Treibhauspotenzial (Global Warming Potential) von 709.694 kg Kohlendioxid-Äquivalenten vorhanden. Das Versauerungspotential (AP) beträgt 516 kg Schwefeldioxid-

Äquivalente. Der erneuerbare Primärenergiebedarf (PERT) des Tragwerks beträgt insgesamt 3.908.400 MJ, während der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) bei 1.268.500 MJ liegt. In Abbildung 28 sind die Berechnungsergebnisse, wie sie in Revit präsentiert werden, dargestellt.



TRAGWERK
Primärtragwerk: BSH-Träger - 0220x1600 - GL28h
Sekundärtragwerk: BSH-Träger - 0300x0800 - GL28h
Stütze: Stahl-Profil - HEM1000 - S235
Verbände: Stahl-Profil - RD20 - S235

LCC: 1283000 €
GWP: 709694 kg/CO2eq
AP: 516 kg/SO2eq
PENRT: 1268500 MJ
PERT: 3908400 MJ

Abbildung 28 - Berechnungsergebnisse Variante 1 in BIM

7.2.3 Variante 2 – Betontragwerk

Das Betontragwerk des Industriegebäudes ist durch ein Achsraster in x-Richtung von 5x12m und in y-Richtung von 7x12m charakterisiert. Die gesamte Konstruktion wird in Betonbauweise ausgeführt. Die Primärtragkonstruktion besteht aus einem Fertigteil-T-Träger mit einem Querschnittsprofil T100, welcher eine Höhe von 1,00 m aufweist. Die Sekundärkonstruktion wird durch einen rechteckigen FT-Träger realisiert, der einen Querschnitt von 200x800mm hat. Die Stützen des Tragwerks haben einen Querschnitt von 50x50cm und sind als FT-Stützen ausgeführt. Das resultierende BIM-Modell aus dem OPTI_BIM Framework ist in Revit in der Abbildung 29 dargestellt.

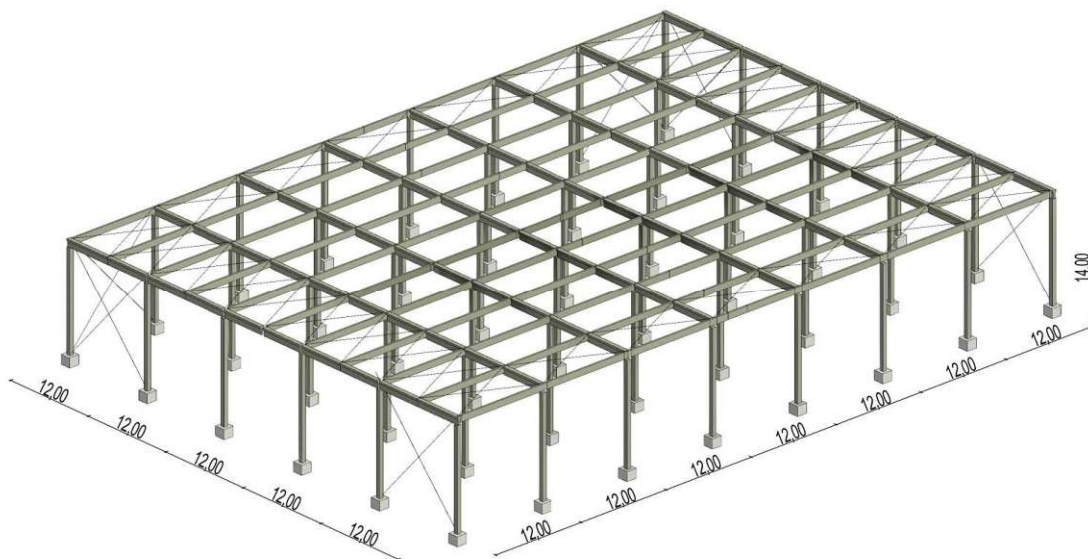


Abbildung 29 - 3D-Visualisierung Variante 2 in BIM

Gemäß der parametrischen Berechnung und Auswertung in Revit weist das gesamte Tragwerk eine Gesamtsumme der Lebenszykluskosten von 972.891 € auf. Zusätzlich ist bei dieser Variante ein Treibhauspotenzial von 1.450.100 kg Kohlendioxid-Äquivalenten vorhanden. Das Versauerungspotential beträgt 909 kg Schwefeldioxid-Äquivalente. Der erneuerbare Primärenergiebedarf des Tragwerks beträgt insgesamt 4.841.100 MJ, während der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf bei 1.102.900 MJ liegt. In Abbildung 30 sind die Berechnungsergebnisse, wie sie in Revit präsentiert werden, dargestellt.

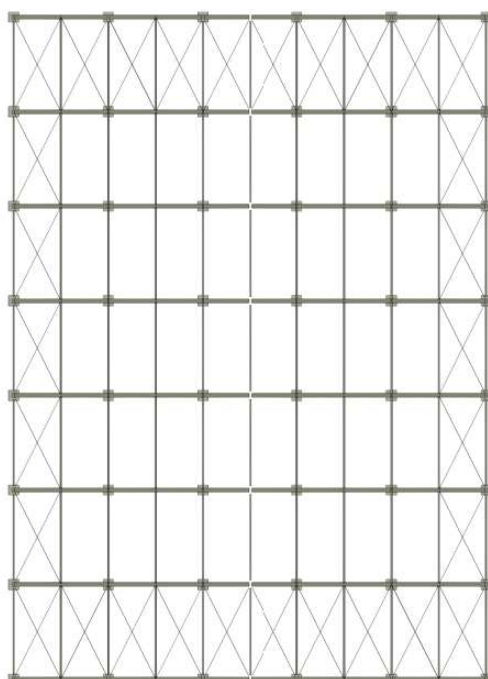
**TRAGWERK****Primärtragwerk: FT-T-Träger - T1000 - C30/37****Sekundärtragwerk: FT-Träger - 0200x0800 - C30/37****Stütze: FT-Stütze - 0500x0500 - C50/60****Verbände: Stahl-Profil - RD20 - S235****LCC: 972891 €****GWP: 1450100 kg/CO₂eq****AP: 909 kg/SO₂eq****PENRT: 4841100 MJ****PERT: 1102900 MJ**

Abbildung 30 - Berechnungsergebnisse Variante 2 in BIM

7.2.4 Variante 3 – Stahltragwerk

Die Stahlkonstruktion des Industriegebäudes ist durch ein Achsraster von 5x12m in x-Richtung und 6x14m in y-Richtung gekennzeichnet. Die gesamte Struktur ist dabei in Stahlbauweise ausgeführt. Die primäre Tragstruktur besteht aus einem Stahlprofil mit einem HEA500-Querschnitt. Die Sekundärstruktur besteht aus einem Stahlfachwerk, bei dem der Obergurt, der Untergurt und die vertikalen Pfosten durch ein HEA100-Profil gekennzeichnet sind. Die Diagonalstreben des Fachwerks sind durch ein HEA140-Profil gekennzeichnet. Die Stützen des Fachwerks sind analog zu Variante 1 durch ein HEM1000 Profil ausgeführt. Das resultierende BIM-Modell aus dem OPTI_BIM-Framework in Revit ist in nachfolgender Abbildung 31 dargestellt.

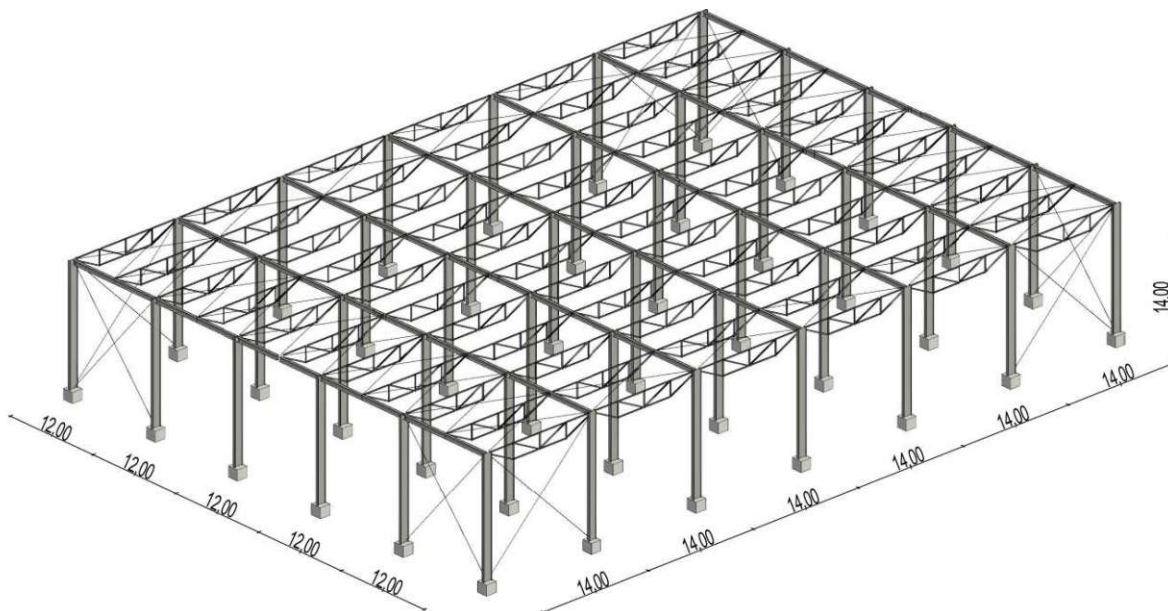
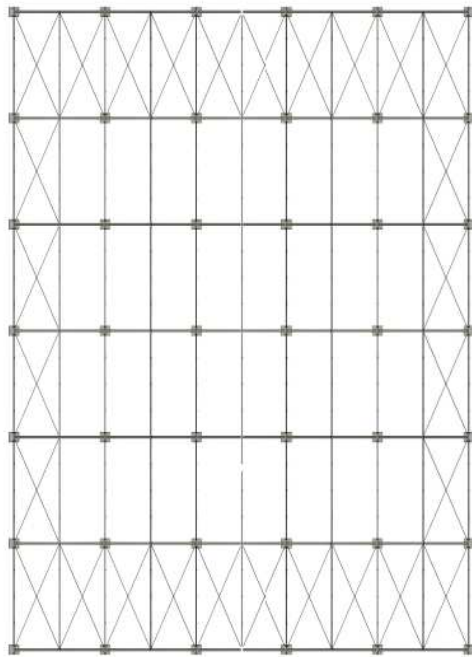


Abbildung 31 - 3D-Visualisierung Variante 2 in BIM

Gemäß der parametrischen Berechnung und Auswertung in Revit weist das gesamte Tragwerk eine Gesamtsumme der Lebenszykluskosten von 1.187.500 € auf. Zusätzlich ist bei dieser Variante ein Treibhauspotenzial von 1.105.700 kg Kohlendioxid-Äquivalenten vorhanden. Das Versauerungspotential beträgt 619 kg Schwefeldioxid-Äquivalente. Der erneuerbare Primärenergiebedarf des Tragwerks beträgt insgesamt 3.380.300 MJ, während der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf bei 717.764 MJ liegt. In Abbildung 32 sind die Berechnungsergebnisse, wie sie in Revit präsentiert werden, dargestellt.



TRAGWERK
Primärtragwerk: Stahl-Profil - HEA500 - S355
Sekundärtragwerk: Stahl-Fachwerk - HEA100/HEA140 - S355
Stütze: Stahl-Profil - HEM1000 - S235
Verbände: Stahl-Profil - RD20 - S235

LCC: 1187500 €
GWP: 1105700 kg/CO₂eq
AP: 619 kg/SO₂eq
PENRT: 3380300 MJ
PERT: 717764 MJ

Abbildung 32 - Berechnungsergebnisse Variante 2 in BIM

7.2.5 Vergleich der Ergebnisse

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zwischen den verschiedenen Tragwerksvarianten zu erhalten, werden die drei Varianten mit dem OPTI_BIM-Modell verglichen, welches zur Plausibilisierung des Frameworks in Kapitel 6 dieser Arbeit mit Hilfe des OPTI_BIM-Frameworks entwickelt wurde. Die Nachhaltigkeitswerte des OPTI_BIM Modells resultieren analog zu den Tragwerksvarianten der Variantenstudie aus der Zielwertberechnung des PMOOD-Tools. Recyclingpotential und Abfall als Nachhaltigkeitsparameter werden nicht berücksichtigt. Die nachfolgende Tabelle 15 verdeutlicht die Ergebnisse der jeweiligen Modellvarianten.

VARIANTE	LCC [€]	GWP [kg/CO ₂ eq]	AP [kg/SO ₂ eq]	PERT [MJ]	PENRT [MJ]
Variante1	1.283.000,00	709.694,00	516,00	3.908.400,00	1.268.500,00
Variante2	972.891,00	1.450.100,00	909,00	1.102.900,00	4.841.100,00
Variante3	1.187.500,00	1.105.700,00	619,00	717.764,00	3.380.300,00
OPTI_BIM Modell	852.388,00	1.745.100,00	964,00	1.111.700,00	5.281.500,00

Tabelle 15 - Herstellungskosten + LCA der Modellvarianten

Die Varianten unterscheiden sich erheblich in ihren Kosten und Nachhaltigkeitswerten. Die günstigste Variante ist die OPTI_BIM Variante mit Gesamtkosten von 852.388,00 €. Variante 2 hat die zweitniedrigsten Gesamtkosten von 972.891,00 €. Variante 1 und Variante 3 haben die höchsten Gesamtkosten von 1.283.000,00 € bzw. 1.187.500,00 €.

VARIANTE	Δ -LCC [€]	Δ -GWP [kg/CO ₂ eq]	Δ -AP [kg/SO ₂ eq]	Δ -PERT [MJ]	Δ -PENRT [MJ]
Variante1	-430.612,00	1.738.003,06	448,00	-2.796.700,00	4.013.000,00
Variante2	-120.503,00	1.730.599,00	55,00	8.800,00	440.400,00
Variante3	-335.112,00	639.400,00	345,00	393.936,00	1.901.200,00
OPTI_BIM Modell	852.388,00	1.745.100,00	964,00	1.111.700,00	5.281.500,00

Abbildung 33 - Delta-Werte der Modellvarianten mit Ausgangsbasis OPTI_BIM Modell

In Bezug auf die Nachhaltigkeitswerte schneidet die OPTI_BIM Variante, welche auf dem realen Anwendungsfall beruht, am schlechtesten ab. Sie hat das höchste GWP (1.745.100,00 kg/CO₂eq), AP (964,00 kg/SO₂eq) und PENRT (5.281.500,00 MJ) von allen Varianten. Die Variante 2 hat das zweithöchste GWP (1.450.100,00 kg/CO₂eq), den zweithöchsten PENRT (4.841.100,00 MJ) und den zweithöchsten AP (909,00 kg/SO₂eq) von allen Varianten. Bei diesen beiden Varianten beruht dies hauptsächlich darauf, dass die Herstellung von Beton und Stahl im Allgemeinen eine höhere Umweltbelastung verursacht als die Herstellung von Holz. Vor allem die Herstellung von Zement, dem Hauptbestandteil von Beton, ist sehr energieintensiv und führt zu hohen CO₂-Emissionen. Auch die Herstellung von Stahl erfordert erhebliche Mengen an Energie und verursacht CO₂-Emissionen. (Nidheesh and Kumar 2019). Variante 1 hat im Vergleich zu den anderen Varianten das niedrigste GWP (709.694,00 kg/CO₂eq) und AP (516,00 kg/SO₂eq), was auf die Verwendung von Holz als primäre und sekundäre Tragstruktur zurückzuführen ist. Holz als Baustoff hat in der Regel eine geringere Umweltbelastung als Beton und Stahl, da es im Gegensatz zu diesen Materialien während seines Wachstums Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufnimmt und speichert. Zudem ist Holz ein nachwachsender Rohstoff, der in der Regel mit geringem Energieaufwand und CO₂-Ausstoß produziert werden kann. Diese Eigenschaften führen zu einem niedrigeren GWP und AP für die Variante 1 im Vergleich zu den anderen Varianten. (Buchanan and Levine 1999)

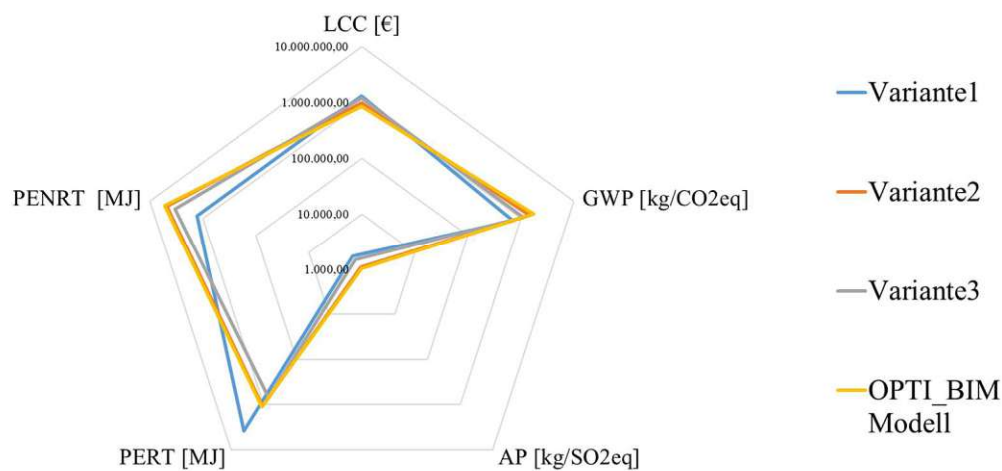


Abbildung 34 - Radar-Diagramm zur Veranschaulichung der Performance der Modellvarianten

Die Variante 3 hat den niedrigsten PERT-Wert (717.764,00 MJ) im Vergleich zu den anderen Varianten, was darauf hinweist, dass bei dieser Variante wenig Primärenergie benötigt wird, um das Tragwerk herzustellen. Im Gegensatz weist die Variante 3 einen großen PENRT-Wert (3.380.300,00 MJ), was darauf hinweist, dass bei dieser Variante vergleichsweise viel nicht-erneuerbare Primärenergie benötigt wird, um das Tragwerk herzustellen.

Insgesamt zeigt sich, dass Variante 1 und Variante 3 die nachhaltigsten Optionen sind, da sie von allen Varianten die niedrigsten GWP-, AP-, PERT- und PENRT-Werte aufweisen. Betrachtet man jedoch rein die Kosten, so ist die OPTI_BIM Variante die beste Option, da sie die niedrigsten Lebenszykluskosten aufweist.

8 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Arbeit wurde das OPTI_BIM Framework entwickelt, um eine interoperable Anwendung von Parametric Design und Building Information Modeling in der frühen Entwurfsphase von Industriegebäuden zu ermöglichen. Das vorgeschlagene Framework hat sich in der praktischen Anwendung als effizient erwiesen und bietet eine schnelle und genaue Bewertung von Entwurfsvarianten in BIM unter Berücksichtigung von Kosten und Nachhaltigkeitsaspekten.

Die in Kapitel 6 präsentierte Plausibilisierung des Frameworks hat nachgewiesen, dass das OPTI_BIM Framework erfolgreich implementiert wurde und funktioniert. Zudem zeigt die Plausibilisierung, dass die Kostenabweichung zwischen den OPTI_BIM generierten Modell und dem Modell des realen Anwendungsfalls signifikant geringer als 10 % ist. Dieser Wert fällt dadurch innerhalb der für Vorentwurfs- und Entwurfsphasen üblichen Kostengenauigkeit und stellt somit sicher, dass das Framework eine optimale und verlässliche Präzision hinsichtlich der Entwicklung von Tragwerkslösungen gewährleistet. Die in Kapitel 7 durchgeführte Variantenstudie verdeutlicht die praktische Anwendbarkeit des OPTI_BIM Frameworks und betont seine Bedeutung für die frühe Entwurfsphase von Industriegebäuden. Zudem wird durch die Studie deutlich, dass die Integration von Nachhaltigkeits- und Kosteninformationen innerhalb von BIM ohne größere Schwierigkeiten möglich ist. Dank des OPTI_BIM Frameworks können Variantenstudien nun direkt in der BIM-Umgebung stattfinden, anstatt sie auf herkömmliche Art und Weise mithilfe manueller Tabellenkalkulationen durchzuführen. Dies bietet erhebliche Vorteile für Planerinnen und Planer, da sie fortan mit ihren Standard-BIM-Programmen weiterführende Untersuchungen von parametrisch entwickelten Modellvarianten durchführen können, ohne auf unterschiedliche Softwareprodukte angewiesen zu sein. Die Möglichkeit, Variantenstudien direkt in BIM durchzuführen, erlaubt zudem eine schnelle Verarbeitung der Modelle sowie deren Betrachtung und Kontrolle in 3D. Diese umfassendere Möglichkeit der Entscheidungsfindung während der Entwurfsphase von Industriegebäuden stellt einen signifikanten Fortschritt gegenüber konventionellen Planungsmethoden dar. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in dieser Arbeit hervorgehoben wird, ist die Interoperabilität zwischen Parametric Design und BIM. Die bisherigen Ansätze zur Verknüpfung dieser beiden Methoden waren begrenzt, was die potenziellen Vorteile ihrer kombinierten Nutzung einschränkte. Das OPTI_BIM Framework, basierend auf cloudbasierten Datenaustauschprotokollen, überwindet diese Limitation und stellt eine vielversprechende

Lösung zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in der frühen Entwurfsphase von Industriebauten dar. Trotz der vielversprechenden Ergebnisse und Anwendungen des OPTI_BIM Frameworks in dieser Arbeit sind weitere Untersuchungen erforderlich. Zukünftige Forschungen könnten sich auf die Erweiterung des Frameworks konzentrieren, um zusätzliche Aspekte wie Energieeffizienz, Materialwahl und Bauprozesse zu integrieren. Darüber hinaus sollte in der zukünftigen Forschung und Entwicklung der Workflow im Rahmen von interdisziplinären Variantenstudien mit Studierenden und Experten erprobt werden, um nähere Erkenntnisse über Feasability, Usability und Ease of Use treffen zu können, mit dem Ziel, die Anwendung noch weiter zu verbessern.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass das OPTI_BIM Framework ein effizientes und effektives Werkzeug für die frühe Entwurfsphase von Industriegebäuden darstellt, indem es die Vorteile von Parametric Design und BIM kombiniert. Die verbesserte Interoperabilität, die das Framework bietet, ermöglicht es den Planerinnen und Planern, fundierte Entscheidungen zu treffen und so den Entwurfsprozess insgesamt zu optimieren. In Anbetracht der globalen Herausforderungen im Zusammenhang mit Ressourceneffizienz, Klimawandel und nachhaltiger Entwicklung ist die Einführung von innovativen Ansätzen wie dem OPTI_BIM Framework von entscheidender Bedeutung, um den Industriebau zukunftsfähig zu gestalten.

Literaturverzeichnis

Aec-Systems-Ltd. (2023). "Speckle." Retrieved 05.02.2023, from <https://speckle.systems/>.

Afsari, K., et al. (2017). "JavaScript Object Notation (JSON) data serialization for IFC schema in web-based BIM data exchange." Automation in Construction **77**.

Albrecht, M. (2014). Building Information Modeling (BIM) in der Planung von Bauleistungen, disserta Verlag.

Autodesk-Inc. (2023). "Revit: BIM software for designers, builders, and doers." Retrieved 05.02.2023, from <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>.

Azhar, S. (2011). "Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry." Leadership and Management in Engineering **11**(3): 241-252.

Borrmann, A., et al. (2018). Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice, Springer International Publishing.

Buchanan, A. and S. Levine (1999). "Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions." Environmental Science & Policy **2**.

Dejaco, M., et al. (2020). "Combining LCA and LCC in the early-design stage: a preliminary study for residential buildings technologies." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Doglio, F. (2018). REST API Development with Node.js, Apress Berkeley.

Dynamo (2023). "Dynamo." Retrieved 05.02.2023, from <https://dynamobim.org/>.

Egger, M., et al. (2013). BIM-Leitfaden für Deutschland, Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

Golubski, W. (2020). Entwicklung verteilter Anwendungen, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Grasshopper (2023). "Grasshopper." Retrieved 05.02.2023, from <https://www.grasshopper3d.com/>.

Gu, N., et al. (2018). "Parametric Design: Theoretical Development and Algorithmic Foundation for Design Generation in Architecture." Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences.

Iancu, B. and T. Georgescu (2018). "Saving Large Semantic Data in Cloud: A Survey of the Main DBaaS Solutions." Informatica Economică **18**.

Mourtis, T. and M. Boyle (2022). Parametric Design—A Drive Towards a Sustainable Future. Innovation in Construction Springer.

Nidheesh, P. and S. Kumar (2019). "An overview of environmental sustainability in cement and steel production." Journal of Cleaner Production **231**.

Paschke, M., et al. (2004). Digital Prototyping – Modelling Concepts for a Generative Computer Based-Design of Complex Tensile Structures. International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management. E. K. i. t. A. o. t. S. Web.

Poinet, P., et al. (2020). "Supporting collaborative design and project management for AEC using Speckle's interactive data flow diagram."

Reisinger, J. (2022). Parametric optimization and decision support framework for the realization of flexible and sustainable industrial buildings incorporating production planning at early design stage. Wien, Wien.

Reisinger, J., et al. (2022). "Parametric Optimization and Decision Support Model Framework for Life Cycle Cost Analysis and Life Cycle Assessment of Flexible Industrial Building Structures Integrating Production Planning." Buildings **12**(2): 162.

Reisinger, J., et al. (2022). Framework for integrated multi-objective optimization of production and industrial building design. 2022 European Conference on Computing in Construction. Ixia, Rhodes, Greece.

Rhinoceros3D (2023). "Rhino 7." Retrieved 05.02.2023, from <https://www.rhino3d.com/>.

RIB-Software (2023). "iTWO." Retrieved 05.02.2023, from <https://www.rib-software.com/loesungen/projekt-unternehmensloesung-itwo-40>.

Röck, M., et al. (2018). "LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages." Building and Environment **140**.

SDK_Finance. "From 0 to 250+ RESTful API During A Year." from <https://sdk.finance/celebration-of-an-api-driven-year/>.

Sibenik, G., et al. (2021). "Implementation of Open Data Exchange between Architectural Design and Structural Analysis Models." Buildings **2021**.

Vignek, K. (2017). "The Best Computational BIM Workflows for Architects." from <https://revitaddons.blogspot.com/2017/04/opinion-best-computational-bim.html>.

Vinay;, K. and A. Delis (2005). "Efficient Processing of Client Transactions in Real-Time." Distributed and Parallel Databases **17**.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Aufwandsverlagerung (Borrmann, König et al. 2018)	12
Abbildung 2 - Methodische Vorgehensweise zur Entwicklung eines Frameworks.....	18
Abbildung 3 - OPTI_BIM Framework Schematisch	19
Abbildung 4 - Framework OPTI_BIM.....	21
Abbildung 5 - Schema einer Client-Server-Verbindung (SDK_Finance)	23
Abbildung 6 - POST-Anfrageprozess über eine REST-API zum Informationsabruf.....	24
Abbildung 7 - GET-Anfrageprozess über eine REST-API zum Informationsabruf.....	25
Abbildung 8 - JSON-Objekt einer Tragwerksstütze	27
Abbildung 9 - Konvertierungsprozess JSON zu IFC	28
Abbildung 10 - PMOOD-Modell vorgestellt in (Reisinger, Wang-Sukalia et al. 2022)	30
Abbildung 11 - Verfahrensschritte OPTI_BIM Framework	31
Abbildung 12 - Erfassung der Ergebnisse exemplarisch für die Primärträger.....	32
Abbildung 13 - Übertragung der Ergebnisse an den Webserver.....	33
Abbildung 14 - Darstellung der Entwurfsvarianten in BIM	33
Abbildung 15 - Speckle-Connector in Grasshopper	34
Abbildung 16 - Revit-Speckle-Connector in Revit.....	35
Abbildung 17 - Tragkonstruktion des Hochregallagers des realen Anwendungsfalls.....	36
Abbildung 18 - Workflow Kostenvergleich.....	37
Abbildung 19 - PMOOD-Modell	39
Abbildung 20 - OPTI_BIM Modell	39
Abbildung 21 - Reales BIM-Modell des Realen Anwendungsfalls.....	40
Abbildung 22 - Modell 1 - Kosten Tragwerk.....	42
Abbildung 23 - Modell 2 - Kosten Tragwerk.....	43
Abbildung 24 - Modell 2 - Kosten Tragwerk.....	44
Abbildung 25 - Gesamtkosten der Modellvarianten	45
Abbildung 26 - Workflow zur Durchführung von Variantenstudien unter Verwendung des OPTI_BIM Frameworks mit Einbeziehung von Kosten- und LCA-Informationen	48
Abbildung 27 - 3D-Visualisierung Variante 1 in BIM	53
Abbildung 28 - Berechnungsergebnisse Variante 1 in BIM	54
Abbildung 29 - 3D-Visualisierung Variante 2 in BIM	55
Abbildung 30 - Berechnungsergebnisse Variante 2 in BIM	55
Abbildung 31 - 3D-Visualisierung Variante 2 in BIM	56

Abbildung 32 - Berechnungsergebnisse Variante 2 in BIM	57
Abbildung 33 - Delta-Werte der Modellvarianten mit Ausgangsbasis OPTI_BIM Modell	58
Abbildung 34 - Radar-Diagramm zur Veranschaulichung der Performance der Modellvarianten	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - BIM-Softwareprodukte	13
Tabelle 2 - Softwareprodukte zur kombinierten Nutzung von BIM und parametrischer Planung (Vignek 2017)	14
Tabelle 3 - Input Bedingungen PMOOD-Tool	38
Tabelle 4 - Kostenkennwerte (Preisbasis Oktober 2022).....	41
Tabelle 5 - Kostenbestandteile der Tragwerkelemente von Modell 1	42
Tabelle 6 - Kostenbestandteile der Tragwerkelemente von Modell 2	43
Tabelle 7 - Kostenbestandteile der Tragwerkelemente von Modell 3	44
Tabelle 8 - Kostenaufschlüsselung zwischen Modell 2 und Modell 3.....	46
Tabelle 9 - Berechnung Delta Abweichung Modell 2 und Modell 3	46
Tabelle 10 - Input Bedingungen PMOOD-Tool	49
Tabelle 11 - Design Parameter für Zielwertberechnung	50
Tabelle 12 - Statisch/Konstruktive- und Geometrische Randbedingungen	51
Tabelle 13 - Zielwerte die im PMOOD-Tool ermittelt werden	51
Tabelle 14 - Ausgewählte Entwurfsvarianten für die Variantenstudie	52
Tabelle 15 - Herstellungskosten + LCA der Modellvarianten	57

KOSTENRAHMEN

Kostenberechnung Hochregallager Modell 3 – Reales BIM-Modell des realen Anwendungsfalls

Schlüssel	Bezeichnung	Menge	ME	Einheitspreis in EUR	Gesamtbetrag in EUR
2	Rohbau				
21	Stahlbetonbauteile				
211	Fundierung				
2111	FT-Köcherhals, C25/30 XC2, 1,30x1,30x1..	81,120	m3	420,00	34.070,40
2112	STB-Einzelfundament. C25/30 XC2, 4,0x..	44,800	m3	420,00	18.816,00
	Summe 211 Fundierung				52.886,40
212	FT-Stützen				
2121	FT-Stützen, C50/60 B2, 60x60cm	221,760	m3	1.450,00	321.552,00
	Summe 212 FT-Stützen				321.552,00
213	STB-Wände, tragend				
2131	STB-Wand, C25/30 XC1, d=30cm, SCH+Bew	300,000	m2	130,00	39.000,00
	Summe 213 STB-Wände, tragend				39.000,00
	Summe 21 Stahlbetonbauteile				413.438,40
22	Konstruktiver Stahlbau				
221	Primärträgerk				
2211	Trägerkonstruktion - HEAA500 S355	31,509	t	3.600,00	113.432,40
2212	Trägerkonstruktion - HEAA400 S355	22,915	t	3.600,00	82.494,00
	Summe 221 Primärträgerk				174.326,40
222	Sekundärkonstruktion				
2221	Trägerkonstruktion - IPE450 S355	39,110	t	3.600,00	140.796,00
2222	Trägerkonstruktion - IPE400 S355	27,846	t	3.600,00	100.245,60
2223	Trägerkonstruktion - HEA180 S355	6,390	t	3.600,00	23.004,00
	Summe 222 Sekundärkonstruktion				264.045,60
223	Verbände				
2231	Verbände Dachebene - L 100x8 S355	8,245	t	3.600,00	29.682,00

KOSTENRAHMEN

Kostenberechnung Hochregallager Modell 3 – Reales BIM-Modell des realen Anwendungsfalls

Schlüssel	Bezeichnung	Menge	ME	Einheitspreis in EUR	Gesamtbetrag in EUR
	Summe 223 Verbände				29.682,00
	Summe 22 Konstruktiver Stahlbau				468.054,00
	Summe 2 Rohbau				881.492,40
	Gesamtsumme				881.492,40
	Zuzüglich 20,00% Mehrwertsteuer				176.298,48
	Gesamtsumme Brutto				1.057.790,88

Einheitspreise in Klammern berechnen sich aus Gesamtbetrag / Menge.

Der Gesamtbetrag ist die Summe der zugehörigen Teilleistungen.

KOSTENRAHMEN

Kostenberechnung Hochregallager Modell 2 – OPTI_BIM Modell

Schlüssel	Bezeichnung	Menge	ME	Einheitspreis in EUR	Gesamtbetrag in EUR
2	ROHBAU				
21	Stahlbetonfertigteile				
212	FT-Köcher				
2121	FT-Köcherhals, C25/30 XC2, 1,30x1,30x1..	97,344	m3	420,00	40.884,48
	Summe 212 FT-Köcher				40.884,48
213	FT-Stützen				
2131	FT-Stützen 1 gesch. eckig 50x50cm, B2 ..	168,000	m3	1.450,00	243.600,00
	Summe 213 FT-Stützen				243.600,00
	Summe 21 Stahlbetonfertigteile				284.484,48
22	Konstruktiver Stahlbau				
221	Primärtragwerk				
2211	Trägerkonstruktion - HEA450 S355	67,200	t	3.600,00	241.920,00
	Summe 221 Primärtragwerk				241.920,00
222	Sekundärtragwerk				
2221	Trägerkonstruktion - IPE500 S355	89,628	t	3.600,00	322.660,80
	Summe 222 Sekundärtragwerk				322.660,80
223	Verbände				
2231	Verbände Dachebene - RD020 S355	0,687	t	3.600,00	2.473,20
2232	Verbände Wandebene - RD020 S355	0,236	t	3.600,00	849,60
	Summe 223 Verbände				3.322,80
	Summe 22 Konstruktiver Stahlbau				567.903,60
	Summe 2 ROHBAU				852.388,08
	Gesamtsumme				852.388,08

KOSTENRAHMEN
Kostenberechnung Hochregallager
Modell 2 – OPTI_BIM Modell

Schlüssel	Bezeichnung	Menge	ME	Einheitspreis in EUR	Gesamtbetrag in EUR
	Zuzüglich 20,00% Mehrwertsteuer				170.477,62
	Gesamtsumme Brutto				1.022.865,70
<p><i>Einheitspreise in Klammern berechnen sich aus Gesamtbetrag / Menge. Der Gesamtbetrag ist die Summe der zugehörigen Teilleistungen.</i></p>					