

DIPLOMA THESIS

# Parametric Modeling of flexible structures for the Industry 4.0

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

---

DIPLOMARBEIT

## Parametrische Modellierung von flexiblen Tragwerken für die Industrie 4.0

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

von

**Maximilian Knoll**

Matr.Nr.: 01325583

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Iva Kovacic**

Dipl.-Ing. **Julia Reisinger** Univ.Ass.

Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement  
Forschungsbereich Integrale Bauplanung und Industriebau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/234-02, A-1040 Wien



---

Wien, im April 2021



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 Industrie 4.0 stellt mit ihren vernetzten und digitalisierten Produktionsprozessen, welche ständigen Anpassungen unterworfen sind, nie dagewesene Ansprüche an unsere Produktionsstätten. Ständige Innovation, wirtschaftliche Abwägungen sowie neue Produktentwicklungen stellen hohe Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit von Industriegebäuden. Zusätzlich besteht ein immer höherer Anspruch an die ökologische Nachhaltigkeit unserer gebauten Umwelt.

Sequenzielle Planungsprozesse werden in Zukunft diesen hohen Anforderungen nicht gewachsen sein und der Bedarf nach innovativen und integralen Planungsansätzen, welche in kurzer Zeit eine faktische und umfangreiche Entscheidungsgrundlage liefern, steigt. Zu diesem Zweck wird in dieser Forschungsarbeit auf Basis einer umfangreichen Analyse der realen Industriebaulandschaft ein Framework für ein parametrisches Planungstool (PARAT) zur Planung und Optimierung von Industriebauhallentragwerken entwickelt. Dabei werden neben Tragwerksaspekten auch Parameter der Produktions- und Technische Gebäudeausstattungsplanung (TGA) integriert und deren Abhängigkeiten berücksichtigt. Dies ermöglicht schnelle und umfangreiche Variantenstudien für Tragwerkstypologien in der frühen Planungsphase von Industriebauten. Zusätzlich werden Flexibilitätskriterien definiert, welche eine automatisierte Bewertung der generierten Vorentwürfe ermöglicht.

Die Forschungsmethode basiert auf einer umfangreichen Case-Study von 22 realen Industriebauten hinsichtlich deren Tragwerkstypologien und Geometrie. Das entwickelte parametrische Framework wird anhand eines realen Industriebauobjektes aus der Lebensmittelproduktion getestet. Die Ergebnisse der Variantenstudie, welche 162 verschiedene Hallentragwerkstypologien umfasst, werden anschließend analysiert und mittels einer Vergleichsberechnung plausibilisiert.

Diese Variantenstudie hat gezeigt, dass mittels dem parametrischen Tragwerksskript in kurzer Zeit zahlreiche Tragwerkstypologien für verschiedene Lastsituationen analysiert werden können. Die automatisierte Bewertung der Flexibilität des Vorentwurfs liefert zusätzlich eine transparente Entscheidungsgrundlage für den frühen Planungsprozess. Dies erleichtert und fördert die Entwicklung von flexiblen Tragwerkssystemen und trägt somit zur Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden bei.

## Abstract

Industry 4.0, with its networked and digitalized production processes that are subject to constant adaptation, imposes unprecedented demands on our production facilities. Constant innovation, economic considerations and new product developments set high demands on the adaptability of industrial properties. In addition, there is an ever-increasing requirement for the ecological sustainability of our built environment.

In the future, sequential planning processes will not be able to cope with these high expectations and the need for innovative and integral planning approaches, that provide a factual and extensive basis for decision-making in a short period of time, is increasing. For this purpose, a framework for a parametric planning tool (PARAT) for the planning and optimization of industrial building structures is developed in this research work. The framework is based on an analysis of the real industrial building landscape. In addition to structural aspects, parameters of the production and building service equipment (BSE) planning are integrated and their dependencies are considered. This enables fast and extensive variant studies for structural typologies and layouts in the early planning phase of industrial buildings. In addition, flexibility criteria are defined, which enable an automated evaluation of the generated preliminary drafts.

The research method is based on a case-study of 22 real industrial buildings regarding their structural typologies and geometry. The parametric framework developed is tested for a real industrial production building. The results of the variant study, which includes 162 different hall structure typologies, are then analyzed and checked for plausibility via a comparative calculation.

This variant study has shown that using the parametric structural script, numerous structural typologies for different load situations can be analyzed in a short time. The automated evaluation of the flexibility of the preliminary design also provides a transparent basis for decision-making for the early planning process. This facilitates and promotes the development of flexible structural systems with an enhanced lifespan.

## Abkürzungsverzeichnis

BSH	Brettschichtholz
STB	Stahlbeton
FT	Fertigteil
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
TGA	Technische Gebäudeausstattung
TWP	Tragwerksplanung
ARCH	Architektur
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
BIM	Building Information Modelling
FE	Finite-Elemente-Methode
PARAT	Parametrisches Tragwerksskript
XLS	Microsoft Excel
EC	Eurocode (Normen zur Harmonisierung der Berechnungsvorschriften)
EN	Europäische Norm
ÖN	Österreichische Norm
GUI	Graphical User Interface

## Danksagung

Besonderen Dank möchte ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Iva Kovacic und dem gesamten Forschungsbereich für integrale Bauplanung und Industriebau aussprechen. Mit ihrem unermüdlchen Einsatz für innovative Planungs- und Lehrmethoden wird ein großer und wertvoller Beitrag zum Studium des Bauingenieurwesens geleistet.

Im Speziellen danke ich auch meiner Betreuerin Dipl.-Ing. Julia Reisinger Univ.Ass., welche mir mit ihrer innovativen Forschungsarbeit die Möglichkeit geboten hat, die ambitionierte Welt der universitären Forschung von der besten Seite kennenzulernen. Zusätzlich stand sie immer mit Rat und Tat geduldig zur Seite.

Wie jeder Studierende bestätigen kann, lässt sich der oftmals stressige Studienalltag gemeinsam oft besser bewältigen. Somit möchte ich an dieser Stelle auch meinen treuesten Weggefährten Valentin Lunzer und Stephan Loncsek danken, mit welchen ich viele Stunden meines Studiums verbringen durfte.

Abschließend gilt der größte Dank meiner Familie und meiner Partnerin Valentina, welche mich während meines gesamten Lebens in jedweder Hinsicht unterstützen. Ihr immerwährender Rückhalt ist mir stets eine große Stütze und hat maßgeblichen Anteil an meinem Studienerfolg.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Forschungsprojekt BIM Flexi.....	1
1.2	Forschungsfragen .....	3
1.3	Methodik.....	3
1.4	Ergebnisse.....	3
2	Methodische Vorgehensweise.....	4
2.1	State of the Art & Use-Case Analyse .....	4
2.2	Programmierung Tragwerksskript.....	4
2.2.1	Verwendete Software .....	5
2.3	Proof of Concept - Variantenstudie .....	6
3	Literaturrecherche.....	8
4	Stand der Technik .....	11
4.1	State of the Art in der Forschung .....	11
4.2	Use-Case Analyse .....	11
4.2.1	Geometrische Parameter .....	11
4.2.2	Tragwerksspezifische Parameter.....	14
5	Framework Proposal .....	23
5.1	Input Architekturplanung .....	23
5.2	Input TGA-Planung.....	24
5.3	Input Produktionsplanung.....	24
5.4	Input Tragwerksplanung.....	24
5.5	Automatisierte Bewertungsfunktion – Kosten- & Flexibilität.....	26
5.5.1	Zieldefinition - Objectives.....	26
5.5.2	Randbedingungen – Constraints.....	29
5.5.3	Bewertungsfunktion .....	31
6	Parametrisches Tragwerksskript.....	32
6.1	Aufbau- und Ablauforganisation .....	32
6.2	Schnittstelle Produktionsplanung - „Production Layout Import and Selection“ .....	34
6.3	Eingangsparameter – „Parameter Input- Modellierungsraum“ .....	34
6.4	Grundlagen parametrisches Modell – „Preprocessing Parametric Model“ .....	35
6.5	Definition Strukturelemente – „Element Definition“ .....	40
6.6	Statische Analyse Struktur – „Statical Analysation“ .....	43
6.7	Nachbearbeitung – „Post-Processing“ .....	46
6.8	Ergebnisse und Kostenberechnung – „Results & Manufacturing Costs“ .....	47
6.9	Berechnung Bewertungsfunktion – „Calculation Fitness Function“ .....	47
7	Proof of Concept – Variantenstudie .....	48
7.1	Aufgabenstellung .....	48
7.2	Workflowdefinition.....	48

7.3	Optimierungsergebnis .....	49
7.4	Interpretation.....	52
7.4.1	Plausibilisierung auftretenden Rohbaukosten und Streuungsbereiche .....	52
7.4.2	Qualitative Analyse der evaluierten Flexibilitätskriterien.....	52
7.4.3	Vergleichsberechnung mittel FE-Statiksoftware .....	55
8	Diskussion und Schlussfolgerung .....	60
8.1	Resümee.....	60
8.2	Beantwortung der Forschungsfragen .....	61
8.2.1	Forschungsfrage 1: .....	61
8.2.2	Forschungsfrage 2.....	62
8.3	Zukunftsausblick.....	63
	Literaturverzeichnis .....	64
	Abbildungsverzeichnis .....	66
	Tabellenverzeichnis .....	68

## 1 Einleitung

Die Industrie 4.0 bringt mit ihren vernetzten und digitalisierten Produktionsprozessen, welche ständigen Anpassungen unterworfen sind, nie dagewesene Ansprüche an unsere Produktionsstätten. Ständige Innovation, wirtschaftliche Abwägungen sowie neue Produktentwicklungen stellen hohe Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit der Gebäude.

Neben der technischen Gebäudeausstattung (TGA) stellt das Tragwerk den Kern eines jeden Produktionsgebäudes dar, wobei die tragenden Bauelemente in der Regel die höchste Lebensdauer aufweisen. Dies bringt mit sich, dass innerhalb eines Lebenszyklus der Produktionsprozess zahlreichen Anpassungen unterliegt. Wenn das Tragwerk diesen Anpassungen im Wege steht, sind die Industriebetriebe oftmals gezwungen die Produktionsstätte abzureißen und neu zu errichten oder umzusiedeln. Zusätzlich verursacht das Tragwerk einen Großteil der CO<sub>2</sub> Emissionen über den gesamten Lebenszyklus (1) des Gebäudes.

Flexibilität wird somit zu einer Kernanforderung für Tragwerke von Produktionsstätten beim Übergang zur Industrie 4.0 und leistet einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Sustainable Development Goals (2) (3).

Mit diesen Anforderungen steigt auch die Komplexität der Planungsprozesse bei gleichzeitig immer kürzeren Planungs- und Errichtungsdauern. Gerade in der Vorentwurfsphase werden Entscheidungen oft unter Zeitdruck ohne Einbeziehung aller Planungsbeteiligten getroffen, obwohl hier der größte Einfluss auf das zukünftige Gebäude besteht. (4) Die existierenden Planungsmethoden und -werkzeuge sind meist nicht geeignet, um den gestellten Ansprüchen in der zur Verfügung stehenden Planungszeit zu genügen. Insbesondere bei der Untersuchung zahlreicher Varianten ist eine Einbeziehung aller PlanerInnen oft nicht möglich. Zusätzlich ist man bei den Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Fachbereichen und deren Parametern oft auf ExpertInnen-Wissen angewiesen, da diese in der Regel nicht oder nur wenig dokumentiert sind.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Analyse der wichtigsten Gebäudeparameter und deren Abhängigkeiten, um ein innovatives digitales Tool für die Vordimensionierung und Analyse flexibler Hallentragwerke zu entwickeln. Hiermit soll die Möglichkeit geschaffen werden, rasch und automatisiert Variantenstudien unter Einbeziehung der wichtigsten Abhängigkeiten der einzelnen Fachbereiche zu generieren. Zusätzlich wird ein Mechanismus zur automatisierten Evaluierung der Flexibilität des Vorentwurfs entwickelt.

Somit können maßgebliche Planungsentscheidungen integral und transparent in kurzer Zeit getroffen werden, mit dem Ziel, flexible und individuelle Gebäude zu planen, welche ihre Aufgabe über den gesamten Lebenszyklus erfüllen.

### 1.1 Forschungsprojekt BIM Flexi

Das entwickelte parametrische Planungstool wird als Teil des Forschungsprojektes BIM Flexi entwickelt, welches vom Forschungsbereich integrale Bauplanung und Industriebau durchgeführt wird. Das Forschungsprojekt dient der Entwicklung einer BIM-basierten digitalen Plattform zur Planung und Optimierung von flexiblen Gebäuden für die Industrie 4.0. In der folgenden Abbildung wird ein Überblick über die Bestandteile der entwickelten Plattform gegeben. Jene Bereiche, welche im Rahmen dieser Diplomarbeit erarbeitet werden, sind rot hervorgehoben.

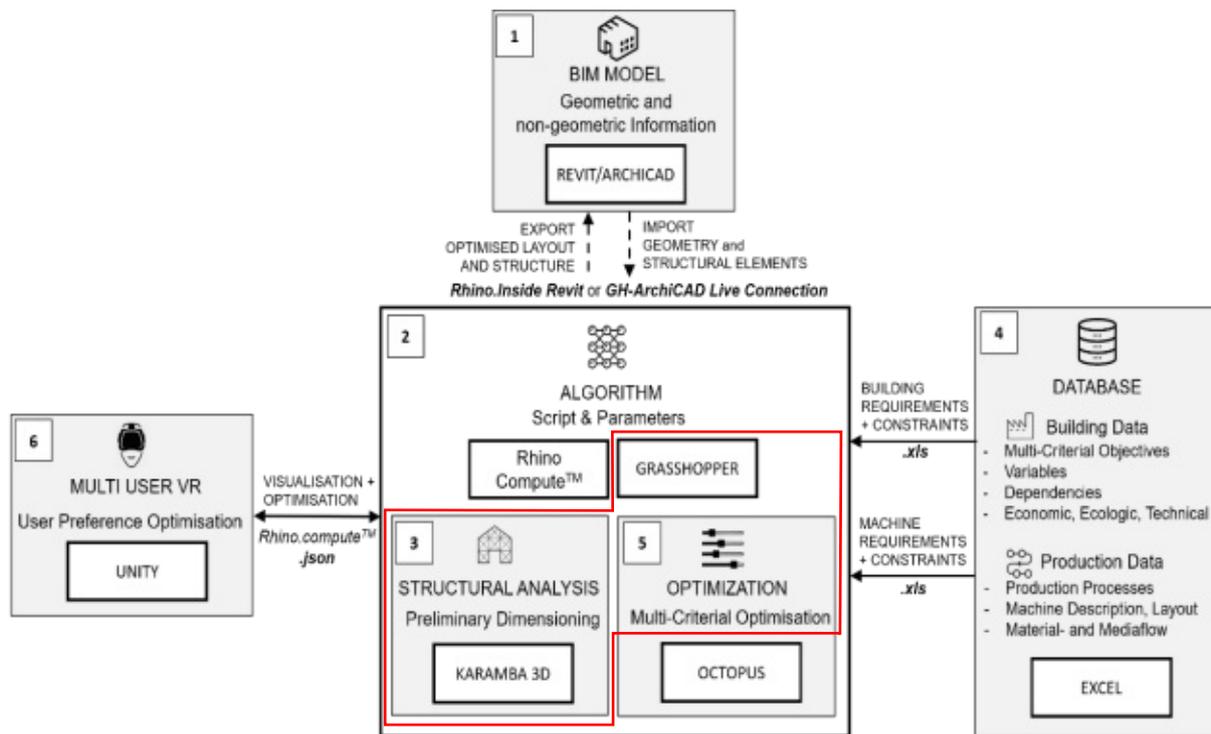


Abbildung 1.1: Digitale Plattform BIM Flexi, rot hervorgehoben jene Teilbereiche, welche im Rahmen der Diplomarbeit erarbeitet werden (Grafik entnommen aus (5))

Das primäre Ziel des Forschungsvorhaben BIM Flexi ist, Industriegebäude der Industrie 4.0 durch Kopplung digitaler Planungsmethoden (parametrische Modellierung und Analyse, BIM) mit neuen Technologien (multi-kriterielle Optimierungsalgorithmen, Virtual Reality) unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und technischer Parameter an schnell wechselnde Produktionsprozesse anpassbar zu machen.

Die vorliegende Diplomarbeit behandelt jene Teilbereiche dieses Forschungsvorhaben:

- Analyse von (Tragwerks-)Parametern realer Industriebauwerke
- Entwicklung und Plausibilisierung eines parametrischen Tragwerksskript als „Kern“ der digitalen Planungsplattform in Grasshopper und Karamba3D
- Erarbeitung eines ersten Vorschlages für eine automatisierte Bewertungsfunktion als Grundlage für die multi-kriterielle Optimierung

## 1.2 Forschungsfragen

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist die Beantwortung der folgenden Fragen:

Forschungsfrage 1:

*Welche Parameter und Abhängigkeiten müssen für die Planung flexibler Tragwerkssysteme im Industriebau berücksichtigt werden?*

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird eine detaillierte Use-Case Analyse, sowie eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt.

Forschungsfrage 2

*Wie kann eine flexible und integrale Tragwerksplanung und -analyse unter Anwendung von digitalen, parametrischen Tools ermöglicht werden?*

Die Beantwortung dieser Forschungsfrage erfolgt durch die Entwicklung und Testung eines Frameworks zur Berechnung und Bewertung parametrisch generierter Tragwerksmodelle.

## 1.3 Methodik

Die Methodik sieht einen dreistufigen Forschungsprozess vor. In einem ersten Schritt werden die Grundlagen mittels einer umfangreichen Literaturrecherche und Use-Case-Analyse geschaffen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse werden verwendet, um ein parametrisches Tragwerksmodell (PARAT) zu programmieren. Der Nachweis für den gewählten Forschungsansatz (Proof of Concept) wird in Form einer umfangreichen Variantenstudie geführt, bei welcher das entwickelte Tool zum Einsatz kommt. Die einzelnen Schritte werden im Kapitel „Methodische Vorgehensweise“ detailliert beschrieben.

## 1.4 Ergebnisse

Folgende Ergebnisse werden im Rahmen der Diplomarbeit erarbeitet:

- Ein Parameterkatalog, in welchem die tragwerksspezifischen Parameter sowie deren mögliche Ausprägungen gesammelt und analysiert werden
- Ein parametrisches Tragwerksskript für die teilautomatisierte Vorentwurfsgenerierung von plausiblen Hallentragwerken des Industriebaus, aufbauend auf den analysierten Parametern realer Industriebauwerke
- Eine Bewertungsfunktion, welche automatisiert die Flexibilität der Gebäudestruktur bewertet und Randbedingungen für einen plausiblen Vorentwurf überprüft

Das entwickelte Tool soll die Planung von flexiblen Tragstrukturen für Hallentragwerke des Industriebaus in frühen Entwurfsphasen erleichtern und so Planende dabei unterstützen, die Nutzbarkeit der Gebäude über den gesamten Lebenszyklus zu gewährleisten.

## 2 Methodische Vorgehensweise

### 2.1 State of the Art & Use-Case Analyse

Im Rahmen der State of the Art Analyse soll ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik gewonnen werden. Es werden ähnliche Forschungsprojekte und die dort präsentierten Ansätze aufgezeigt.

Mittels einer umfangreichen Use-Case Analyse von 22 Industriebauprojekten soll die reale Industriebaulandschaft analysiert und dokumentiert werden. Hierfür wurden Plandokumente von realen Produktionsstätten anonymisiert eingeholt und die Hallentragwerke hinsichtlich der Hauptelemente der Tragkonstruktion analysiert. Die Produktionsbetriebe gliedern sich in die fünf Sparten: Automobilindustrie, Nahrungsmittel- & Kosmetikproduktion, Logistik, metallverarbeitende Industrie und Spezialindustrie. Zusätzlich werden die Abhängigkeiten der einzelnen Tragwerkelemente aufgezeigt und dokumentiert. Die Analyse der maßgeblichen Tragwerkelemente und die Definition derer Parameter liefert die logische Grundlage für das programmierte Tragwerksskript. Der Überblick über die Materialität und die ausgeführten Tragwerke dienen als Grundlage für den Modellierungsraum des Tragwerksskripts. Die Auswahl der Referenzprojekte erfolgt nach (6) entsprechend ihrer Relevanz für den Forschungsgegenstand. In folgender Tabelle sind die untersuchten Industriebauten aufgelistet.

Tabelle 2.1: Untersuchte Use Cases nach Sparten

Use-Case	BGF [m <sup>2</sup> ]	Strukturtyp Primärsystem	Use-Case	BGF [m <sup>2</sup> ]	Strukturtyp Primärsystem
1-Automobil			4 – Metallverarbeitend		
1A	12100	Stahlfachwerk	4A	2800	Profilträger Stahl
1B	20700	Raumfachwerk	4B	28220	Fertigteilträger STB
1C	160700	Stahlfachwerk	4C	16200	Holzfachwerk
2- Nahrungsmittel und Kosmetik			4D	6000	Stahlfachwerk
2A	5760	Stahlfachwerk	4E	7200	Stahlfachwerk
2B	700	Profilträger BSH	4F	15600	Profilträger BSH
2D	1880	Profilträger BSH	4G	7200	Profilträger BSH
2E	2730	Holzfachwerk	5 - Spezial		
2F	1110	Profilträger BSH	5A	2800	Unterspannter BSH-Träger
3- Logistik			5B	2850	Fertigteilträger STB
3A	8060	Profilträger BSH			
3B	5040	Profilträger Stahl			
3C	5000	Fertigteilträger STB			
3E	30000	Timber GLT-Girder			
3F	37500	Fertigteilträger			

### 2.2 Programmierung Tragwerksskript

Für die Erstellung des parametrischen Tragwerksskripts wird die Methode der *parametrisch-assoziativen* Modellierung angewendet. Im Gegenzug zur klassischen *geometrischen* Modellierung können hierbei geometrische Objekte mittels implementierter Kontrollparameter dynamisch-assoziativ an neue Randbedingungen angepasst werden (7). Anders als bei herkömmlichen CAD und BIM-Modellen entsteht somit ein *verknüpftes* 3D-Modell, welches sich interaktiv mittels implementierter Parameter steuern lässt. Diese Methode bietet zahlreiche Vorteile, ins-

besondere kann in kurzer Zeit eine große Anzahl an Entwurfsvarianten generiert und analysiert werden.

### 2.2.1 Verwendete Software

- RHINO 6 in aktueller Form für Windows 10 inkl. GRASSHOPPER 3D
  - Rhinoceros 3D (kurz RHINO) ist eine CAD-Softwareanwendung, welche in dem vorliegenden Anwendungsfall die Darstellung von 3D Modell-Geometrien und Berechnungsergebnissen ermöglicht. Ausgewählt wird RHINO aufgrund des visuellen Programmierungsaufsatzes GRASSHOPPER 3D, welcher die Programmierung von generativen Algorithmen ermöglicht. Im Vergleich zu anderen Softwarelösungen existieren zahlreiche Berechnungsaufsätze (sogenannte TOOLBOXES) für GRASSHOPPER 3D, mit welchen sich detaillierte Berechnungen in jene generativen Algorithmen integrieren lassen. So ist wie in vorliegendem Fall beispielsweise die Integration einer statischen Berechnung in ein parametrisches 3D-Modellierungsskript möglich.
- Toolboxes für GRASSHOPPER 3D:
  - KARAMBA 3D für Rhino 6 - Version 1.3.3. Das Berechnungstool KARAMBA 3D wurde von Clemens Preisinger als Toolbox für GRASSHOPPER 3D zur Analyse von Tragwerken aufbauend auf parametrischen 3D-Modellen entwickelt (8). Hiermit stehen zahlreiche Berechnungsalgorithmen für die Analyse von parametrischen Tragwerken zur Verfügung. So zum Beispiel die Erstellung eines Tragwerksmodells aufbauend auf einer parametrischen 3D-Geometrie, die Berechnung nach Finite-Elemente Methode Theorie 1. oder 2. Ordnung oder die normgemäße Bemessung von Stahltragwerken nach der EN 1993.
  - LUNCHBOX (by Nathan Miller) v2020.11.2. Lunchbox bietet zahlreiche Tools für die parametrische Modellierung. Im Rahmen der Forschungsarbeit wird es verwendet, um die Kommunikation zwischen GRASSHOPPER 3D und einer XLS-Datenbank zu ermöglichen.
- DLUBAL RFEM 5.17
 

Die Software RFEM der Fa. DLUBAL ist eine international eingesetzte Softwarelösung zur Berechnung und Bemessung von Tragwerken aufbauend auf der numerischen Methode der finiten Elemente. Im Rahmen der Forschungsarbeit dient die Software der Kontrollberechnung der statischen Dimensionierung in KARAMBA3D. Die Wahl fällt auf diese Softwarelösung, da mit dieser für verschiedene Materialien normgemäße und prüffähige Dimensionierungen vorgenommen werden können, welche ebenfalls auf Basis der FE-Methode durchgeführt werden.

In der Visual Scripting-Software Grasshopper wird das parametrische Tragwerksskript programmiert, welches Hallentragwerke des Industriebaus in *parametrisch-assoziativer* Form modellierbar und analysierbar macht. Die zuvor definierten Parameter und Abhängigkeiten innerhalb der Tragkonstruktion werden durch den Berechnungsablauf des Skripts implementiert. Über die automatisierte Lasteingabe und Übernahme der Groblayoutplanung wird eine integrale Schnittstelle zur Produktionsplanung entwickelt. Die Tragwerksanalyse und -berechnung erfolgt mit dem Grasshopper Plugin Karamba3D und mittels eigens entwickelter Vorbemessungsalgorithmen. Es wird eine Berechnungssystematik zur Evaluierung der „Fitness“ eines Entwurfs entwickelt, um verschiedene Entwurfsvarianten automatisiert zu vergleichen. In die Berechnung dieser „Fitness-Funktion“ fließen definierte Flexibilitätsindikatoren (sog. Objectives) sowie eine vereinfachte Kostenkalkulation ein. Die Definition dieser Indikatoren erfolgt auf Basis der Literaturrecherche.

### 2.3 Proof of Concept - Variantenstudie

Zur Bestätigung des Forschungsansatzes wird eine Variantenstudie für eine reale Industriebauplanungsaufgabe durchgeführt. Hierfür wird ein Workflow zur Durchführung einer teilautomatisierten Variantenstudie mit dem parametrischen Tragwerksskript definiert. Die Ergebnisse werden dargelegt und interpretiert; zusätzlich wird eine Vergleichsberechnung der optimierten Tragwerksvarianten mit der FE-Statik Software DLUBAL RFEM durchgeführt.

Auf folgender Seite werden die Methodik und die einzelnen Arbeitsschritte dargestellt, sowie die erwarteten Ergebnisse präsentiert.

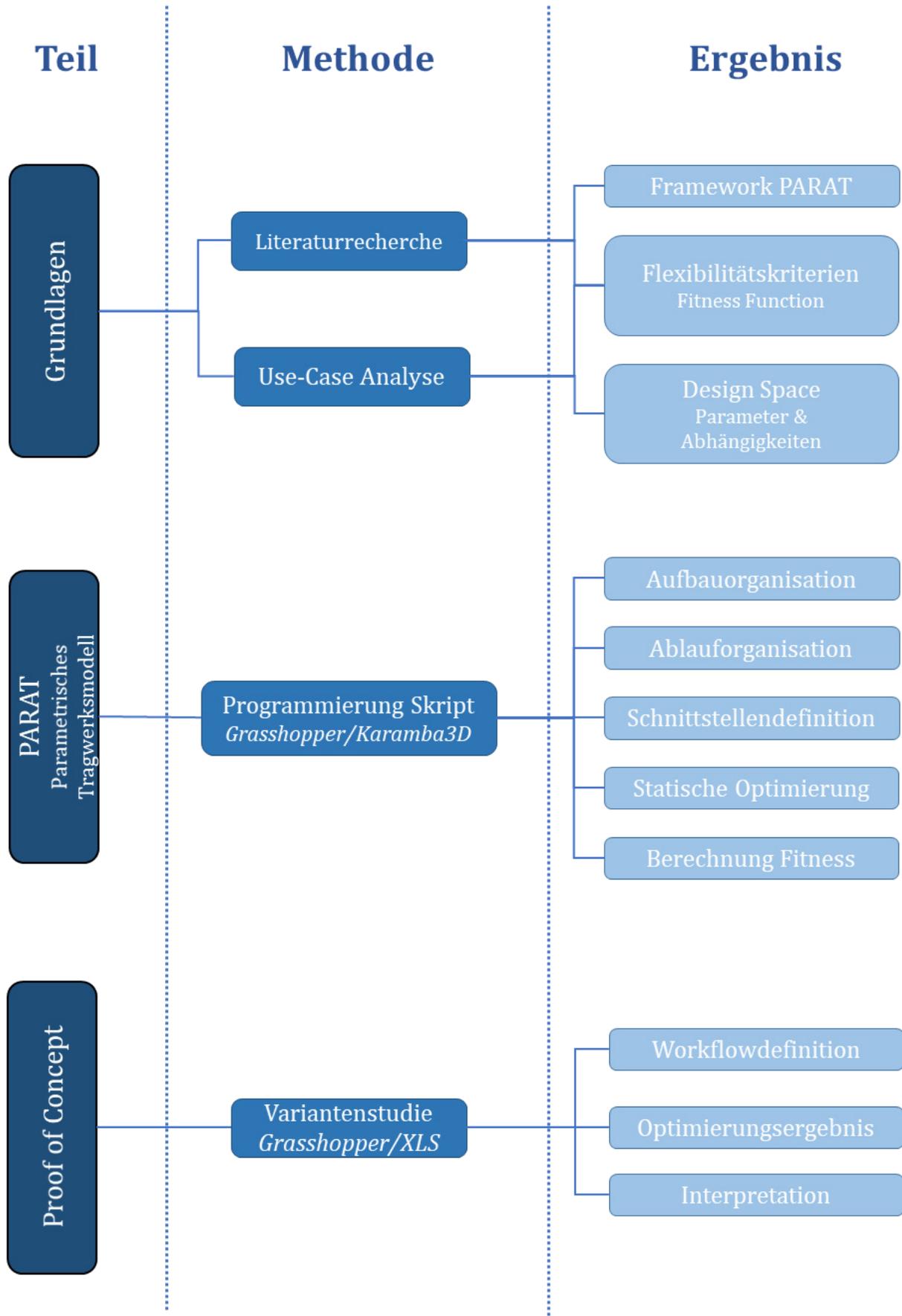


Abbildung 2.1: Methodik und Arbeitsschritte

### 3 Literaturrecherche

In den vergangenen Jahren wurde großer Aufwand betrieben, um den Energieverbrauch während des Betriebs eines Gebäudes zu minimieren (9). Zahlreiche Maßnahmen haben dazu beigetragen diese sogenannte „rote“ Energie aktiv zu reduzieren. Weniger Beachtung hingegen wird oftmals der „grauen“ Energie geschenkt, welche durch die gesamte Konstruktion in einem Gebäude gespeichert wird. Diese bedingt allerdings bis zu 60% des Gesamtenergieverbrauchs eines Gebäudes (10) (11). Erst in den letzten Jahren wird dieser Energie vermehrt Beachtung geschenkt, auch aufgrund der Tatsache, dass die Bauindustrie mittlerweile 50% der globalen Treibhausgasemissionen verursacht. Ein Großteil dieser Emissionen wird durch den Industriebau ausgelöst, da dieser hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffe einen maßgeblichen Teil der Bauindustrie ausmacht (12).

Die Reduktion dieser grauen Energie über den gesamten Lebenszyklus leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Zahlreiche AutorInnen befassen sich hierzu mit der Implementierung von umfangreichen Lebenszyklusanalysen in den Planungsprozess (13) (14). Auch BIM-gestützte Anwendungen kommen zum Einsatz. So entwickelten beispielweise Shadram et al. ein Framework zur Reduktion von grauer Energie während des Planungsprozesses durch die Berücksichtigung der Lieferkette von Baumaterialien (9).

Eine flexible Tragwerksstruktur, welche Lastreserven aufweist, kann die Lebensdauer eines Gebäudes maßgeblich erhöhen, ohne dass aufwendige Umbauten erforderlich werden (15).

Wong et al. (16) führten eine Analyse zu BIM-gestützten Forschungsansätzen mit dem Ziel der Nachhaltigkeit über den Lebenszyklus von Gebäuden durch. Sie sind zu dem Schluss gekommen, dass zukünftige Softwareentwicklungen sich auf das Konzept der drei R's beziehen sollten (reduce, reuse, recycle). Die Erhöhung der Lebensdauer von Tragstrukturen durch Flexibilität kann hier einen wichtigen Beitrag leisten.

Forschungsansätze mit diesem Ziel finden sich auch im Industriebau. So entwickelten Lee et al. einen „Modellierungsraum“ zur Unterstützung der multi-kriteriellen Entscheidungsfindung im Industriebau (17).

Die Flexibilität von Gebäudestrukturen wird somit vor dem Hintergrund der „Green Building“-Bewegung immer intensiver untersucht. Geraedts entwickelt mit FLEX 4.0 einen Evaluierungskatalog zur Bewertung flexibler Gebäudestrukturen. Allerdings bezieht sich dieser eher auf den konventionellen Geschosßbau, und die Konzepte sind auf den Industriebau nur teilweise übertragbar (18). Eine eher allgemeine Abhandlung zur Flexibilität von Gebäuden liefern Israelsson et al. Allerdings wird hier mittels einer umfangreichen Interviewreihe der Bedarf nach Flexibilität umfangreich belegt (19).

Parallel zur Durchführung dieser Arbeit wurde an der TU Wien eine Forschungsarbeit durchgeführt, welche mittels einer Interviewreihe den hohen Stellenwert von Flexibilität im Industriebau belegt (20). In dieser Studie wurden relevante Stakeholder des Planungsprozesses befragt und aufbauend darauf ein Parameterkatalog für Flexibilität im Industriebau erstellt. Zusätzlich werden bereits in der Literatur definierte Flexibilitätskriterien gesammelt, wie in der folgenden Tabelle ersichtlich.

Tabelle 3.1: Kriterien für die Flexibilität eines Gebäudes

Quelle	Nr.	Flexibilitätsprinzip	Beschreibung
Geraedts (18)	1	Erweiterbarkeit des Grundstücks	Je mehr Platzreserve am Grundstück, desto flexibler kann das Gebäude erweitert werden
	2	Flächenreserve im Gebäude	Reserveflächen innerhalb des Gebäudes erleichtern eine Anpassung der Nutzung während des Lebenszyklus
	3	Maximierung Netto-raumhöhen	Je größer die Reserve der Nettoraumhöhe, desto eher können Nutzungsanpassungen durchgeführt werden
	4	Reduktion von Stützen und Lastabtragenden Elementen	Je weniger lastabtragende Elemente die Nutzfläche einschränken, desto besser kann die Nutzung in Zukunft angepasst werden
Slaughter (4)	5	Auswechselbare Komponenten	Die Verwendung von üblichen Konzeptlösungen erhöht die Flexibilität, da diese leichter gewartet und angepasst werden können
	6	Regelmäßigkeit des Layouts	Eine Erhöhung der Regelmäßigkeit des Grundrisses führt aufgrund der besseren Planbarkeit zu einer Verlängerung der Lebensdauer
	7	Erleichterung der Zugänglichkeit	Eine Verbesserung der Zugänglichkeit für Wartung erhöht die Lebensdauer
	8	Erleichterung des partiellen Abbruchs	Die Lebensdauer der Gesamtstruktur wird erhöht, wenn Teile davon einfach angepasst werden können.
Till, Schneider (21)	9	Einfache Konstruktion	Die Konstruktion soll einen zukünftigen Eingriff erleichtern
	10	Design für Wandelbarkeit	Berücksichtigung von zukünftigen Anpassungen in der Planung erhöht die Flexibilität
	11	Schichtentrennung	Klare Identifikation und Unterscheidung der einzelnen Funktionsschichten des Aufbaus (Tragstruktur, Versorgungsebene, Gebäudehülle)
Israelsson, Hansson (19)	12	Materialstandard	Auswahl der Materialien unter Berücksichtigung zukünftiger Nutzungsanpassungen
	13	Vorfertigung	Vorfertigung liefert flexiblere Produktionstechniken und damit Tragstrukturen
	14	Planung zukünftiger Anpassungen	Berücksichtigung von zukünftigen Anpassungen in der Planung erhöht die Flexibilität
	15	Aufmerksamkeit bei der Planung	Stakeholder der Planung müssen berücksichtigen, dass Gebäude über den Lebenszyklus hinweg Umnutzungen erfahren
Reisinger, Holinsky (20)	16	Flächenreserve im Gebäude	Reserveflächen innerhalb des Gebäudes erleichtern eine Anpassung der Nutzung während des Lebenszyklus
	17	Maximierung der Spannweiten	Eine Reduktion lastabtragender Elemente im Grundriss führt zu einer Erhöhung der Flexibilität
	18	Maximierung der Netto-raumhöhe	Je größer die Reserve der Nettoraumhöhe, desto eher können Nutzungsanpassungen durchgeführt werden

Reisinger, Hol-linsky (20)	19	Einfachheit des Grundrisses	Je einfacher das (Produktions-)Gebäude im Grundriss ist (z.B. Rechteck), desto einfach sind Anpassungen der Gebäudenutzung
	20	Modularität	Modulare Lösungen für Tragwerk und Produktion erhöhen die Flexibilität des Entwurfs
	21	Erweiterbarkeit	Reserve bei Grundstück/Nutzfläche
	22	Tragreserve	Eine Bemessungsreserve bei lastabtragenden Elementen erhöht die Wandelbarkeit der Struktur

Der Vergleich der einzelnen Flexibilitätskriterien zeigt, dass bei einigen Zielkonflikte bestehen. So geht beispielsweise eine Maximierung der Spannweite (Nr.17) auf Kosten der Nettoraumhöhe (Nr.18), da in der Regel höhere Tragwerkselemente zum Einsatz kommen müssen. Auch die klare Trennung in funktionelle Schichten (Nr.11), steht in Konkurrenz zur Maximierung der Nettoraumhöhe, da meist höhere Aufbauten bei solch einer funktionellen Trennung zum Einsatz kommen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden bei der Definition der Flexibilitätskriterien aufgegriffen und umgesetzt.

Die Analyse von momentan am Markt vorherrschenden Berechnungstools für die statische Dimensionierung zeigt, dass die meisten Softwarelösungen die FE-Methode an geometrischen Modellen durchführen (22). Bislang konnte sich kein Modellierungsstandard für solche statischen Analysemodelle durchsetzen und so setzt jede Softwareanwendung auf ihre eigene Lösung zur Geometrieingabe und -manipulation. Weiters sind die meisten Softwareanwendungen für eine detaillierte und hochpräzise Berechnung einer einzelnen Modellierungsvariante optimiert, was den Schluss nahelegt, dass Präzision im (Tragwerks-)Planungsprozess einen höheren Stellenwert besitzt als Flexibilität (23). Gerade in frühen Planungsphasen ist hingegen eine Untersuchung von zahlreichen Varianten unter Voraussetzung von spezifischen Ingenieurwissen erforderlich, was durch den Einsatz von parametrischen Modellierungstools möglich wird (24). Im Gegenzug zu den konventionellen Softwarelösungen kann so die Flexibilität durch umfangreiche Variantenstudien in frühen Planungsphasen gesteigert werden (25).

Die Literaturrecherche hat bestätigt, dass aktuell zahlreiche Forschungsprojekte innovative Planungstools für eine nachhaltigere Entwurfsarbeit entwickeln. Nur wenige hingegen behandeln den Industriebau – dieser Bereich kann durch das hier entwickelte Tool abgedeckt werden.

## 4 Stand der Technik

### 4.1 State of the Art in der Forschung

Innerhalb der State of the Art Analyse werden insbesondere jene Forschungsprojekte näher untersucht, welche ebenfalls Tools zur automatisierten Entwurfsevaluierung entwickelten. Insbesondere ist hierbei die Arbeit von Cavalliere et al. anzuführen. Einer der Forschungsansätze beschäftigt sich mit der Entwicklung einer teilautomatisierten BIM-gestützten Evaluierungsmethode für die Flexibilität eines Entwurfs (26). Zwar beschäftigt sich die Abhandlung mehrheitlich mit der Evaluierung von flexiblen Grundrissen im Wohnbau, allerdings wird die dort implementierte Vorgehensweise als Grundlage für diese Arbeit gewählt. Insbesondere bei der mathematischen Formulierung der Flexibilitätskriterien wurde die dort gewählte Vorgangsweise aufgegriffen und adaptiert.

Des Weiteren analysieren Cavalliere et al. die Auswirkungen von Datenstrukturen und Parametern auf den Planungsprozess in der frühen Entwurfsphase (27). Die dortigen Erkenntnisse haben insbesondere die Entwicklung des Frameworks beeinflusst.

Hinsichtlich der Auswahl von relevanten Entwurfparametern wird neben der Use-Case Analyse auf die Forschung von Nadoushani und Akbarnezhad verwiesen. (1) Hier wird die Materialität und Höhe der Tragstruktur als einer der Haupteinflussfaktoren auf die Treibhausgasemissionen des Gebäudes belegt. Auch andere Forschungsarbeiten, wie zum Beispiel jene von Rodrigues et al. unterstreichen die Wichtigkeit des Tragwerks für die Reduktion der grauen Energie einer Gebäudestruktur. (28)

### 4.2 Use-Case Analyse

#### 4.2.1 Geometrische Parameter

Folgende geometrische Parameter werden identifiziert und analysiert:

Tabelle 4.1: Geometrische Parameter

Kategorie	Parameter	Beschreibung
Geometrische Parameter	Raster Primär [m]	Primärspannweite
	Felder Primär [Stk]	Primärrasterfeldanzahl
	Raster Sekundär [m]	Sekundärspannweite
	Felder Sekundär [Stk]	Sekundärrasterfeldanzahl
	Bruttofläche [m <sup>2</sup> ]	Bruttofläche der Halle berechnet aus Achsraster
	Lichte Raumhöhe [m]	Lichte, nutzbare Raumhöhe unterhalb der Tragkonstruktion
	Konstruktionshöhe [m]	Konstruktionshöhe von UK Tragwerk bis OK Dachaufbau
	Tragwerkshöhe [m]	Gesamte Tragwerkshöhe Primäre, Sekundär, Tertiär
	Gebäudehöhe gesamt [m]	Gesamtgebäudehöhe (OK Dachaufbau, nicht Traufe oder Attika), bei Satteldächer Firsthöhe

Die Untersuchung der eingesetzten Achsraster hat ergeben, dass die Mittelwerte der Rastermaße in Abhängigkeit der Produktion keine großen Unterschiede aufweisen. Eine Ausnahme stellt hier die Automobilindustrie dar, welche im Vergleich zu den anderen Industriesparten im Mittel eine um 5,25m höhere Spannweite im Primärsystem aufweist, sowie eine um 7,125m höhere im Sekundärsystem. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass die Automobilindustrie mit ihrem hohen

Automatisierungsgrad und schnelle Produktionszyklen einen erhöhten Bedarf an Flexibilität in der Grundrissstruktur aufweist.

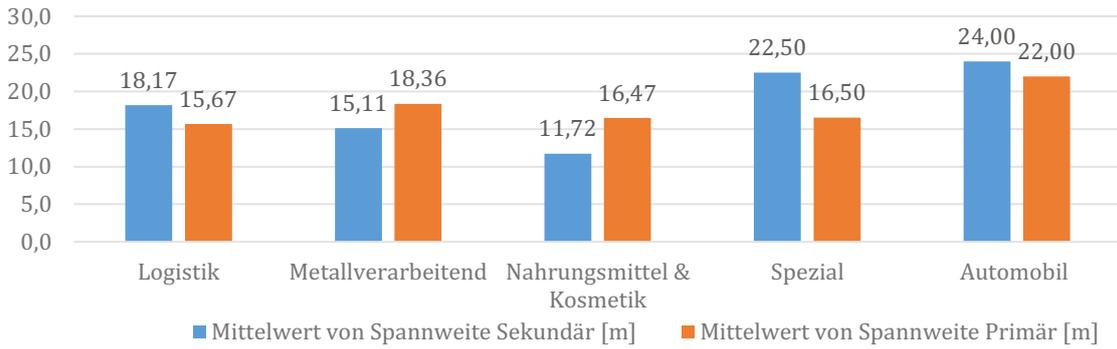


Abbildung 4.1: Mittelwerte der Primär- und Sekundärspannweiten gegliedert nach der Industriesparte

Eine Analyse der Variation der Rastermaße zeigt, dass gerade der Sekundärraster in Abhängigkeit der Anforderungen des Prozesses stark variiert. Zusätzlich kann entgegen der Erwartung beobachtet werden, dass moderne Hallentragwerke im Mittel ein nahezu ausgewogenes Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärraster aufweisen. Die maximal beobachtete Spannweite misst 36m im Sekundärraster einer Automobilproduktion.

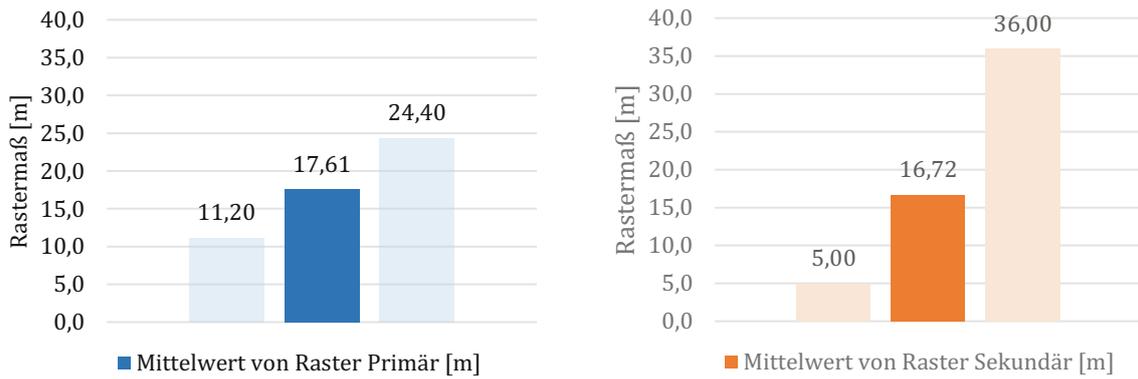


Abbildung 4.2: Mittelwerte, Minima und Maxima der Rastermaße

Die Verteilung der Rastermaße im Histogramm zeigt, dass die Primärraster am stärksten in der Gruppe von 15m-20m vertreten sind (10 Hallen). Die Sekundärrastermaße hingegen weisen eine höhere Streuung auf und sind am stärksten in der Gruppe der Spannweite von 20m-25m vertreten (8 Hallen).

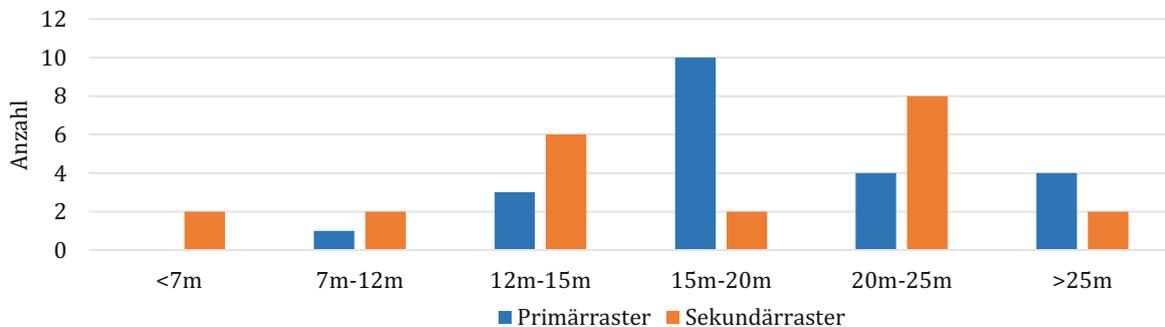


Abbildung 4.3: Histogramm der auftretenden Rastermaße

Interessante Ergebnisse zeigt auch die Analyse der erforderlichen lichten Raum- und Konstruktionshöhen. Entgegen der Erwartung weisen die untersuchten Use-Cases nahezu keine Abhängigkeit zwischen dem lichten Höhenbedarf und der Industriesparte auf. Einzig die Automobilindustrie weist aufgrund der hohen Rastermaße eine im Mittel größere Konstruktionshöhe auf. Der Ausreißer im Bereich der Spezialindustrie ergibt sich aufgrund der geringen Anzahl von nur einem untersuchten Use-Case und dessen Anforderungen.

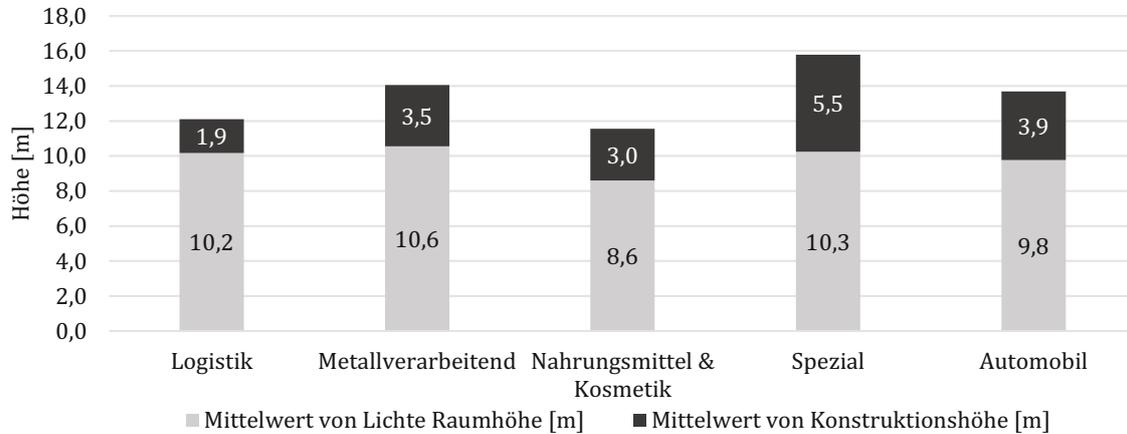


Abbildung 4.4: Lichte Raum- und Konstruktionshöhen gemittelt nach Sparten

Aufgrund dieser Analyse wird der Modellierungsraum der geometrischen Parameter wie in untenstehender Tabelle ersichtlich definiert. Zusätzlich zur Use-Case Analyse wird der Modellierungsraum durch die Literaturrecherche sinnvoll ergänzt.

Tabelle 4.2: Geometrische Parameter

Definition Parameter				Varianten		
Kategorie	Name	Eingabe über	Einheit			
Geometrisch	Spannweite Primär	Skript PARAT	m	10	42	7
	Felder Primär	Skript PARAT	Stk	1	8	8
	Spannweite Sekundär	Skript PARAT	m	6	35	5
	Felder Sekundär	Skript PARAT	Stk	1	14	14
	Lichte Raumhöhe	Blocklayout	m	Vordefiniert		
	Maximale Gebäudehöhe	Skript PARAT	m	Vordefiniert		

#### 4.2.2 Tragwerksspezifische Parameter

Für die Definition des Modellierungsraumes des Tragwerks werden einerseits die relevanten tragwerksspezifischen Parameter definiert und andererseits jene Tragwerkselemente ausgewählt, welche für diesen relevant sind.

Tabelle 4.3: In der Use-Case Analyse untersuchte Tragwerkselemente, fett hervorgehoben sind jene, welche im Modellierungsraum berücksichtigt werden

Kategorie	Tragwerkselement
Dachtragwerk	Dachhaut
	Tertiärsystem
	<b>Sekundärsystem</b>
	<b>Primärsystem</b>
Aussteifung	<b>Aussteifung Dach x-Richtung</b>
	<b>Aussteifung Dach y-Richtung</b>
	<b>Aussteifung Wand x-Richtung</b>
	<b>Aussteifung Wand y-Richtung</b>
Stützen und Wände	<b>Stützen</b>
	<b>Fassadenpfosten</b>
	<b>Fassadenriegel</b>
	Außenhaut
Fundierung	Fundamente
	Frostschürze
	Bodenplatte
	Fundierung Fassadenpfosten

Das Tertiärsystem wird zum aktuellen Zeitpunkt nicht in den Modellierungsraum integriert, da nur wenige der untersuchten Use-Cases ein solches aufwiesen. Für diese Tragwerkselemente wurden die folgenden Parameter ausgelesen und analysiert:

Tabelle 4.4: Analytierte tragwerksspezifische Parameter der untersuchten Tragwerkselemente

Kategorie	Parameter	Ausprägungen (Auszug)
Struktur	Strukturtyp	Fachwerk, Profilträger, etc.
	Strukturtyp Detail	Ständerfachwerk, FT I-Träger, etc.
Materialität	Material	Vollholz, Brettschichtholz, Stahlbeton, Stahl
	Materialgüte	C50/60, GL24h, S235, etc.
Querschnitt	Querschnitt*	HEA 140, 180/28cm, etc.
	Querschnitt Untergurt	Bei Fachwerkträger, od. Unterspannung
	Querschnitt Pfosten	Bei Fachwerkträger, od. Unterspannung
	Querschnitt Diagonale	Bei Fachwerkträger, od. Unterspannung
Geometrie	Spannweite	6-35m
	Einflussbreite	1,25-24,4m
	Trägerhöhe	15-400cm

\*Im Falle eines Fachwerkträgers wird hier der Obergurt angeführt.

Auf den folgenden Seiten werden jene Tragwerkselemente im Detail erläutert, welche für die Formulierung des Modellierungsraumes erforderlich sind.

• Sekundärsystem

Bei den untersuchten Use-Cases können 6 grundlegend unterschiedliche Strukturtypen des Sekundärsystems beobachtet werden. Diese unterschiedlichen Ausprägungen, deren Häufigkeit sowie Materialität sind in der untenstehenden Abbildung ersichtlich.

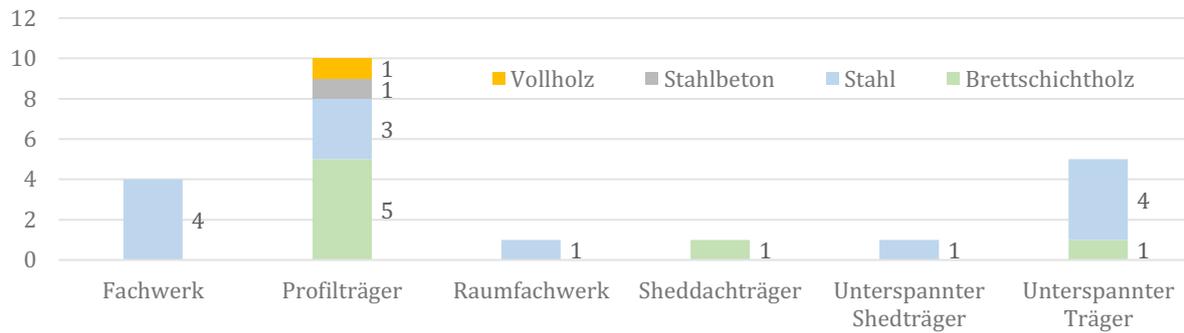


Abbildung 4.5: Anzahl der Strukturtypen Sekundärsystem, inkl. deren Materialität

Wie in der Abbildung ersichtlich, handelt es sich bei den meisten Sekundärsystemen um Profilträger (10 Hallen). Die zweithäufigste Gruppe der unterspannten Träger ist fast ausschließlich in Logistikgebäuden vertreten, weswegen dieser in der weiteren Forschungsarbeit auch eine geringere Bedeutung beigemessen wird. Dies ist untenstehender Grafik ersichtlich.

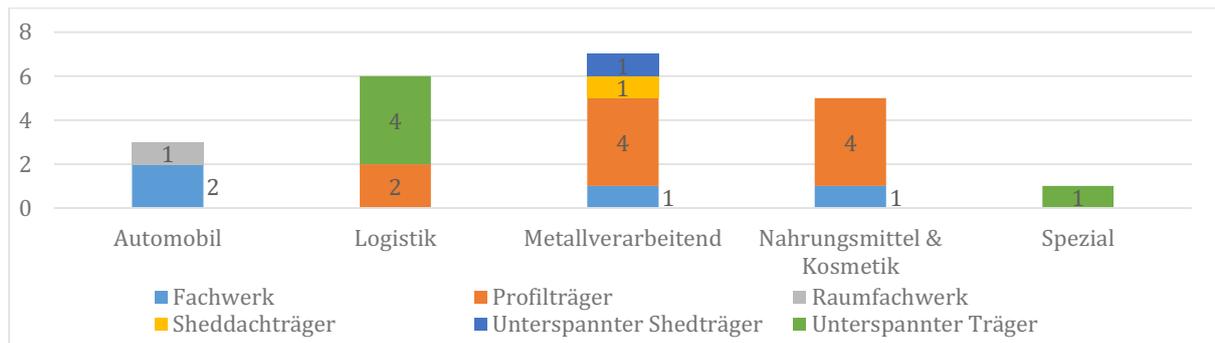


Abbildung 4.6: Anzahl der Strukturtypen Sekundärsystem nach Sparte

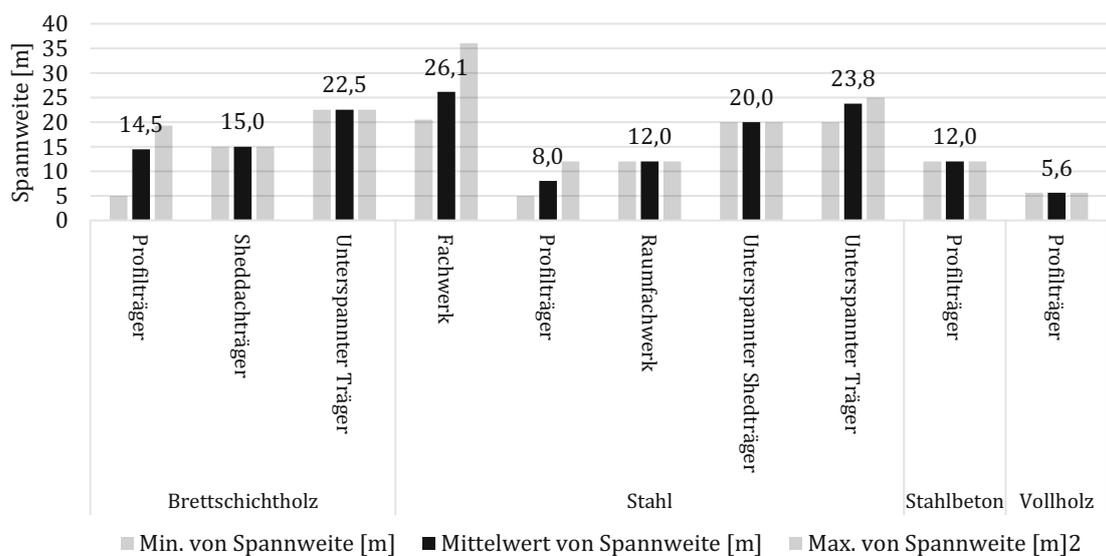


Abbildung 4.7: Mittlere Spannweite der Strukturtypen Sekundärsystem nach Materialität

Wie in obenstehender Abbildung ersichtlich, weisen Stahlfachwerke die höchste mittlere Spannweite auf (26,1m). Profilträger sind bis auf eine Ausnahme nur in Hallentragwerke unter 15m Sekundärraster anzutreffen.

Interessante Ergebnisse liefert die Analyse der verbauten Laufmeter der Sekundärsysteme. Mit einer verbauten Gesamtlänge von über 40km stellen Fachwerke die am meisten verwendeten Strukturtypen dar, obwohl sie nur bei 4 Use-Cases dokumentiert werden. Dies ist damit zu begründen, dass gerade in den flächenmäßig riesigen Produktionshallen der Automobilindustrie vermehrt dieser Strukturtyp zum Einsatz kommt. Im Gegenzug kommen innerhalb der Use-Cases meistens Profilträger zum Einsatz, allerdings insgesamt in einer deutlich geringeren Menge.

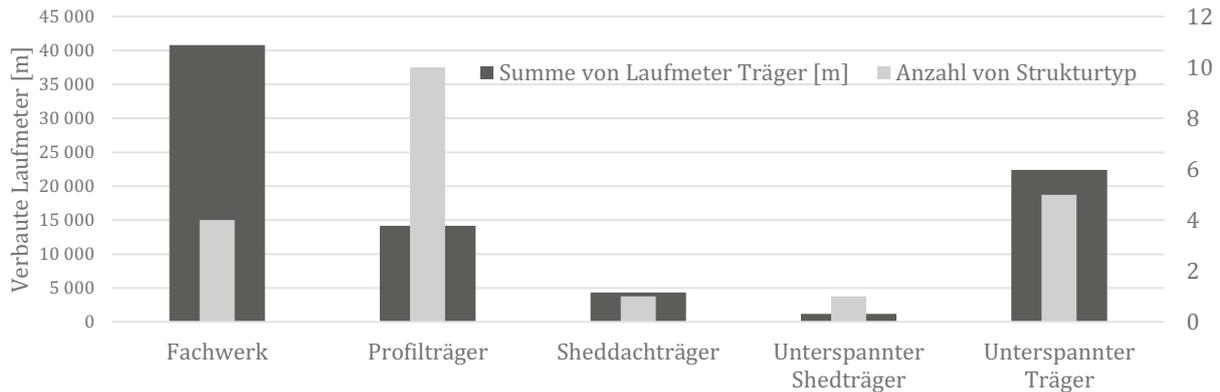


Abbildung 4.8: Verbaute Laufmeter der einzelnen Strukturtypen Sekundärsystem sowie deren Anzahl innerhalb der Use-Cases (Raumfachwerk ausgenommen)

Auf Basis dieser Daten wird der Modellierungsraum für die Sekundärsysteme folgendermaßen definiert:

Tabelle 4.5: Modellierungsraum für das Element Sekundärsystem

Element	Varianten	Material	Querschnittsgruppe
Sekundärsystem	Stahlfachwerk	S235	HEA
	Stahlprofil	S235	IPE, HEA
	Fertigteil T-Träger	C50/60	T50-T80
	BSH-Träger	GL28h	30/15cm - 80/30cm

Die Querschnittsdefinition des Fertigteil T-Träger für den Modellierungsraum erfolgt entsprechend untenstehendem Schema in Anlehnung an die in der Use-Case Analyse beobachteten Querschnitte.

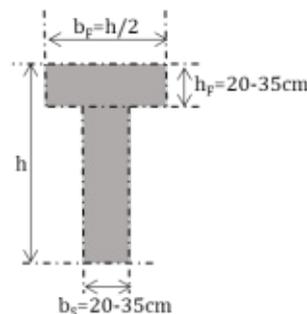


Abbildung 4.9: Definition der parametrischen Querschnittsgeometrie des Stahlbeton Fertigteil T-Trägers für das Sekundärsystem, die Höhe  $h$  repräsentiert die Nummer aus der Querschnittsgruppe (z.B. T50 ->  $h=50\text{cm}$ )

• **Primärsystem**

Bei den untersuchten Use-Cases können 4 grundlegend unterschiedliche Strukturtypen des Primärsystems beobachtet werden. Diese unterschiedlichen Ausprägungen, deren Häufigkeit sowie Materialität sind in der untenstehenden Abbildung ersichtlich

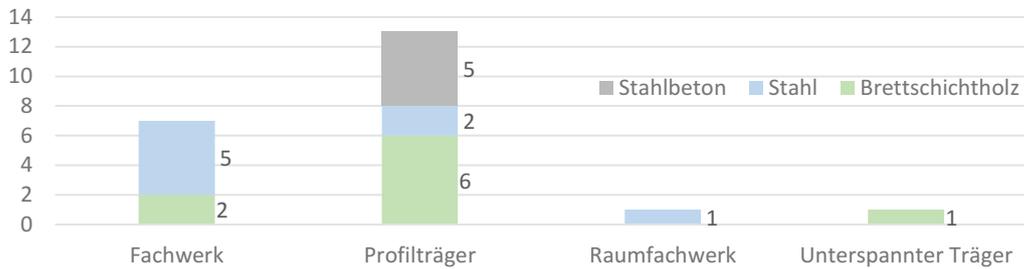


Abbildung 4.10: Anzahl der Strukturtypen Primärsystem, inkl. deren Materialität

Bei den meisten Primärsystemen handelt es sich um Profilträger, wobei sich hier Brettschichtholzträger und Stahlbeton-Fertigteilträger hinsichtlich ihrer Häufigkeit die Waage halten. Raumbachwerke und unterspannte Träger stellen in primärer Tragrichtung eher die Ausnahme dar.

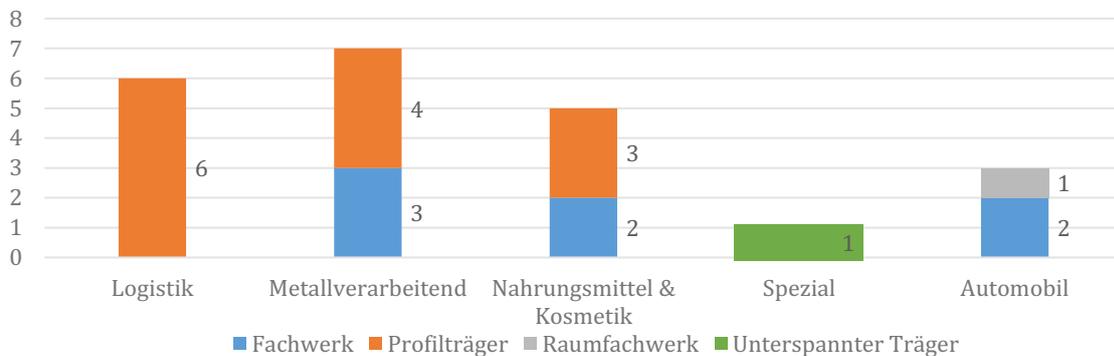


Abbildung 4.11: Anzahl der Strukturtypen Primärsystem nach Sparte

Die „klassischen“ Produktionshallen der metallverarbeitenden Industrie und Nahrungsmittel-industrie weisen ein relativ ausgewogenes Verhältnis von Profilträgern und Fachwerken als Primärkonstruktion auf. Die untersuchten Logistikhallen verwenden ausschließlich Profilträger, wohingegen die Automobilindustrie mit ihren hohen Spannweiten und Nutzlasten Fachwerke bevorzugt.

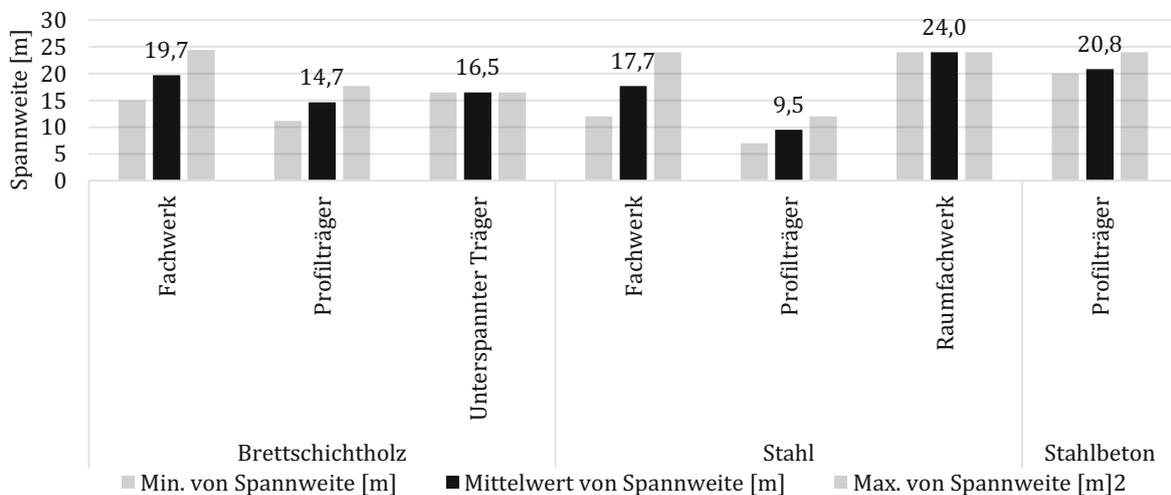


Abbildung 4.12: Mittlere Spannweite der Strukturtypen Primärsystem nach Materialität

Die Aufstellung der mittleren Spannweiten der verschiedenen Strukturtypen zeigt, dass die Streuung der Spannweiten der Primärsysteme geringer ausfällt als jene der Sekundärsysteme.

Untenstehende Abbildung zeigt, dass gemessen an den Laufmetern im Bereich des Primärsystems mehrheitlich Profilträger zum Einsatz kommen. Mehr als die Hälfte der untersuchten Use-Cases weisen Profilträger als Primärkonstruktion auf.

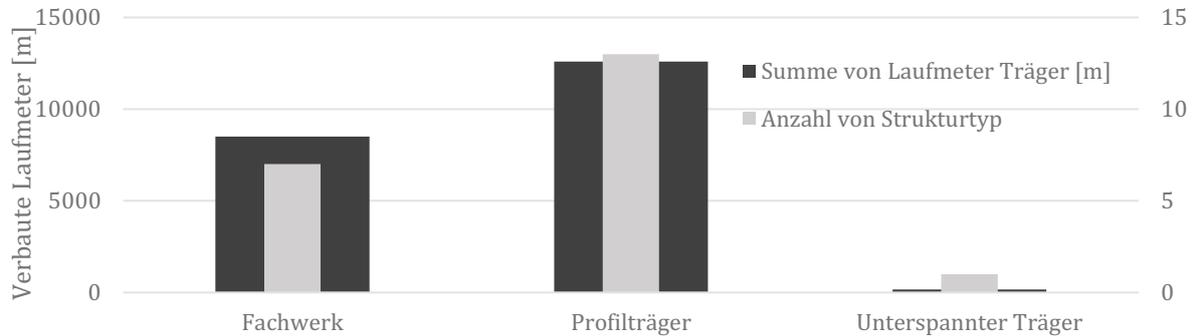


Abbildung 4.13: Verbaute Laufmeter der einzelnen Strukturtypen Primärsystem sowie deren Anzahl innerhalb der Use-Cases (Raumfachwerk ausgenommen)

Auf Basis dieser Daten wird der Modellierungsraum für die Primärsysteme folgendermaßen definiert:

Tabelle 4.6: Modellierungsraum für das Element Primärsystem

Element	Varianten	Material	Querschnittsgruppe
Primärsystem	Stahlfachwerk	S235	HEA
	Stahlprofil	S235	IPE, HEA
	Fertigteil T-Träger	C50/60	T75-T300
	BSH-Träger	GL28h	80/18cm – 260/30cm
	BSH-Fachwerk	GL24h	Strebe 10/10cm – 30/30cm

Die Querschnittsdefinition des Fertigteil T-Träger für den Modellierungsraum erfolgt entsprechend dem untenstehenden Schema in Anlehnung an jene in der Use-Case Analyse beobachteten Querschnitte und gängiger Konstruktionsregeln.

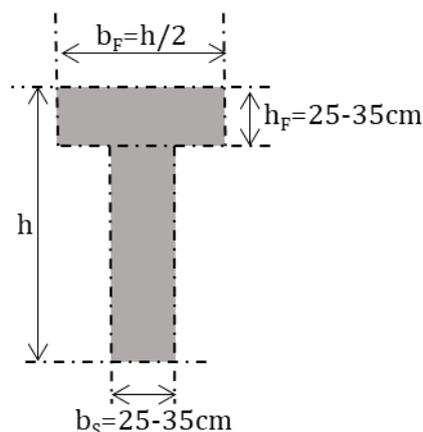


Abbildung 4.14: Definition der parametrischen Querschnittsgeometrie des Stahlbeton Fertigteil T-Trägers für das Primärsystem, die Höhe  $h$  repräsentiert die Nummer aus der Querschnittsgruppe (z.B. T75 ->  $h=75\text{cm}$ )

• **Stützen**

Bei den untersuchten Use-Cases kommen ausschließlich Profilstützen zum Einsatz; Fachwerkstützen oder ähnliches werden nicht beobachtet. Weiters kommen in über 90% der Fälle Stahlbeton-Fertigteilstützen zum Einsatz.

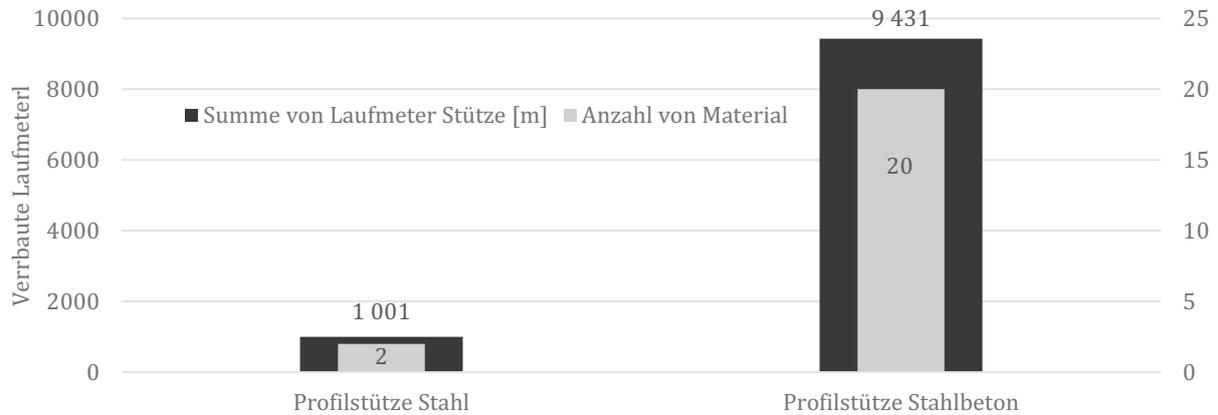


Abbildung 4.15: Verbaute Laufmeter der einzelnen Strukturtypen Stützen sowie deren Anzahl innerhalb der Use-Cases

Die meisten Fertigteilstützen weisen einen Querschnitt von 60/60cm auf. Als Standardbetongüte für Fertigteilstützen im Industriebau kann C50/60 definiert werden.

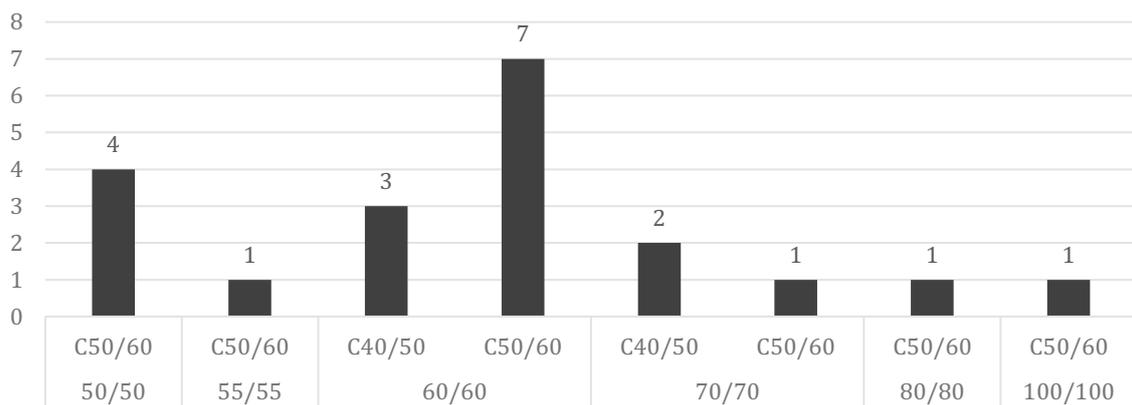


Abbildung 4.16: Anzahl der unterschiedlichen Stützenquerschnitte und eingesetzte Betongüte

Auf Basis dieser Daten wird der Modellierungsraum für die Stützensysteme folgendermaßen definiert:

Tabelle 4.7: Modellierungsraum für das Element Primärsystem

Element	Varianten	Material	Querschnitte
Stützensystem	Stahlbetonfertigteile quadratisch	C50/60	50/50, 60/60, 70/70, 80/80
	Stahlprofil	S235	HEM

- **Aussteifung**

Die Analyse der Use-Cases hat ergeben, dass als Aussteifungskonzept für Hallen im Industriebau fast ausschließlich eingespannte Stützen zum Einsatz kommen. Aussteifende Verbände in der Dachebene werden bei Stahl- und Holztragwerken eingesetzt, um die Scheibenwirkung der Dachebene zu aktivieren. Bei Stahlbetondachtragwerken wird kein Use-Case gefunden, bei welchem zusätzlich eine Aussteifung in der Dachebene angeordnet wurde. Hier erfolgt die Kippsicherung der Träger meist über eine Gabellagerung.

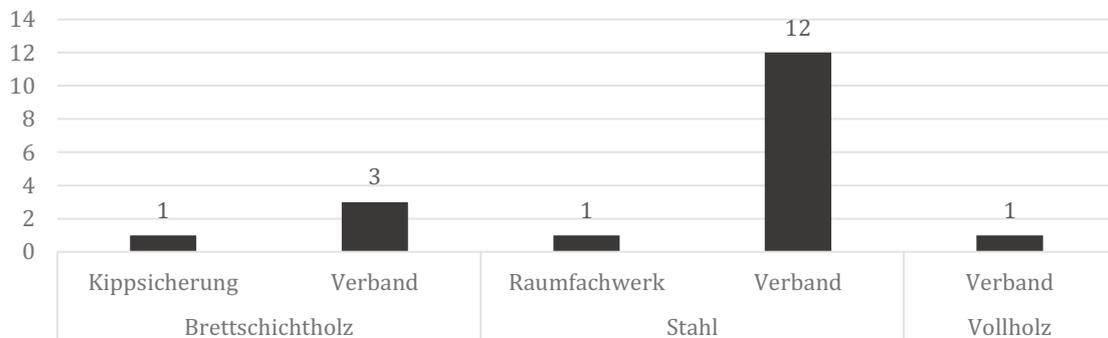


Abbildung 4.17: Untersuchte Aussteifungssysteme für Dachtragwerke

Für die Aussteifung in den Wandebenen wurden bis auf eine Ausnahme eingespannte Stützen eingesetzt. Bei der vorliegenden Ausnahme kam in der Produktionshalle ein schwerer Lastenkran zum Einsatz, dessen horizontale Lasteinwirkung über Wandverbände abgeleitet wird.

Um dem/der PlanerIn dennoch die Möglichkeit zu geben, das Aussteifungskonzept des Tragwerks anzupassen und verschiedene Varianten zu analysieren, werden 7 unterschiedliche Aussteifungskonzepte in den Modellierungsraum des parametrischen Tragwerksskripts aufgenommen.

Tabelle 4.8: Typische Aussteifungselemente, welche im Industriebau berücksichtigt werden müssen

Kategorie	Variante	Lagerungsbedingung Stütze	Dachverband	Wandverband
Aussteifungssystem	0	Eingespannt	Keiner	Keiner
	1	Gelenk um x-Achse	1x in x-Richtung	1x in x-Richtung
	2	Gelenk um x-Achse	2x in x-Richtung	2x in x-Richtung
	3	Gelenk um y-Achse	1x in y-Richtung	1x in y-Richtung
	4	Gelenk um y-Achse	2x in y-Richtung	2x in y-Richtung
	5	Gelenk um x & y-Achse	1x in x & y-Richtung	1x in x & y-Richtung
	6	Gelenk um x & y-Achse	2x in x & y-Richtung	2x in x & y-Richtung

Diese Variation ermöglicht die Modellierung und Analyse von zahlreichen Tragwerksystemen. Die berücksichtigten Aussteifungskonzepte können jederzeit erweitert und angepasst werden.

- **Fassadenpfosten und -riegel**

Auch wenn die Unterkonstruktion der Fassade für die Bemessung der statischen Hauptelemente nur wenig relevant ist, stellt diese gerade bei großen Rastermaßen ab 15m eine maßgebliche Kostenposition dar. Zum Einsatz kommen bei den beobachteten Use-Cases meist Stahlprofile mit den Querschnitten HEA240-HEA300. Bei den untersuchten Logistikhallen konnten auch zahlreiche Tragwerke untersucht werden, welche als Fassadenpfosten Stahlbeton-Fertigteilstützen aufweisen. Die untenstehende Abbildung zeigt die Gesamtlaufmeter der untersuchten Fassadenpfosten. Bemerkenswert ist hierbei, dass allein die Laufmeterlänge der Pfosten der Fassadenunterkonstruktion eine ähnliche Länge aufweist wie die aller verbauter Tragwerkstützen (8778m Fassadenpfosten zu 10432m Stützen). Natürlich weisen die Fassadenpfosten in der Regel eine weit geringere Dimension auf; allerdings ist hiermit dennoch die Rolle der Fassadenunterkonstruktion als maßgeblicher Vorentwurfsbestandteil bestätigt.



Abbildung 4.18: Summierte Laufmeter der Fassadenunterkonstruktion nach Material

Aus diesem Grund wird diese auch in den Modellierungsraum des parametrischen Skripts integriert. Allerdings wird sie wegen der statischen Unterordnung nicht aktiv in das parametrische Tragwerksskript eingegeben, sondern automatisch berücksichtigt. Aufbauend auf der mittleren Einflussbreite von ca. 6m, welche bei der Use-Case Analyse ermittelt wird, wird die Fassadenunterkonstruktion automatisch im Raster von 6m x 6m berücksichtigt. Als Querschnittsgeometrie wird ein Stahlquerschnitt HEA260 vordefiniert, welcher in den meisten Use-Cases zum Einsatz kommt.

Tabelle 4.9: Modellierungsraum für das Element Fassadenunterkonstruktion

Element	Bestandteile	Material	Querschnittsgruppe
Fassaden- Unterkonstruktion	Fassadenpfosten	S235	HEA260
	Fassadenriegel	S235	HEA260

- **Fundamente**

Die untersuchten Use-Cases weisen, wie für Hallentragwerke üblich, ausschließlich Einzelfundamente auf, wobei zu über 90% Fundamente mit Fertigteilköcher zum Einsatz kommen. Für eine genauere Untersuchung der Randbedingungen für die Wahl der Fundamentgröße müssten die bodenmechanischen Rahmenbedingungen der einzelnen Projekte untersucht werden. Diese Analyse wurde mangels vorhandener Daten nicht durchgeführt. Zusätzlich kann eine genaue Dimensionierung im parametrischen Tragwerksskript nicht stattfinden, da auch hier keine bodenmechanischen Nachweise implementiert sind. Aufgrund dessen wird die Auswahl und Bemessung der Fundamente zum aktuellen Zeitpunkt nicht in den Modellierungsraum aufgenommen.

Auf der folgenden Seite ist der letztgültige Modellierungsraum inklusive einer Möglichkeit einer Erweiterung abgebildet. Zusätzlich werden die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Tragwerkelementen dargestellt. Auf Basis dieses Modellierungsraum wird in weiterer Folge das parametrische Tragwerksskript modelliert.

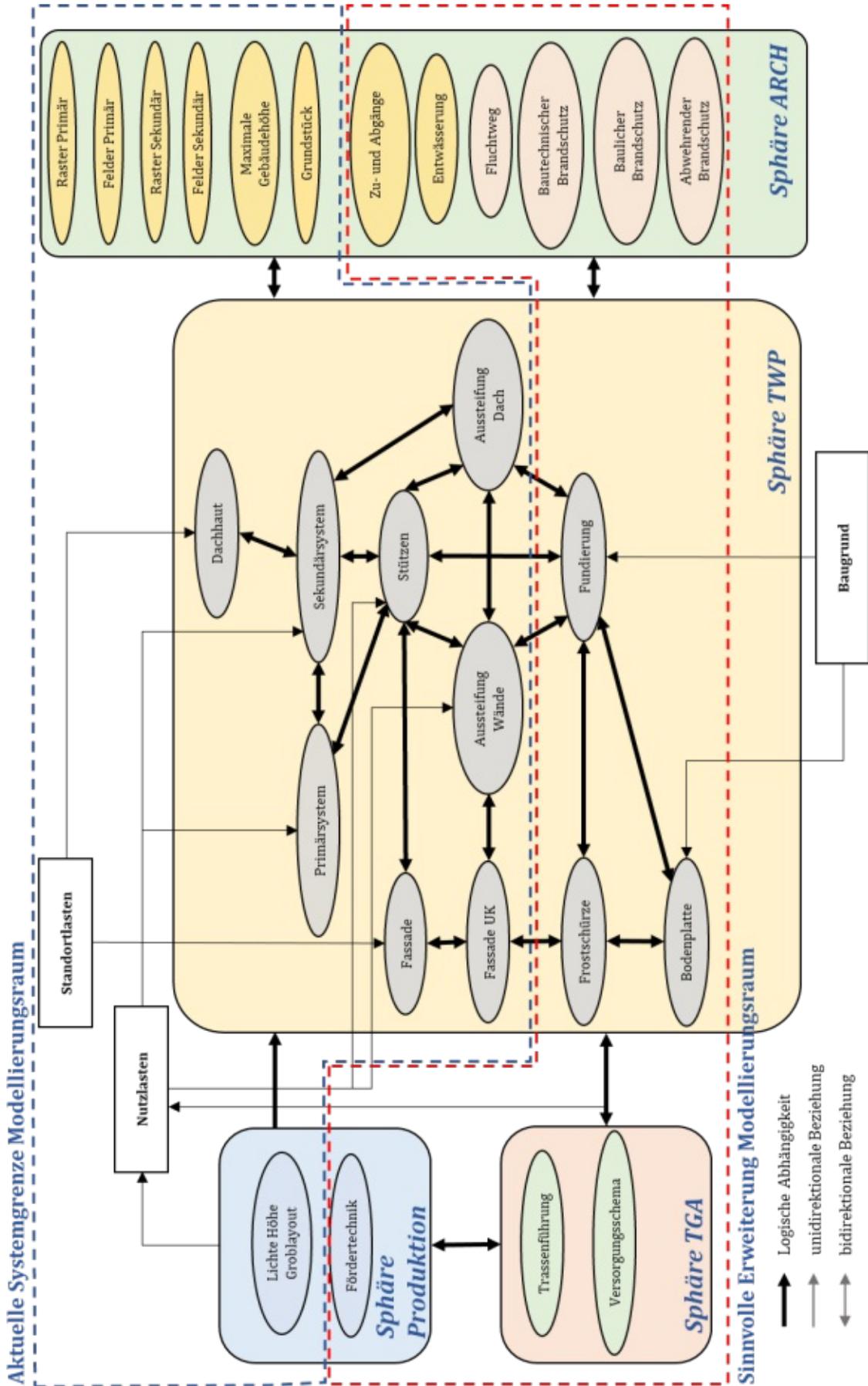


Abbildung 4.19: Darstellung des definierten Modellierungsraumes und dessen Abhängigkeiten

## 5 Framework Proposal

Aufbauend auf vergleichbaren Forschungsarbeiten und einer Analyse der verwendeten Software Tools wird ein Framework für die Arbeit mit dem Parametrischen Planungstool entwickelt. Das Grundkonzept sieht zunächst eine Definition der wichtigsten Eingangswerte der einzelnen FachplanerInnen vor, welche aktiv Einfluss auf die Gebäudestruktur nehmen. Für den Fall eines Hallentragwerks im Industriebau wurden hier aufbauend auf der Literaturrecherche folgende wichtige Stakeholder im Planungsprozess identifiziert (20) (2):

- Architekturplanung (inkl. Schnittstelle zu Bauherrenschaft)
- TGA-Planung
- Produktionsplanung
- Tragwerksplanung

Da eine umfangreiche Aufstellung der Aufgabenbereiche der einzelnen FachplanerInnen für die gegebene Aufgabenstellung nicht sinnvoll ist, werden nur jene Teilbereiche näher beschrieben, welche bei der Umsetzung des parametrischen Tragwerksskripts implementiert wurden.

### 5.1 Input Architekturplanung

Die Kernaufgaben der Architekturplanung in der frühen Vor-Entwurfsphase (Grundlagenermittlung Leistungsphase 1 und Vorplanung Leistungsphase 2 lt. HOAI) werden im Anschluss dargestellt (29). Insbesondere die fett hervorgehobenen Teilaspekte dienen in weiterer Folge als Eingangswerte für das parametrische Tragwerksskript.

Leistungsphase 1:

- Klären der Aufgabenstellung auf Grundlage der Vorgaben oder der Bedarfsplanung des Auftraggebers
- Ortsbesichtigung
- Zusammenfassen, Erläutern und Dokumentieren der Ergebnisse
- **Machbarkeitsstudie (behördlicher Rahmenbedingungen)**
- **Wirtschaftlichkeitsuntersuchung**
- **Analyse Grundstück**

Leistungsphase 2:

- **Erarbeitung eines Planungskonzepts**
- **Skizzen und Erläuterungen zur Baukörperstruktur (inkl. Festlegung zu BGF)**
- Erstmaliger Behördenkontakt
- Festlegungen zu Ausstattungsstandard (bei Hallentragwerk z.B. auch Materialität)
- **Kostenschätzung**

Ausgehend von diesem Wissensstand werden die relevanten Eingangsparameter seitens Architektur für das parametrische Tragwerksskript ausgewählt. Wie bereits beschrieben, stellen die Parameter nur eine Auswahl dar, und es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Zur Vereinfachung wird von einer im Grundriss rechteckigen Kubatur ausgegangen.

Die architektonischen Randbedingungen werden in folgende Kategorien unterteilt:

- Geometrische Randbedingungen & Behördenvorgaben  
Parameter, welche in Abhängigkeit zur Baukörperkubatur oder dem Grundstück stehen  
z.B. Raster, Gebäudehöhe, Grundstück, Kubatur, Grundrissform, Position Gebäude am Grundstück
- BauherrInnenwünsche  
Randbedingungen für den Planungsprozess, welche von die/der BauherrIn vorgegeben werden.  
z.B. Vorgaben Materialität und Tragwerksstruktur, Kostenrahmen

Diese Randbedingungen werden vor der parametrischen Analyse definiert und dienen als Eingangswerte zur Vorauswahl für die Variantenstudie im Vorentwurf.

## 5.2 Input TGA-Planung

Die genauen Rahmenbedingungen der TGA-Planung im Vorentwurf werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher beleuchtet. Für die Umsetzung der parametrischen Analyse beläuft sich der Input der TGA-Planung auf die Vorgabe von Versorgungstrassen und damit verbundenen Nutzlasten durch TGA-Installationen. Zusätzlich können bestimmte konzentrierte Lastbereiche wie Lüftungsgeräte oder Technikzentrale auf der Dachfläche als Eingabewerte für das parametrische Tragwerksskript dienen.

## 5.3 Input Produktionsplanung

Die Produktionsplanung befindet sich zum Zeitpunkt der parametrischen Analyse in der Strukturplanung, welche zwischen der Strategie- und der Systemplanung angesiedelt ist (30). Die Strukturplanung wird folgendermaßen in der Literatur beschrieben (Zitat aus (30)):

*„Ergebnis der ganzheitlichen Strukturplanung ist die Bestimmung der zukünftigen Prinzipien in Fertigung, Montage, Transport und Lagerhaltung. Weiterhin werden die ermittelten Produktionsstrukturen mit der räumlichen Werksstruktur einschließlich der günstigsten Anordnung der Betriebsbereiche (Materialfluss, Groblayout) bestimmt.“*

Der Groblayoutplan wird somit als Produkt dieses Struktur-Planungsprozesses gesehen. Dieser wird mit Lastangaben für die einzelnen Produktionsbereiche versehen und über eine XLS-Schnittstelle in das parametrische Tragwerksskript eingespielt. Während einer Variantenstudie können auch mehrere Groblayouts eingelesen werden, um verschiedene Nutzungsszenarien zu simulieren. Somit können flexible Tragwerke durch die Analyse verschiedener Produktionssituationen entworfen werden.

## 5.4 Input Tragwerksplanung

Eine der Kernaufgaben der Tragwerksplanung in der Vor-Entwurfsphase ist die Aufbereitung der Standortlasten und erster Lastenplänen auf Basis der Angaben anderer FachplanerInnen. Es wird eine erste Vorauswahl möglicher Strukturtypen für die Tragkonstruktion in Abstimmung mit der Bauherrenschaft erstellt. Auch können erste Grundsatzentscheidungen für das Aussteifungskonzept getroffen werden. Die Tragwerksplanung bereitet diese Informationsbasis auf und dokumentiert diese. Auf dieser Basis wird im Anschluss der Modellierungsraum abgesteckt, welcher im Rahmen einer Variantenstudie näher untersucht wird.

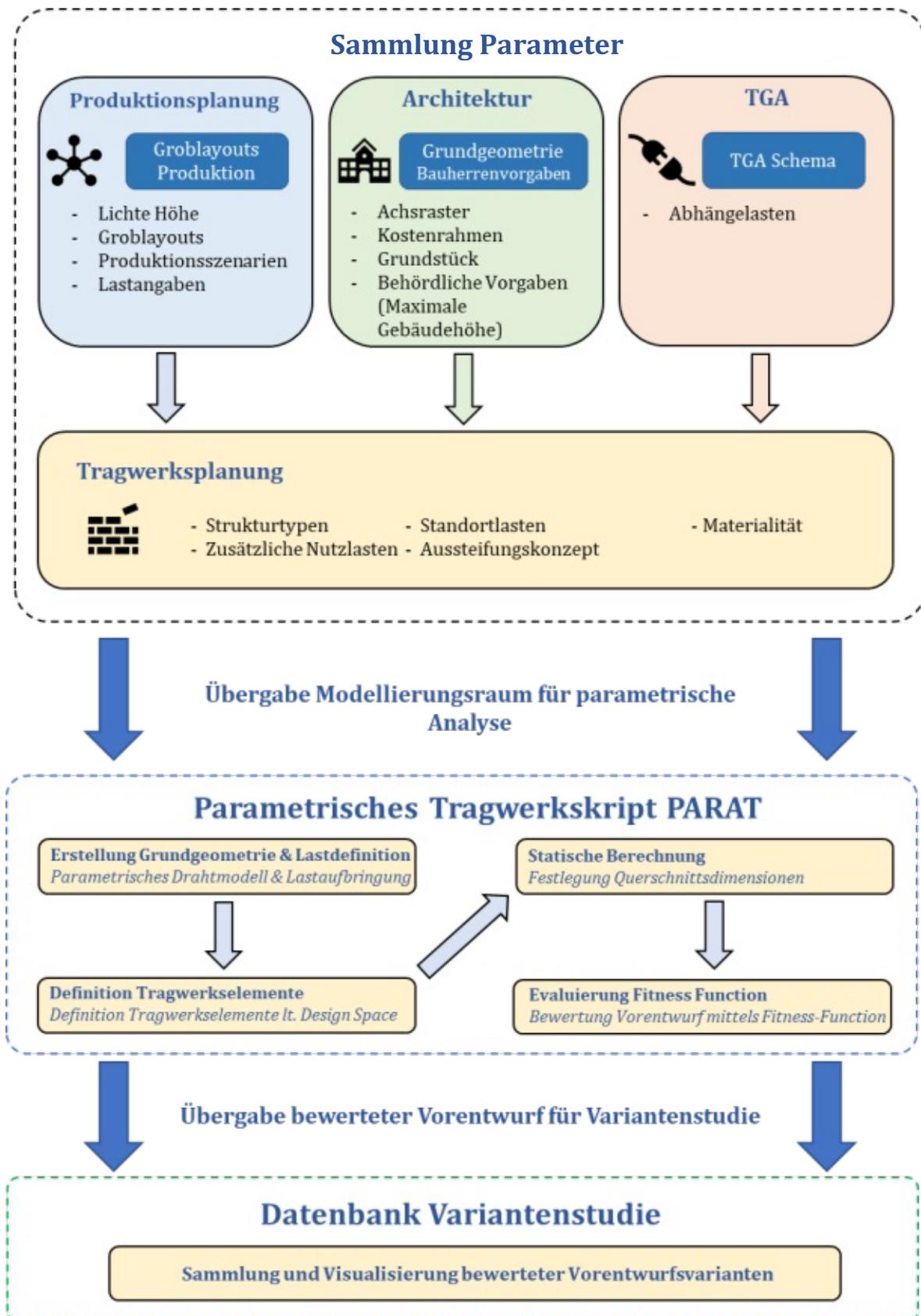


Abbildung 5.1: Framework – Arbeitsweise mit dem parametrischen Tragwerkskript PARAT

## 5.5 Automatisierte Bewertungsfunktion – Kosten- & Flexibilität

In diesem Kapitel wird die Grundlage für die Entwicklung einer automatisierten Bewertungsfunktion (=Bewertungsfunktion) geschaffen. Ziel ist es, einen Bewertungsalgorithmus für die automatisiert generierten Vorentwurfsvarianten zu entwickeln, welcher die wichtigsten Aspekte der Flexibilität im Industriebau abdeckt. Die während der Literaturrecherche evaluierten Flexibilitätskriterien werden auf ihre Anwendbarkeit für den parametrischen Vorentwurf untersucht und eine Auswahl dieser wird zu den sogenannten „Objectives“ (=Zielfunktionen) zusammengefasst. Diese Objectives werden im Anschluss erläutert.

### 5.5.1 Zieldefinition - Objectives

Die Objectives können in die übergeordneten Ziele Ökonomie, sowie Flexibilität unterteilt werden. Zusätzlich sollen in Zukunft auch ökologische Faktoren in die Bewertung integriert werden. In der folgenden Tabelle werden die definierten Objectives näher erläutert. Im Anschluss werden diese einzeln diskutiert und eine Berechnungssystematik entwickelt. Die grundlegende Strategie ist hierbei eine Bewertung der einzelnen Kriterien mit Werten zwischen 0 und 1, wobei eine höhere Bewertung positiv eingestuft wird. Die Mittelwertbildung und Bewertung erfolgt über die Wichtungs-Faktoren  $\gamma$ , wobei hier eine beliebige Wichtung durchgeführt werden kann. Alternativ gäbe es noch zahlreiche andere Möglichkeiten für die Definition einer Bewertungsfunktion, allerdings wird zunächst diese Form gewählt, da diese aufgrund ihrer Einfachheit sehr einfach zu interpretieren ist. Als mögliche Schwäche des gewählten Optimierungsansatzes ist, dass die Ergebnisse sehr stark von der gewählten Wichtung abhängen. Gleichzeitig ist es schwer, die Auswirkungen einer bestimmten Wichtung im Vorfeld zu bestimmen. Allfällig müssen somit mehrere Variantenstudien mit unterschiedlichen Wichtungen durchgeführt werden, um den gewünschten Effekt zu erzielen.

$$O = \sum_i^n \gamma_i o_i \quad o_i \in [0..1] \quad (1)$$

$$\sum_i^n \gamma_i = 1 \quad (2)$$

$o_i$  ... Objectives

$\gamma_i$  ... Wichtungsfaktoren

$O$  ... Objective Funktion

Tabelle 5.1: Kriterien für Flexibilität einer Gebäudestruktur

Ziel	Bezeichnung	Kriterium	Objective	Indikator	Evaluierung
Ökonomie	$o_1$		Kostenoptimierung	Baukosten	Baukosten Rohbau KG 2 nach ÖNORM 1801-1
Flexibilität	$o_4$	10, 14, 22	Dauerhaftigkeit der Tragstruktur	Zusätzliche Tragreserve bei Planung	Last $F_{RT}$
	$o_5$	2, 16	Nutzflächenreserve in Gebäude	Ungenutzte Gebäudelfläche	Prozentuell
	$o_6$	3, 18	Maximierung Netto-raumhöhen	Ungenutzte Netto-raumhöhe	Längenbasiert
	$o_7$	4, 17	Reduktion von Stützen und Lastabtragenden Elementen	Achsraster	Prozentuell

Objective  $o_1$  zielt auf eine Reduktion der Baukosten ab. Eine umfangreiche Berechnung der Lebenszykluskosten würde zwar eine höhere Aussagekraft aufweisen, allerdings liegen zum Zeitpunkt der Erstellung der Forschungsarbeit zu wenig Daten vor, um eine vollautomatisierte Berechnung der Lebenszykluskosten in das PARAT zu implementieren. Stellvertretend werden die reinen Baukosten des Rohbaus (Kostengruppe 2 nach ÖNORM EN 1991-1) auf Basis des Materialeinsatzes berechnet.

Die verwendeten Kostenkennwerte können der folgenden Tabelle entnommen werden. Diese stellen Erfahrungswerte dar, welche aus Gesprächen mit FachplanerInnen gewonnen werden.

Tabelle 5.2: Kostenkennwerte für die vereinfachte Kostenberechnung (Netto)

Material	Struktur	Kennwert
Holz	Brettschichtholzträger	800 €/m <sup>3</sup>
	Holzfachwerk	1100 €/m <sup>3</sup>
	Verbindungsmitel	Massenaufschlag 5%
Stahlbeton	Bewehrungsstahl	2 €/kg
	Beton	100 €/m <sup>3</sup>
	Schalung	60 €/m <sup>2</sup>
	Mittlerer Bewehrungsgrad Stahlbeton-Elemente	300 kg/m <sup>3</sup>
Stahl	Konstruktiver Stahl	4 €/kg
	Verbindungsmitel	Massenaufschlag 5%

Die Evaluierung von Objective  $o_1$  erfolgt, indem der definierte Kostenrahmen inkl. 30% Zuschlag als absolutes Kostenmaximum  $K_{max}$  gesetzt wird. Dieser wird anschließend verglichen mit dem Ergebnis der vereinfachten Kostenkalkulation für die Rohbauelemente des Tragwerks.

$$o_1 = 1 - \frac{K_{calc}}{K_{max}} \quad (3)$$

Für den Fall, dass die kalkulierten Kosten exakt das Kostenmaximum sind, wird  $o_1$  zu null, was die schlechteste Bewertung darstellt. Ein Wert kleiner null ist theoretisch möglich; die betroffene Entwurfsvariante wird allerdings aufgrund der Überschreitung der Kostenobergrenze nicht berücksichtigt (siehe formulierte Randbedingungen im folgenden Kapitel).  $o_1$  stellt somit eine **lineare** Funktion dar mit einem Maximum bei der fiktiven Kostenuntergrenze 0€.

Objective  $o_4$  wird durch das Ansetzen einer zusätzlichen Lastreserve bei der automatisierten Vorentwurfsgenerierung berücksichtigt. Die Lastreserve wird in Form einer gleichmäßig verteilten Flächenlast auf das Dachtragwerk angesetzt. Für die Evaluierung werden verschiedene Lastreserven  $F_{RT}$  zur Auswahl gestellt (z.B. 0,00; 0,50; 1,00 kN/m<sup>2</sup>). Die bei der Vorentwurfsvariante angesetzte Lastreserve  $F_{RT}$  wird dann mit der maximal zur Auswahl stehenden Lastreserve verglichen und so bewertet.

$$o_4 = \frac{F_{RT}}{F_{RT,max}} \quad (4)$$

$o_4$  stellt somit eine **lineare** Funktion im Wertebereich [0..1] dar, mit einem Maximum beim Ansetzen der maximalen Lastreserve.

Die Erfüllung von Objective  $o_5$  wird überprüft, indem die zusätzlich zur Fläche des Groblayouts (=Produktionsfläche  $A_P$ ) vorhandene Flächenreserve bewertet wird. Die Stützenfläche wird hierbei weder bei der Produktionsfläche noch bei der Brutto-Hallenfläche ( $A_{BHF}$ ) in Abzug gebracht, da dies bei den vorliegenden Hallen-Geometrien nur vernachlässigbar kleine Unterschiede in der Berechnung ergeben würde. Die Berechnung erfolgt, indem die Produktionsfläche relativ zur Brutto-Hallenfläche gesetzt wird und der so entstehende Produktionsflächenanteil von 1 abgezogen wird.

$$o_5 = 1 - \frac{A_P}{A_{BHF}} \quad (5)$$

$o_5$  stellt somit eine **lineare** Funktion im Wertebereich [0..1] dar, mit einem theoretischen Maximum bei einer Produktionsfläche von 0 (=gesamte Halle als Flächenreserve).

Objective  $o_6$  dient der positiven Bewertung einer maximierten Netto-Raumhöhe. Folglich sollen hier besonders Entwürfe mit einer schlanken Tragkonstruktion positiv bewertet werden.

$$o_6 = \frac{H_{max} - H_D - (H_{NR} + H_{TW})}{H_{max} - H_D - H_{NR}} \quad (6)$$

Grundsätzlich wird von einer Bebauung bis zur maximal möglichen Gebäudehöhe ausgegangen. Der Term im Nenner des Bruchs beschreibt die theoretisch maximal zur Verfügung stehende Höhenreserve bei einer theoretischen Tragwerkshöhe  $H_{TW}=0$ . Der Term im Zähler berechnet die real bei der Entwurfskonfiguration zur Verfügung stehende Höhenreserve. Die verwendeten Höhen sind in untenstehender Abbildung grafisch dargestellt.

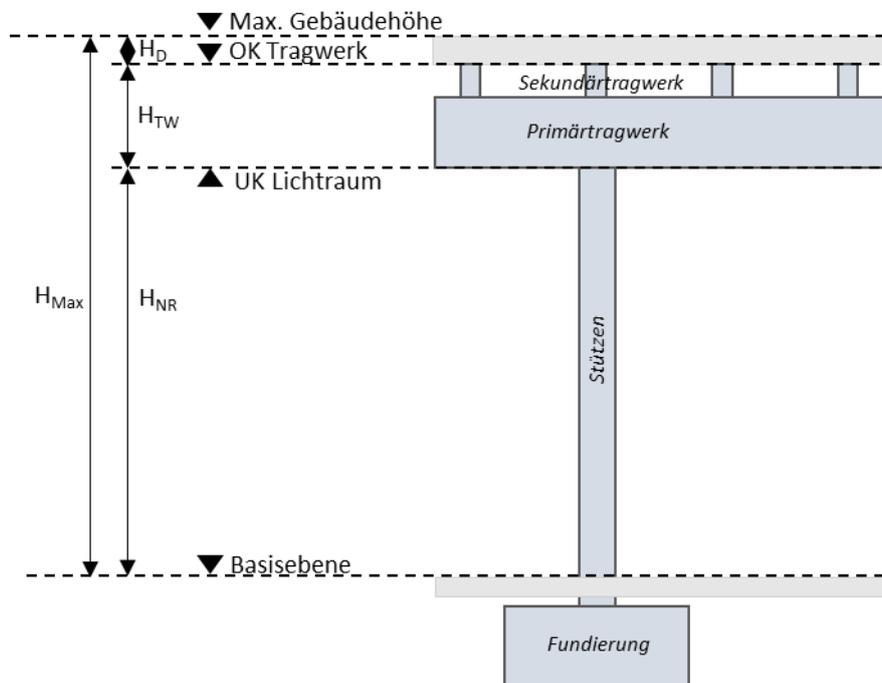


Abbildung 5.2: Definition berechnete Höhen im Gebäude

$o_6$  ist somit eine **lineare Funktion** im Wertebereich [0..1], welche ein Maximum bei einer theoretisch minimalen Tragwerkshöhe von 0m hat.

Das Objective  $o_7$  dient der Reduktion von Stützen und lastabtragenden Elementen innerhalb der Produktionsflächen der Halle. Eine Formulierung auf Basis der Grundfläche der Stützen relativ zur Hallenfläche wurde untersucht und kann ausgeschlossen werden, da aufgrund der geringen Stützenfläche relativ zur Hallenfläche die Unterschiede in der Bewertung der verschiedenen Vorentwurfvarianten zu gering ausfallen. Folglich wird ein Konzept angestrebt, welches nicht die Reduktion von Stützen, sondern stellvertretend großzügige Rastermaße positiv bewertet. Aufbauend auf dem formulierten Modellierungsraum für die parametrische Analyse wird somit die Fläche des maximal zur Auswahl stehenden Achsrasters ( $A_{opt}$ ) als optimal gewertet. Werden kleinere Achsraster gewählt, wird die Bewertung in Abhängigkeit ihrer Rasterfläche  $A_R$  vorgenommen.

$$o_7 = \frac{A_{Raster}}{A_{opt}} \quad (7)$$

Zur Veranschaulichung wird in untenstehender Grafik ein Beispiel angeführt:

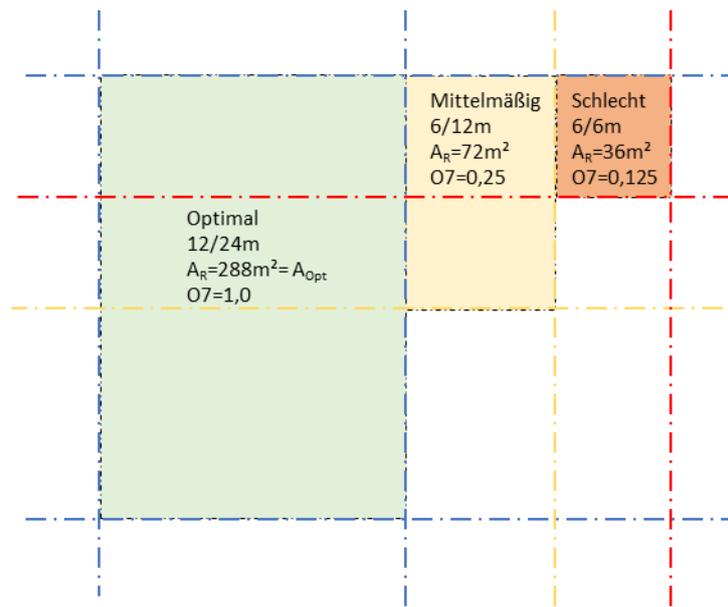


Abbildung 5.3: Beispielberechnung  $o_7$  für 3 unterschiedliche Rastermaße, bei  $A_{\text{Opt}}=288\text{m}^2$

Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass der gesamte Wertebereich  $[0..1]$  auch in Abhängigkeit des vordefinierten Modellierungsraumes erreicht werden kann. Bei  $o_7$  handelt es sich um eine **quadratische** Funktion mit einem Maximum bei der Verwendung des maximal zur Verfügung stehenden Achsrasters  $A_{\text{Opt}}$ . Durch die Nichtlinearität der Funktion wird sichergestellt, dass die Bewertung realitätsnahe stattfindet, denn die Use-Case Analyse hat gezeigt, dass auch in der Praxis große Rastermaße einen hohen Stellenwert für flexible Gebäudestrukturen darstellen.

### 5.5.2 Randbedingungen – Constraints

Damit nur plausible Vorentwürfe in die Variantenstudie miteinbezogen werden, wurden Randbedingungen (=Constraints) formuliert. Diese Constraints weisen mathematisch alle den Wertebereich  $[0,1]$  auf, sind somit also entweder eingehalten oder verletzt. Mathematisch lässt sich diese Beziehung folgendermaßen darstellen:

$$C = \prod c_i \quad c_i \in [0,1] \quad (8)$$

$c_i$  ... Constraints

$C$  ... Constraint Funktion

Die Constraint-Funktion weist ebenfalls den Wertebereich  $[0,1]$  auf. Die berücksichtigten Constraints können in 3 Unterkategorien unterteilt werden:

- Statisch/konstruktive Randbedingungen
- Geometrische Randbedingungen
- Ökonomische Randbedingungen

In der folgenden Tabelle werden die definierten Constraints dargestellt:

Tabelle 5.3: Unterkategorien und Beschreibung der verwendeten Constraints

Kat.	Nr.	Constraint	Wertebereich
Statisch/ Konstruktiv	<b>c1</b>	Ausnutzungsgrad der Tragwerkselemente $\leq 1,0$	[0,1]
	<b>c2</b>	Vorhandene Tragwerksverformung $\leq$ zulässige Verformung	[0,1]
	<b>c3</b>	Grad der statischen Bestimmtheit $> 0$	[0,1]
	<b>c4</b>	Abstand der Sekundärtragelemente $\leq 6\text{m}$	[0,1]
Geometrie	<b>c5</b>	Einhaltung der maximalen Gebäudehöhe	[0,1]
	<b>c6</b>	Verfügbare Hallenfläche $>$ Produktionsfläche	[0,1]
	<b>c7</b>	Gebäudeabmessungen $<$ Grundstücksfläche	[0,1]
Ökonomie	<b>c8</b>	Maximalüberschreitung des definierten Kostenrahmens um 30%	[0,1]

Constraint  $c_1$  überprüft die Einhaltung des maximalen Ausnutzungsgrades der einzelnen Tragwerkselemente in der statischen Berechnung. Für jede Gruppe an Tragwerkselementen wird das am höchsten belastete Exemplar überprüft.

$$\sigma_{p_i, s_j, c_j, b_j} \leq \sigma_{p_i, s_j, c_j, b_j}^{max} \quad (9)$$

Constraint  $c_2$  überprüft, ob die maximale Tragwerksverformung der Primär- und Sekundärkonstruktionen eingehalten wird. Hierfür wird die Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit unter charakteristischer Lastkombination mit  $1/250$  begrenzt.

Zusätzlich wird die maßgebende horizontale Stützenkopferschiebung überprüft. Dies wird ebenfalls mit  $1/250$  der Stützhöhe begrenzt.

$$u_{z, p_i, s_j} \leq u_{z, max} = \frac{l}{250} \quad (10)$$

$$u_{h, c} \leq u_{h, max} = \frac{h_c}{250} \quad (11)$$

Constraint  $c_3$  überprüft, ob das System Freiheitsgrade aufweist. Dies ist erforderlich, da in manchen Fällen die numerische Berechnung der parametrischen Tragwerksmodelle Ergebnisse liefert, obwohl Freiheitsgrade vorliegen. In diesem Fall weist das Modell in manchen Bereichen nahezu unendliche Verformungen auf. Da beobachtet wurde, dass diese nicht immer in der Constraint  $c_2$  erkannt werden, wird zusätzlich diese Überprüfung eingeführt, welche anschlügt, wenn unrealistisch große Verformungen im Modell kalkuliert werden (Grenzwert  $u_{z, primär} = 1000\text{m}$ )

$$u_{z, primär} \leq u_z = 1000\text{m} \quad (12)$$

Bei Constraint  $c_4$  handelt es sich um ein Kriterium, welches sicherstellt, dass die verbleibende Spannweite für das tertiäre Dachsystem nicht über 6m liegt. Die Use-Case Analyse und Gespräche mit FachplanerInnen haben ergeben, dass dies die maximale praxisübliche und wirtschaftliche Spannweite darstellt.

$$|\overrightarrow{a_{sek}}| \leq 6m \quad (13)$$

Constraint  $c_5$  überprüft die Einhaltung der maximalen Gebäudehöhe, welche als Eingangswert in die parametrische Analyse seitens Architektur eingegeben wird.

$$(H_{NR} + H_{TW} + H_D) \leq H_{max} \quad (14)$$

Constraint  $c_6$  kontrolliert, dass die verfügbare Hallenfläche ausreicht, um die Produktionsfläche aus der Groblayoutplanung zu beherbergen.

$$A_P \leq A_{BHF} \quad (15)$$

Constraint  $c_7$  überprüft die Plausibilität der Gebäudeabmessungen relativ zur Grundstücksfläche.

$$R \subseteq R_{Prop} \quad (16)$$

Constraint  $c_8$  überprüft, ob das vorgegebene Kostenmaximum  $K_{max}$ , welches sich aktuell aus dem Kostenrahmen inkl. 30% Aufschlag berechnet, eingehalten wird.

$$K_{max} = K_{Rahmen} * 1,30 \leq K_{calc} \quad (17)$$

### 5.5.3 Bewertungsfunktion

Die Berechnung der Bewertungsfunktion erfolgt nach der Auswertung der einzelnen Objectives und Constraints nach dem folgenden Schema:

$$F = O * C \quad (18)$$

So ist sichergestellt, dass Vorentwürfe, welche die Constraints verletzen, ein Rating von 0 erhalten.

## 6 Parametrisches Tragwerksskript

Das folgende Kapitel liefert einen Überblick über die Umsetzung des parametrischen Planungstools (PARAT) in der Software Grasshopper. Zunächst werden im Kapitel „Aufbau- und Ablauforganisation“ die einzelnen Teilbereiche und Schnittstellen erklärt und somit die Grundbausteine des Skripts dargelegt. Somit wird der Weg von der Eingabe der Eingangsgröße bis hin zur Ausgabe eines bewerteten Vorentwurfs beschrieben. Die eingesetzten Berechnungsalgorithmen, deren Randbedingungen und Ansätze werden präsentiert.

### 6.1 Aufbau- und Ablauforganisation

Das parametrische Tragwerksskript gliedert sich in 8 Teilbereiche, wobei jeder Teilbereich einen logischen Schritt innerhalb der Berechnung beschreibt. Diese Schritte werden im Anschluss beschrieben. In der Abbildung auf der folgenden Seite ist der Arbeitsbereich (genannt Canvas) des Skripts in Grasshopper mit den einzelnen Teilbereichen dargestellt.

#### 1) Schnittstelle Produktionsplanung

In diesem ersten Teilbereich erfolgt der Import von Varianten des Groblayouts der Produktionsplanung inklusive Lastangaben aus einer mit dem Grasshopper-Skript gekoppelten XLS-Tabelle.

#### 2) Eingangsparameter

Die Geometrie- und Tragwerksparameter werden aus dem Modellierungsraum ausgewählt.

#### 3) Grundlagen parametrisches Modell

In diesem Schritt erfolgt die Erstellung der Grundgeometrie des parametrischen Modells. Zusätzlich werden die Lasten auf Basis des Groblayouts generiert sowie Gelenksbedingungen definiert.

#### 4) Definition Strukturelemente

Hier werden die einzelnen Elemente der Tragstruktur erstellt.

#### 5) Statische Analyse

Nun werden die statische Berechnung und die Auswahl plausibler Querschnitte für die Tragkonstruktion durchgeführt.

#### 6) Nachbearbeitung

Hier werden einzelne Kenngrößen der Elemente ausgelesen und deren geometrische Lage angepasst.

#### 7) Ergebnissammlung und Kostenberechnung

Hier werden die Ergebnisse der Vorentwurfsvariante gesammelt und eine Kostenberechnung durchgeführt.

#### 8) Berechnung Bewertungsfunktion

Nun erfolgt die Bewertung durch die Bewertungsfunktion und die Vorbereitung des Outputs.

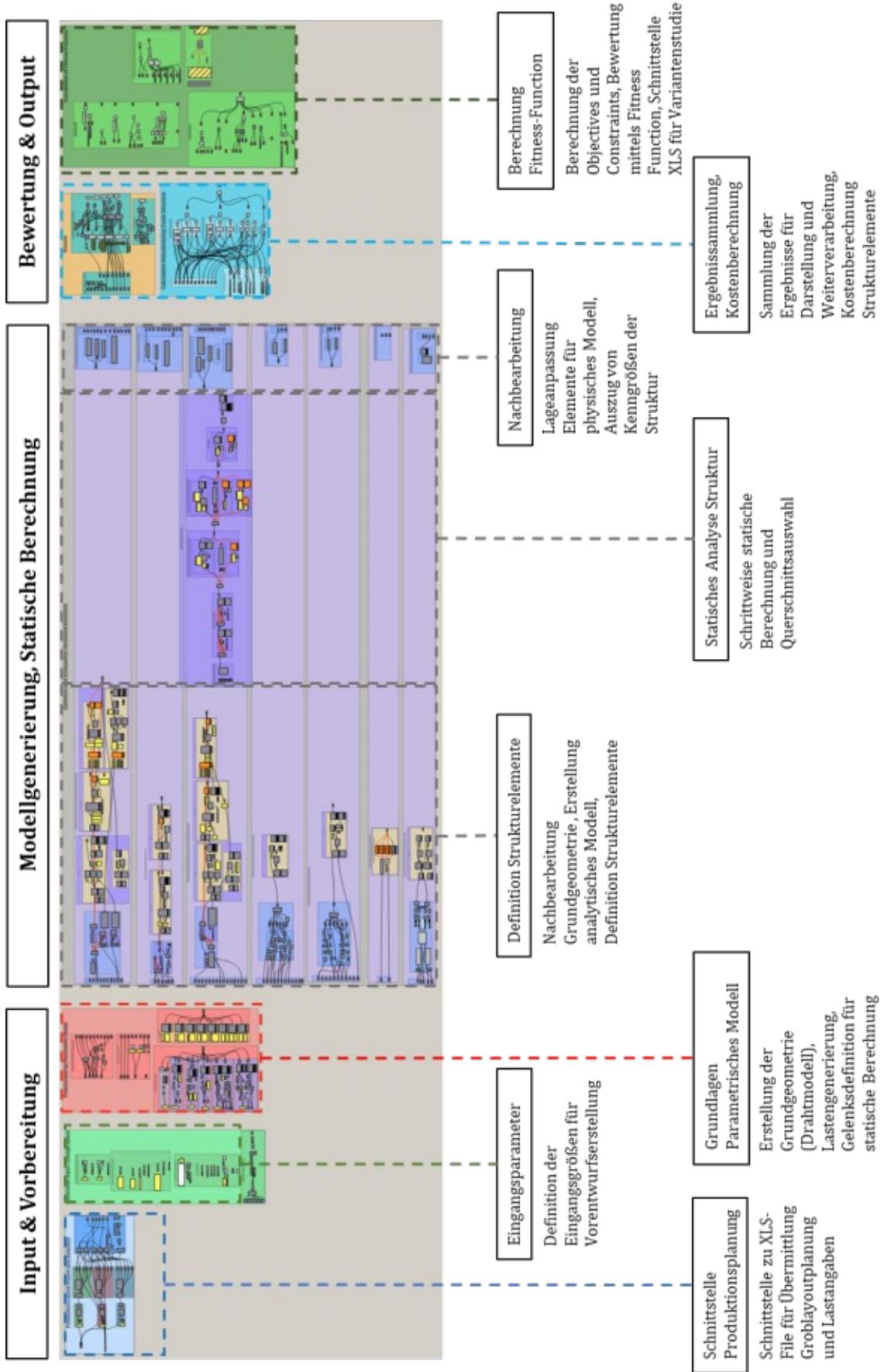


Abbildung 6.1: Grundlegender Aufbau des parametrischen Skripts inkl. Beschreibung der Teilbereiche

## 6.2 Schnittstelle Produktionsplanung - „Production Layout Import and Selection“

Der Import der Informationen aus der Produktionsplanung erfolgt mittels einer verknüpften XLS-Datentabelle.

Die relevanten Kenngrößen des Groblayouts, welche von der Produktionsplanung in die XLS-Tabelle eingegeben werden, sind die x- und y-Positionen sowie Abmessungen der einzelnen Produktionsbereiche und die in diesem Teilbereich auftretende Abhängelast, welche auf das Dachtragwerk wirkt. In der folgenden Abbildung ist die Geometrie des Groblayouts einer realen Industriebauhalle, welche in der Use-Case Analyse untersucht wurde, dargestellt. Die Farben repräsentieren verschiedene Produktionsbereiche. Auch die unterschiedlichen Höhenanforderungen der Nutzungsbereich sind ersichtlich.

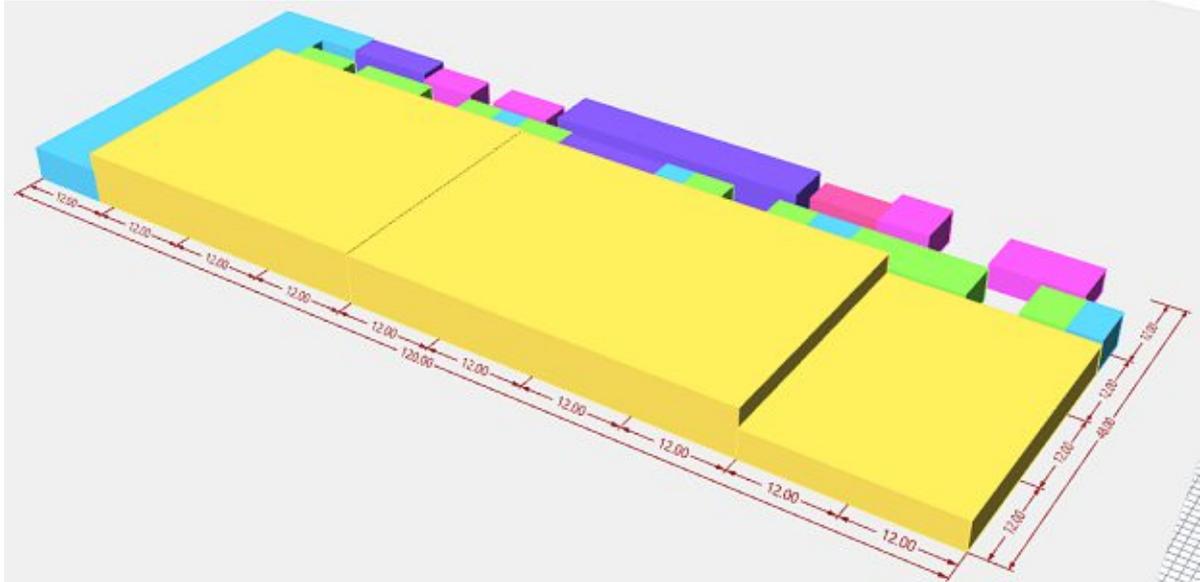


Abbildung 6.2: Importiertes Groblayout in Blockform – die Farben repräsentieren unterschiedliche Produktionsbereiche

Im letzten Schritt werden relevante Kenngrößen der Layoutvariante gesammelt und berechnet. Dies sind:

- 1) RHINO-Geometrien der einzelnen Blöcke und deren Basisflächen (zur späteren Lastaufbringung) als Mesh
- 2) Erforderliche Lichte Raumhöhe für den Produktionsprozess (Hall Headroom), welche aus der maximalen Blockhöhe berechnet wird
- 3) Abhängelasten der Produktionsbereiche als Liste
- 4) Gesamtfläche der Produktion zur Überprüfung der Constraints
- 5) Maximale x- und y-Ausdehnung des Groblayouts zur Überprüfung der Constraints

## 6.3 Eingangsparameter – „Parameter Input- Modellierungsraum“

Ausgehend von dem definierten Modellierungsraum werden hier die Eingangsparameter für die Vorentwurfs-Variantengenerierung definiert. Zusätzlich werden die Eingaben betreffend Standortlasten (Wind und Schnee), Eigengewicht der Dachkonstruktion durchgeführt sowie die anzusetzende Lastreserve ( $F_{RT}$  Retrofitting Load Structure) definiert. Die bei der Bemessung zu verwendende Lastkombination kann eingegeben werden. Die Eingabe der Grundstücksgeometrie sowie die Position des Hallentragwerks am Grundstück kann ebenfalls hier eingegeben werden.

In der aktuellen Version des PARAT kann immer nur eine Bemessungskombination zuzüglich zur Lastkombination 0 (Eigengewicht) in die statische Berechnung übergeben werden. Es wäre auch technisch möglich, mehrere Lastkombinationen parallel zu berechnen und einzelne logische Schritte mit den Ergebnissen verschiedener Lastkombinationen durchzuführen. Zum Beispiel die Vorbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit, Nachweis Durchbiegung unter charakteristischer Lastkombination entsprechend EN1990. Allerdings wären hierfür mehrere iterative Berechnungszyklen mit verschiedenen Lastkombinationen notwendig, was die gesamte Berechnungsdauer des PARAT stark erhöhen würde. Da allerdings ein Interesse daran besteht, für zukünftige Optimierungsläufe hunderte oder sogar tausende Tragwerksvarianten zu berechnen, wird auf dies verzichtet. Stattdessen wird die Tragwerksberechnung ausschließlich mit einer charakteristischen Lastkombination durchgeführt. Diese Vorgangsweise wird damit begründet, dass Gespräche mit FachplanerInnen sowie die Literaturrecherche gezeigt haben, dass gerade bei Hallentragwerken meist die Begrenzung der Verformungen das maßgebliche Kriterium für die Dimensionierung der Tragwerkelemente darstellt. Sollte es gewünscht sein, die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit durchzuführen, können die Kombinationsfaktoren der einzelnen Lastfälle angepasst werden.

In der danach folgenden Sektion „Load Inputs“ werden die Standortlasten sowie das Eigengewicht der Dachkonstruktion nach dem folgenden Schema eingegeben:

- Schnee als resultierende Schneelast auf die Dachfläche inkl. Beiwert  $\mu$  nach EN 1991-1-3 in  $\text{kN/m}^2$
- Resultierender Winddruck  $w_e$  aus x- und y-Richtung nach EN 1991-1-4 in  $\text{kN/m}^2$ . Windlasten auf die Dachfläche werden nicht berücksichtigt, da diese in der Regel keinen maßgeblichen Einfluss auf die vertikalen Lasten der Tragstruktur haben
- Eigengewicht des Dachsystems in Abhängigkeit des Dachaufbaus in  $\text{kN/m}^2$
- Lastreserve für die Bemessung der Konstruktion in  $\text{kN/m}^2$ . Diese wird als gleichmäßig verteilte Abhängelast zusätzlich auf das Dachtragwerk im Lastfall Nutzlast aufgebracht.

Im Abschnitt „Liveload Meshes“ und „Liveload Values“ werden die aus der Produktionsplanung stammenden Nutzlastangaben gesammelt. Hier ist keine zusätzliche Eingabe erforderlich.

Der letzte Abschnitt der Eingabesektion betrifft die Eingabe der Grundstücksgeometrie sowie die Position des Hallentragwerks am Grundriss. Die Grundstückskontur wird als Polylinie mittels der Eckpunkte eingegeben. Die x- und y-Position der Halle am Grundstück sowie eine allfällige Drehung können ebenfalls in dieser Sektion eingegeben werden.

Mit diesem Teilbereich endet die User-Eingabe in das PARAT; die folgenden Schritte werden alle automatisiert ausgeführt. Es ist keine Intervention erforderlich, außer der/die PlanerIn möchte festgelegte Default-Werte des Skripts anpassen, auf welche in den jeweiligen Teilbereichen eingegangen wird.

#### 6.4 Grundlagen parametrisches Modell – „Preprocessing Parametric Model“

In diesem Teilbereich erfolgt die Erstellung der Grundgeometrie (Achsraster und Knotenpunkte) der Halle sowie das Auslesen der Strukturtypen der Tragkonstruktion auf Basis der Eingangsparameter (insbesondere für die aussteifenden Elemente, da diese auf Basis des Eingangsparameters „Aussteifungssystem“ definiert werden müssen). Es werden die Modelllasten der einzelnen Lastfälle erstellt sowie die Gelenksbedingungen zwischen den einzelnen Strukturelementen definiert.

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis dieses Teilbereichs dargestellt; der Achsraster sowie die Stützenfuß- und Stützenkopfpunkte sind bereits sichtbar. Folgende Abbildung zeigt die in diesem Schritt erstellten Geometrien beispielhaft für eine Halle mit 72m x 42m.

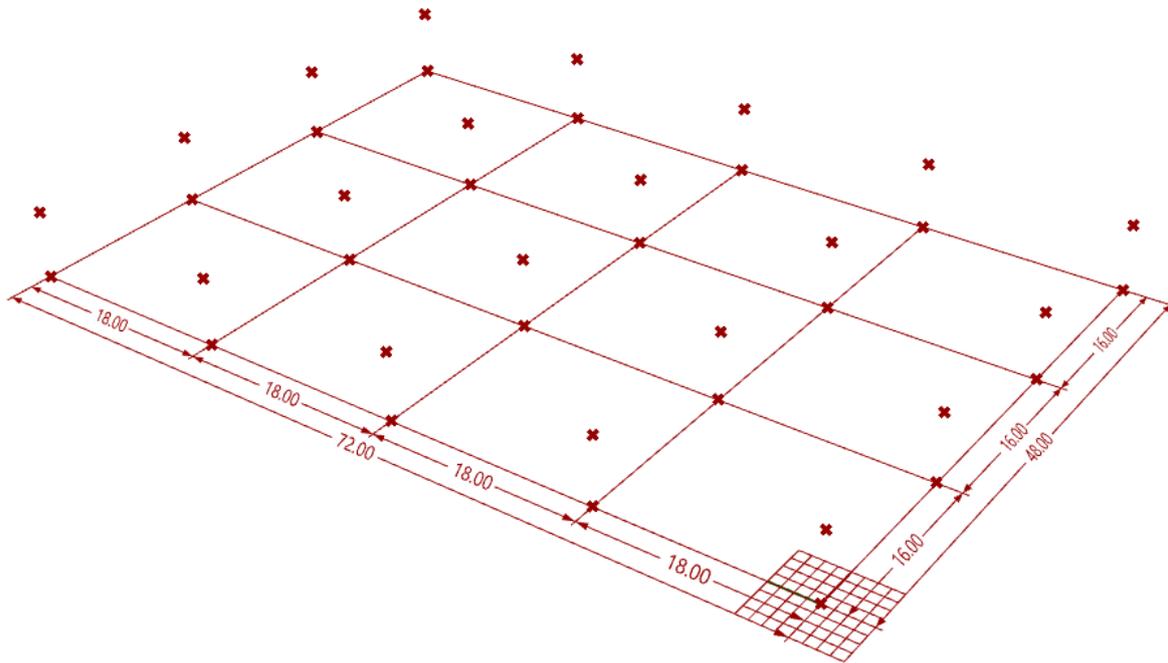


Abbildung 6.3: Achsraster, Stützenfuß- und Stützenkopfpunkte des parametrischen Tragwerksmodells

Im Anschluss wird die Erstellung der einzelnen Lastfälle im Grasshopper Plugin Karamba3D erklärt. Der grundlegende Aufbau der Erstellung der einzelnen Lastfälle ist hierbei immer gleich. Es kommt die Komponente „Loads“ von Karamba3D zum Einsatz. Hierbei müssen folgende Eingangsgrößen definiert werden:

- Wirkungsrichtung der Last als Vektor. Die Länge des Vektors gibt die Größe der Last in  $\text{kN/m}^2$  an. Werden hier mehrere Lasten als Liste eingegeben, können diese verschiedenen Lastfällen zugeordnet werden.
- Für Mesh Loads (=Flächenlasten) wird deren Wirkungsfläche anhand einer Mesh-Geometrie eingegeben. Wichtig ist hierbei darauf zu achten, dass die Mesh-Geometrie eine ausreichend feine Netzstruktur aufweist, da sonst die Aufteilung der Last auf die darunterliegende Tragkonstruktion ungenau ausfällt. Im vorliegenden Fall wurde eine Netzfeinheit von 50 Teilungen in u- und v-Richtung der Mesh gewählt.
- Der Zuordnungscode (Element ID) jener Elemente, auf welche die Last aufgebracht werden soll (z.B. Sekundäre Tragkonstruktion für die Lasten aus der Dachkonstruktion). Die Elemente ID's werden im nächsten Teilbereich näher erläutert.
- Die Lastkombination, zu welcher die zuvor eingegebenen Lastvektoren zugeordnet werden.

- **Gravity**

Das Eigengewicht wirkt mit Faktor 1,0 in negative z-Richtung. Die berücksichtigten Eigengewichte werden aus den definierten Materialien und Querschnitten errechnet.

- **Roof Structure (Dachaufbau)**

Das Eigengewicht des berücksichtigten Dachaufbaus in  $\text{kN/m}^2$  wird als Mesh-Load auf die definierten Tragwerkselemente aufgebracht (wenn nicht anders definiert wird die Last in allen

Lastfällen auf die Sekundärkonstruktion aufgebracht). Die zugrundeliegende Mesh wird auf Basis des Achsraster definiert; in folgender Abbildung ist diese ersichtlich.

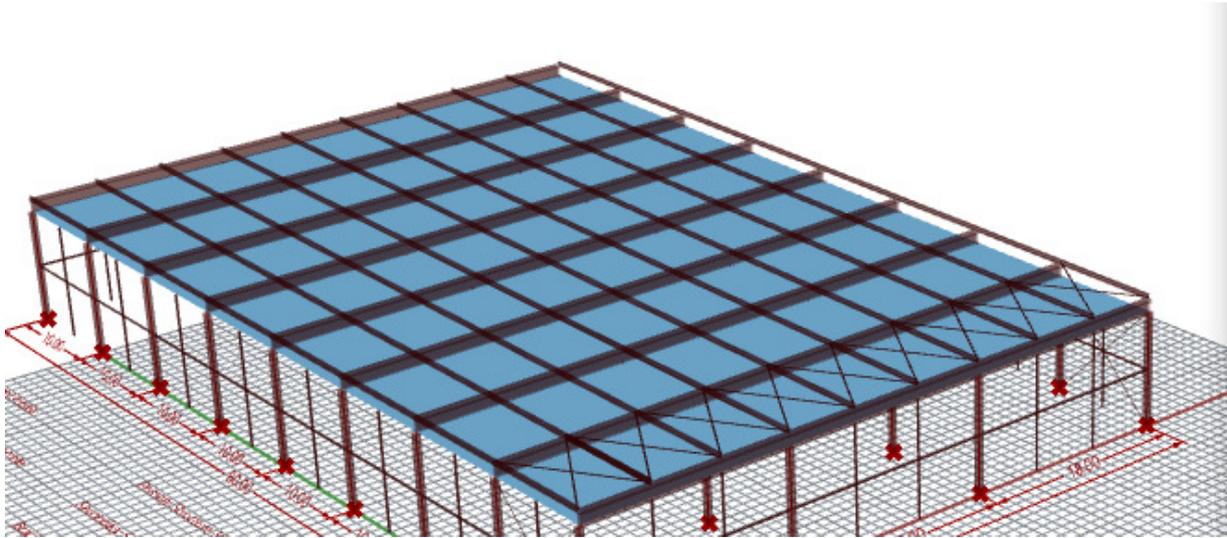


Abbildung 6.4: Mesh zur Erstellung der Dachlast, zugehörige Sektion im PARAT

- **Live Load (abgehängte Nutzlast aus Produktionsplanung)**

Die abgehängte Nutzlast wird auf Basis des zuvor eingegebenen Groblayouts definiert. Wichtig ist hierbei, wie bereits zuvor erwähnt, dass die Reihenfolge der Mesh-Liste mit jener der Last-Liste übereinstimmt.

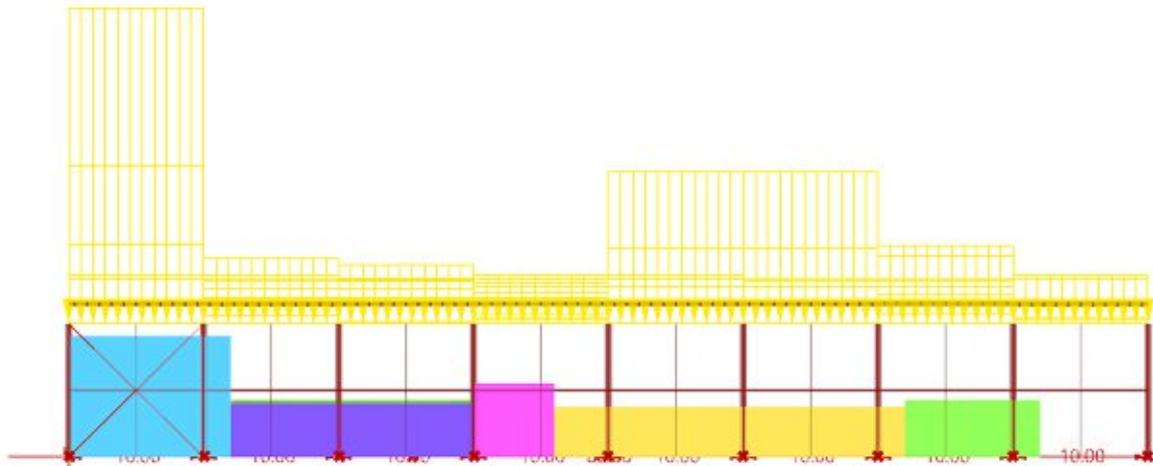


Abbildung 6.5: Nutzungsbereiche und daraus resultierende Abhängelast – die unterschiedlichen Lasten i.A. der Nutzungsbereiche sind klar erkennbar

Die zu berücksichtigende Lastreserve „Retrofitting Load Structure“ wird ebenfalls diesem Lastfall zugeordnet.

- **Snow Load (Schneelast)**

Die Schneelast wird analog zur Dachlast auf die Mesh der Dachebene aufgebracht. Verwehungen im Attikabereich werden zum aktuellen Zeitpunkt nicht berücksichtigt.

- **Wind X/Y**

Die Windlasten dienen der Plausibilisierung des Aussteifungssystems und der korrekten Dimensionierung der aussteifenden Tragwerkelemente (Stützen und/oder Verbände). Um den Lastabtrag einfach und transparent zu halten, werden diese Windlasten als Einzellasten auf den

Stützenkopf, bzw. -Fuß aufgebracht. Die Generierung der Windlasten erfolgt nicht entsprechend der Normaufteilung, und es werden keine Lasten auf die Dachebene berechnet.

Der Winddruck wird in  $\text{kN/m}^2$  aus der Eingabe übernommen; der Windsog wird vereinfachend mit dem halben Winddruck angenommen. Wichtig ist die Eingabe der „Hall height for Windload“. Diese muss manuell in Abhängigkeit der maximalen Gebäudehöhe abgeschätzt und eingegeben werden. Dies ist erforderlich, da eine automatische Berücksichtigung der Hallenhöhe nicht möglich ist, da ein Zirkelbezug innerhalb der statischen Dimensionierung vorliegen würde.

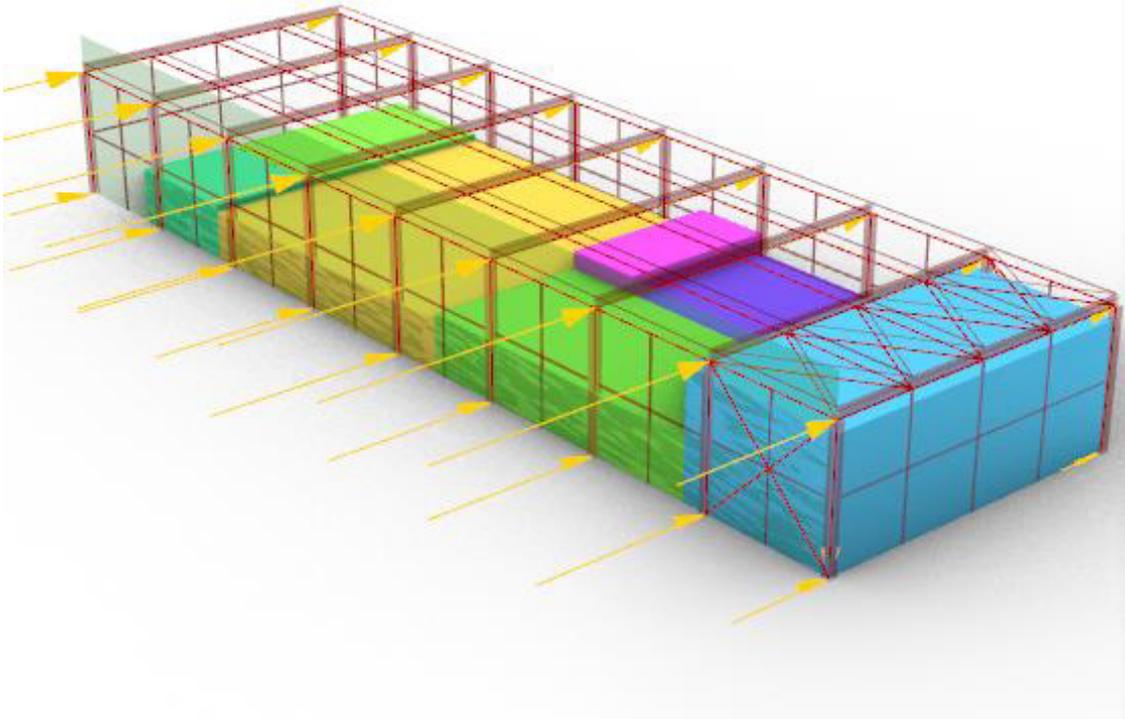


Abbildung 6.6: Die zugrundeliegende Mesh ist farblich hervorgehoben – Die Lastgenerierung erfolgt auf Basis der Stützenkopf- und -fußpunkte der jeweils äußersten Stützenreihen (Auswahl mittels „Tree Branch“-Komponente in Grasshopper.)

- **Lastkombinationen**

Die Generierung der Lastkombinationen erfolgt mittels der Definition eines Faktors, welcher jedem Lastfall einen Faktor in der jeweiligen Lastkombination zuweist. Beispielhaft ist dies für den Lastfall „Gravity“, hier gezeigt, die 1,0 für jede Lastkombination 0-6 beschreibt, sodass dieser Lastfall in jeder Lastkombination mit dem Faktor 1,0 berücksichtigt wird.

Sollte es erforderlich sein, andere Lastfaktoren zu definieren, z.B. für eine Untersuchung im GZT, können an dieser Stelle auch die definierten Norm-Faktoren berücksichtigt werden.

Die Gelenksdefinition zwischen den einzelnen Elementen der Tragkonstruktion erfolgt ebenfalls in diesem Abschnitt. Hierfür wird die „Joints“-Komponente von Karamba3D verwendet, mittels welcher sowohl Translations- als auch Rotationsfreiheitsgrade zwischen einzelnen Tragwerkselementen eingegeben werden können.

Folgende Gelenksbedingungen werden für das Tragwerksmodell definiert (Koordinatensystem entsprechend der lokalen Stabachse der jeweiligen Elemente):

- Sekundärsystem
  - o Gelenkig um die lokale y- und z-Achse auf Primärsystem sowie Stützen gelagert
  - o Keine Durchlaufwirkung bei Auflagerung auf Primärträger
- Primärsystem
  - o Gelenkig um lokale y- und z-Achse auf Stützen gelagert
  - o Durchlaufwirkung bei Auflagerung auf Stützen
  - o Im Falle Fachwerk, Unter- und Obergurt durchlaufend, Fachwerkdigonalen und -pfosten gelenkig um lokale y- und z- Achse
  - o Im Falle Fachwerk keine Durchlaufwirkung bei Auflagerung auf Stützen
- Stützen
  - o Lagerung in Abhängigkeit des Aussteifungssystems
- Aussteifende Verbände in Dach- und Wandebene
  - o Modellierung als Seilstab ohne Berücksichtigung der Biegesteifigkeit; dadurch keine Gelenksbedingung erforderlich.

Untenstehende Abbildung zeigt die formulierten Gelenksbedingungen im Falle einer Tragwerksstruktur aus Profilträgern. Diese sind als Kreise um die jeweilige lokale Achse des Elements dargestellt. Zusätzlich zeigt die Abbildung die Biegemomentenverläufe  $M_y$  unter Eigengewicht. Die korrekte Umsetzung der Gelenksbedingungen bei der statischen Berechnung kann somit plausibilisiert werden.

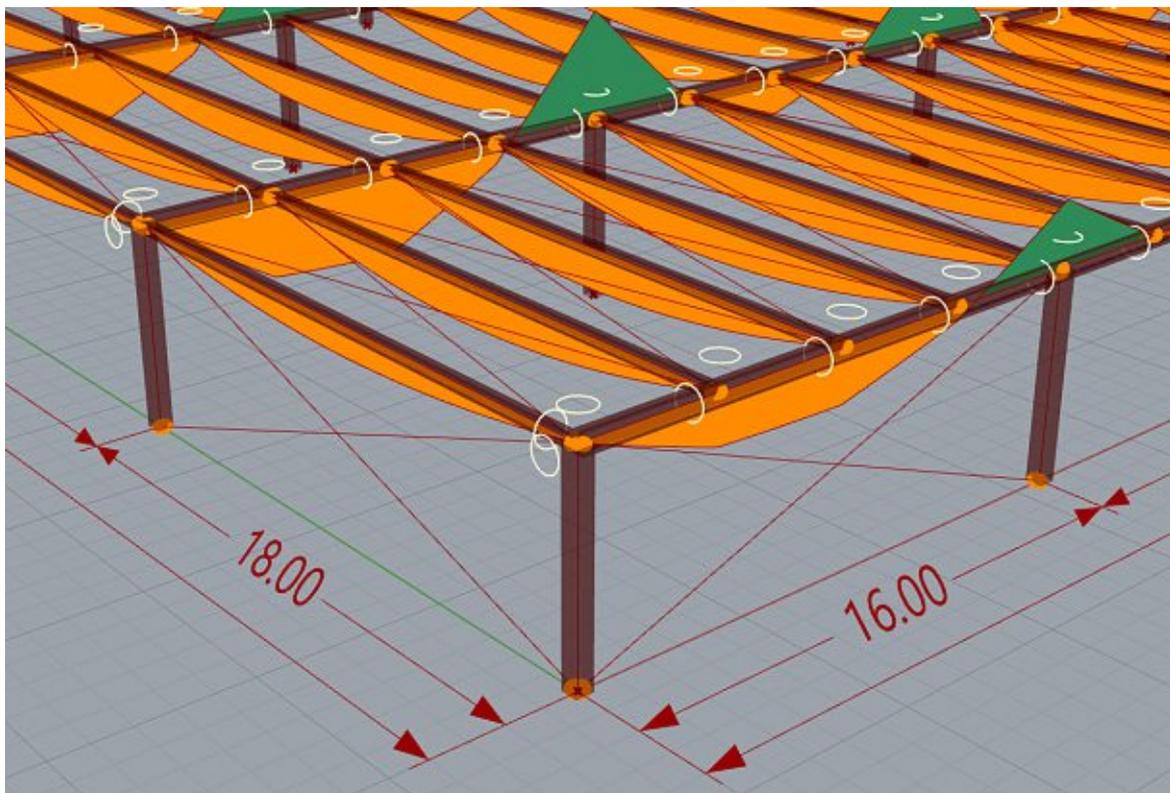


Abbildung 6.7: Formulierten Gelenksbedingungen im Falle einer Tragwerksstruktur aus Profilträgern (als Kreise um die lokale Trägerachse dargestellt) – die Momentenverläufe  $M_y$  unter Eigengewicht zeigen die korrekte Umsetzung der Gelenksbedingungen in der statischen Berechnung

## 6.5 Definition Strukturelemente – „Element Definition“

Der Aufbau der einzelnen Elemente des Schrittes „Element Definition“ ist grundsätzlich immer gleich:

- 1) Sammlung aller relevanten Inputs, welche Einfluss auf das spezifische Element haben
- 2) Generierung des analytischen Modells, welches die Basislinien der Tragwerkselemente für die statische Berechnung darstellt. In Abhängigkeit des Strukturtyps weisen die analytischen Modelle Unterschiede auf (vgl. Fachwerk – Profilträger). Hierdurch ist es erforderlich, unterschiedliche Programmierungspfade in Abhängigkeit des gewählten Strukturtyps zu wählen. Dies geschieht unter Verwendung von sogenannten „Stream Gate“-Komponenten, welche den Informationsfluss innerhalb des PARAT lenken
- 3) Generierung der Tragwerkselemente in Abhängigkeit des gewählten Materials und Strukturtyps
- 4) Abschließende Sammlung der generierten Elemente zur weiteren Verwendung

Im Anschluss werden die einzelnen Elemente erläutert.

- **Elemente für die statische Berechnung**

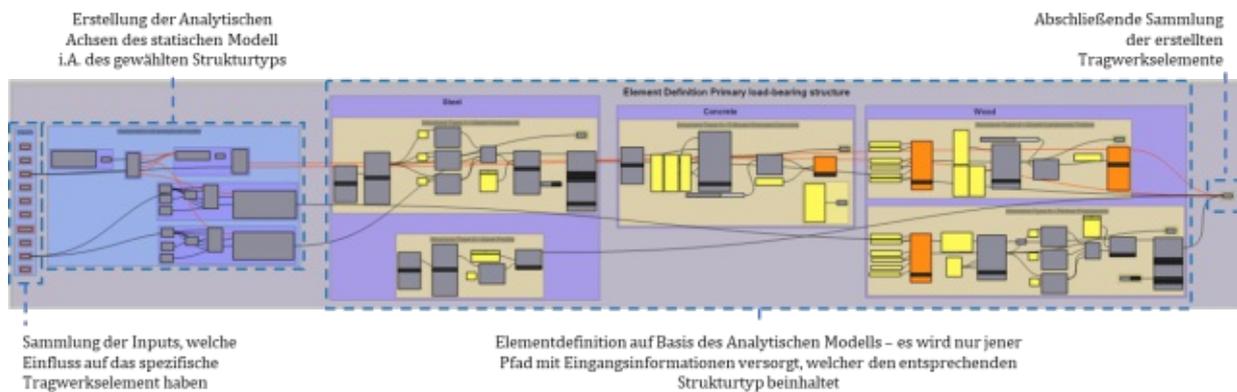


Abbildung 6.8: Übersicht über die Erstellung der Strukturelemente Primärsystem; die anderen Strukturelemente werden sinngemäß nach dem gleichen Schema erstellt

Anschließende Abbildung zeigt beispielhaft den Schritt der Erstellung der Primärträger für den Strukturtyp „Stahlprofil“.

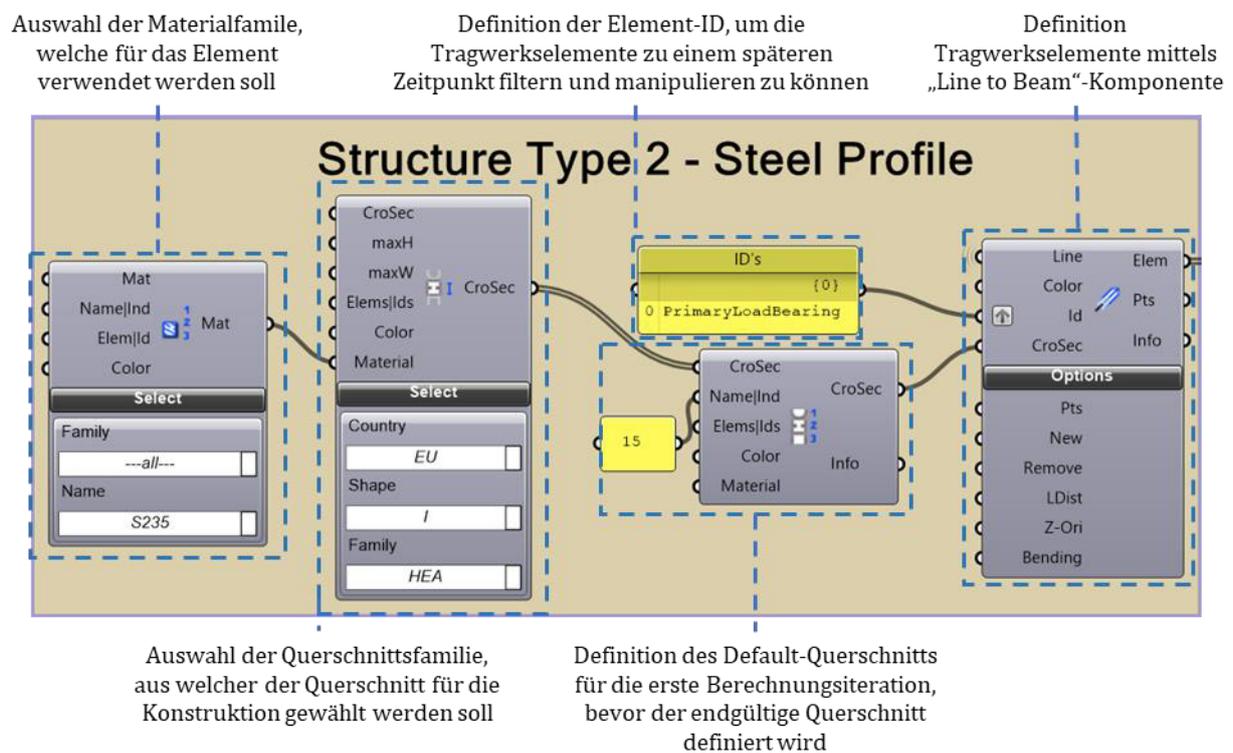


Abbildung 6.9: Generierung eines Elements am Beispiel des Strukturtyps Stahlprofil des Primärsystems

Nach diesem Schema werden Strukturelemente des Tragwerksmodells definiert:

- Primärsystem
- Sekundärsystem
- Stützen
- Aussteifung in Dachebene
- Aussteifung in Wandebene

Die Materialgruppen Stahl und Stahlbeton sind bereits umfangreich in der Datenbank der Software Karamba3D enthalten. Brettschichtholz ist allerdings bislang nicht enthalten, wodurch das Material neu angelegt werden musste. Für die durchgeführte Vorbemessung wird die Orthotropie des Brettschichtholzes nicht berücksichtigt, da die Vorbemessung rein spannungsbaasiert mittels eines Biegenachweises geführt wird. Folgende Materialkennwerte werden berücksichtigt (entnommen aus Datenblatt Brettschichtholz auf dataholz.eu, Quelle Holzforschung Austria, Stand 1.6.2018):

Tabelle 6.1: Berücksichtigte Materialkennwerte für BSH-Elemente

Kennwert	BSH GL24h		BSH GL28h	
	Größe	Einheit	Größe	Einheit
E-Modul $E$	1150	kN/cm <sup>2</sup>	1260	kN/cm <sup>2</sup>
Schubmodul $G_{12}, G_{33}$	65	kN/cm <sup>2</sup>	65	kN/cm <sup>2</sup>
Biegefestigkeit $f_{m,g,k}$	2,4	kN/cm <sup>2</sup>	2,8	kN/cm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit $f_{t,0,g,k}$	1,92	kN/cm <sup>2</sup>	2,23	kN/cm <sup>2</sup>
Spez. Wichte $\gamma$	420	kg/m <sup>3</sup>	460	kg/m <sup>3</sup>

Die Berechnung der für die Bemessung resultierenden Biegefestigkeit wird im Zuge der Materialdefinition durchgeführt. Hierfür wird, entsprechend EN1995 Tabelle 3.1, eine mittlere Lasteinwirkungsdauer sowie die Nutzungsklasse 1 definiert. Dies führt zu einer Modifizierungsbeiwert von  $k_{mod}=0,80$ . Die resultierende Biegefestigkeit ergibt sich somit aus:

$$f_{m,g,d} = \frac{k_{mod} * f_{m,g,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 * f_{m,g,k}}{1,3} \quad (1)$$

- **Fundierung**

Die Fundierung der Stützen wird momentan nicht in die statische Berechnung integriert oder i.A. von dieser dimensioniert, da keine Informationen über den Baugrund in das PARAT eingegeben werden. Aufgrund dieser fehlenden Informationsbasis werden die im Modell vorhandenen Einzelfundamente auch nicht in die Kostenberechnung integriert. Sie dienen rein der optischen Darstellung der Gesamtstruktur.

- **Fassadenunterkonstruktion**

Die Fassadenunterkonstruktion ist nicht Teil der statischen Berechnung und dient nur der Veranschaulichung der ungefähren Stahlmasse, welche für eine Fassadenunterkonstruktion i.A. der Spannweite benötigt wird. Im Standardfall wird die Fassadenkonstruktion für alle vier Gebäudeseiten modelliert. Allerdings kann die Konstruktion auch für einzelne Gebäudeseiten deaktiviert werden, um das Szenario zu simulieren, dass das Hallentragwerk beispielsweise an eine bestehende Konstruktion angebaut wird. Der Raster der Fassadenunterkonstruktion beträgt im Standardfall 6,0m x 6,0m, kann allerdings ebenfalls angepasst werden, wie in untenstehender Abbildung 6.10 ersichtlich.

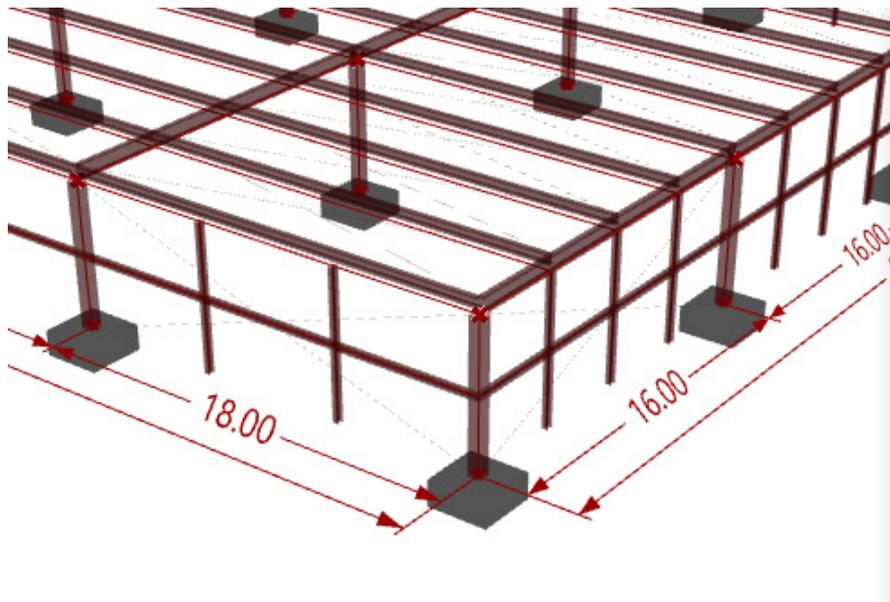


Abbildung 6.10: Anpassung des Fassadenrasters auf beliebige Werte ist möglich, das Standardmaß beträgt 6,0m x 6,0m

## 6.6 Statische Analyse Struktur – „Statical Analysation“

Die statische Berechnung und Vordimensionierung der Teilelemente erfolgt entsprechend des Lastabtrags in folgender Reihenfolge:

- 1) Sammlung der Eingangsgrößen
- 2) „Assembling“ des Modells
- 3) Dimensionierung Aussteifungselemente
- 4) Dimensionierung Sekundärsystem
- 5) Dimensionierung Primärsystem
- 6) Dimensionierung Stützen
- 7) Abschließende Berechnung und Möglichkeit der Darstellung der Ergebnisse

Diese Vorgangsweise ist notwendig, da sich die Querschnittsdimensionen der einzelnen Tragwerkelemente wechselseitig beeinflussen. Zusätzlich kommen verschiedene Materialien und Strukturtypen zum Einsatz (Fachwerk/Träger, Holz/Stahlbeton/Stahl), für welche jeweils unterschiedliche Dimensionierungsstrategien gewählt werden müssen. Dies bedingt, dass vor einem jeden Dimensionierungsschritt mittels einer „Stream Gate“-Komponente der zu dem Strukturtyp zugehörige Berechnungspfad gewählt wird. Der Berechnungsablauf und eine Beschreibung der einzelnen Schritte sind in nachstehender Abbildung ersichtlich.

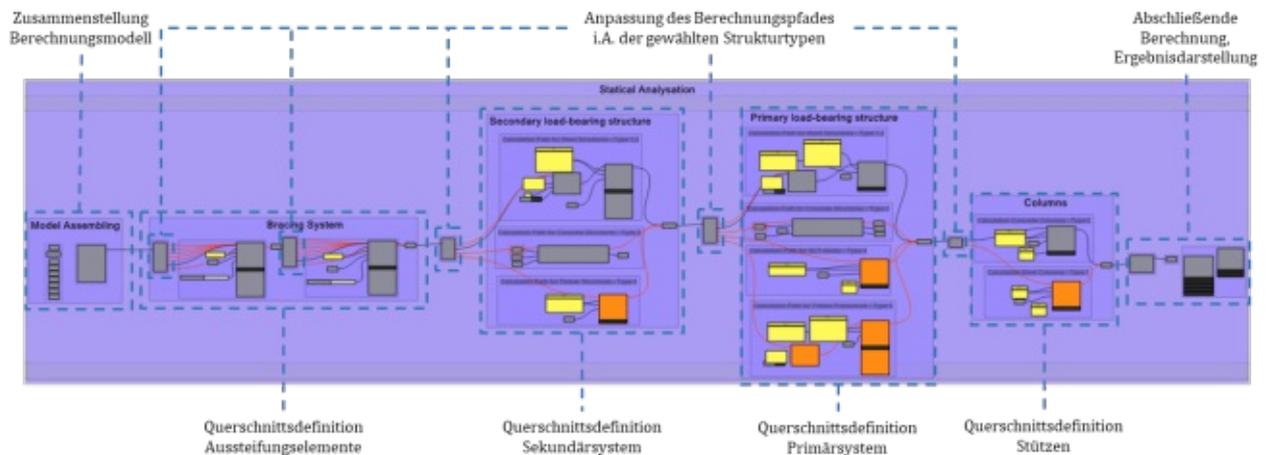


Abbildung 6.11: Berechnungsablauf dargestellt im Grasshopper GUI

- **Vorbemessung von Stahlelementen**

Die Dimensionierung der Stahl- und Brettschichtholzelemente erfolgt unter Verwendung der „OptimizeCrossSection“ – Komponente von Karamba3D, welche eine spannungsbasierte Bemessung des Querschnitts durchführt. Die Berechnungsgrundlage für diese Komponente ist die EN 1993-1-1, wobei für die Definition der Interaktionsbeiwerte der Anhang B zum Einsatz kommt. Die zugrundeliegende Stabtheorie ist die Stabtheorie zweiter Ordnung. Für Stahlstützen kommt ebenfalls dieser Algorithmus zum Einsatz. Da Stützen allerdings knickgefährdete Bauteile darstellen, führt die rein spannungsbasierte Bemessung oftmals zu unrealistisch kleinen Querschnittsdimensionen. Dieser Umstand wird berücksichtigt, indem der Berechnungsalgorithmus mittels eines zusätzlichen Materialsicherheitsfaktors von  $\gamma_{M,1}=2,0$  angepasst wird. Mehrere Testläufe und die in der Variantenstudie durchgeführte Vergleichsberechnung haben gezeigt, dass so realistische Vorbemessungsergebnisse erzielt werden können.

- **Vorbemessung von Brettschichtholzelementen**

Bei der Bemessung der Primär- und Sekundärsysteme herrscht der Zustand vor, dass immer eine maßgebende Schnittgröße existiert, welche die Bemessung bestimmt. Im Falle von Profilträgern ist dies das Biegemoment; im Falle von Fachwerkssystemen sind es die vorherrschenden Normalkräfte. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen führt eine rein spannungsbasierte Vorbemessung auch für Brettschichtholzelemente zu plausiblen Vorbemessungsergebnissen. Aus diesem Grund wird auch für Brettschichtholzelemente die „OptimizeCrossSection“-Komponente verwendet. Diese Vorgangsweise kann natürlich nicht den Anspruch an eine genaue Dimensionierung leisten. Eine mögliche Verfälschung ist der Umstand, dass Karamba3D pro definiertes Material nur die Eingabe einer Grenzspannung ermöglicht (in Anlehnung an die Materialeigenschaften von Stahl). Brettschichtholz weist allerdings für unterschiedliche Belastungsarten unterschiedliche Festigkeiten auf. So ist zum Beispiel die reine Zugfestigkeit geringer als die Biegefestigkeit. Aus diesem Grund wird die in Karamba3D definierte Grenzspannung des Materials Brettschichtholz in Abhängigkeit des gewählten Strukturtyps angepasst. So wird für Fachwerkstrukturen nur die reduzierte Zugspannung als Grenzspannung berücksichtigt, da in diesen Systemen auch rein zugbelastete Elemente vorkommen. Diese Vorgangsweise stellt einen ingenieurmäßigen Ansatz auf der sicheren Seite dar.

- **Vorbemessung von Stahlbeton-Biegeträgern**

Für Stahlbeton- Biegeträger würde die Verwendung der „OptimizeCrossSection“-Komponente keine plausiblen Ergebnisse erzielen, da auch für rein biegebeanspruchte Stahlbetonbauteile die Reduktion auf einen reinen Spannungsnachweis auf Querschnittsebene nicht möglich ist. Des-

halb wird für diese ein eigenes Vordimensionierungskonzept entwickelt und in Grasshopper implementiert. Das Konzept sieht vor, dass auf Basis des Tragmoments der verschiedenen Stahlbeton-Querschnitte eine iterative Bemessung durchgeführt wird. Insgesamt wird in vier Iterationen der passende Querschnitt entsprechend seines Tragmoments gewählt. Da bei der Berechnung des T-Trägers keine konstruktiven Randbedingungen überprüft werden können (Bewehrungsverlegung in Steg, daraus resultierend Anpassung des inneren Hebelarmes, Überprüfung Druckzone in Flansch), wird bei der Berechnung der Tragmomente von einem reinen Rechteckquerschnitt mit durchlaufender Stegbreite ausgegangen. Dies stellt eine Vereinfachung auf der sicheren Seite dar. Die Berechnung der Tragmomente erfolgt unter Berücksichtigung einer Bewehrungsfläche, welche der 10-fachen Mindestbewehrung entspricht und einer Betongüte lt. Modellierungsraum von C50/60. Die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Querschnitte sind in den untenstehenden Abbildungen ersichtlich. Die Bemessung erfolgte unter Anwendung der EN1992-1-1.

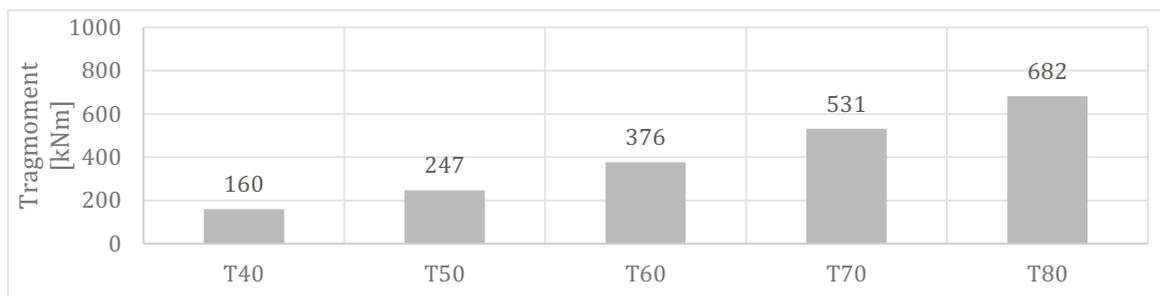


Abbildung 6.12: Berechnete Tragmomente der FT-T-Trägerquerschnitte des Sekundärsystems

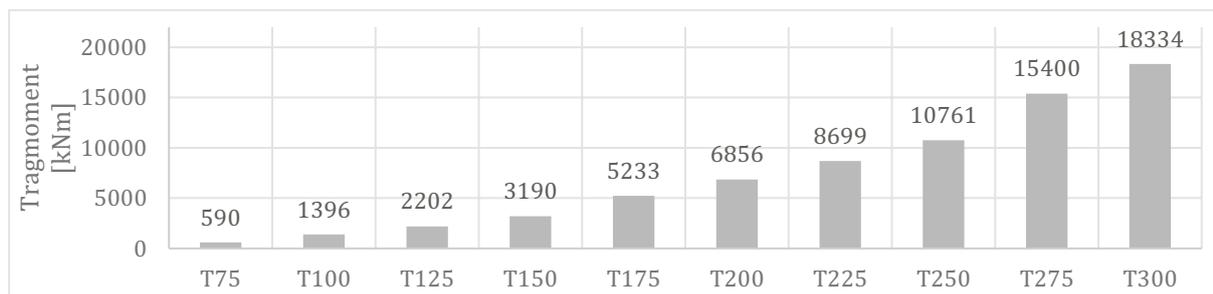


Abbildung 6.13: Berechnete Tragmomente der FT-T-Trägerquerschnitte des Sekundärsystems

In einer Nachlaufberechnung wird zusätzlich die Durchbiegung überprüft, welche auf Basis einer Berechnung nach Theorie erster Ordnung kalkuliert wird. Sollte die Durchbiegung zu hoch sein, wird bereits in diesem Dimensionierungsschritt die Querschnittsabmessung angepasst.

Nachdem die Querschnittsdimensionierung aller Strukturelemente abgeschlossen ist, wird eine finale Modellberechnung nach Theorie erster Ordnung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnung können im Anschluss visualisiert werden.

- **Vorbemessung von Stahlbeton-Stützen**

Für die Bemessung von Stahlbeton-Stützen wurde kein eigener Berechnungsalgorithmus entwickelt. Es kommt dieselbe Vorgehensweise wie für Stahlstützen zum Einsatz, und auch hier haben mehrere Testläufe und die in der Variantenstudie durchgeführte Vergleichsberechnung gezeigt, dass realistische Vorbemessungsergebnisse erreicht werden können.

Wie bereits zuvor beschrieben wird die Tragwerksberechnung für eine charakteristische Bemessungssituation durchgeführt. Zur Gewährleistung einer plausiblen Dimensionierung wird ein maximaler Ausnutzungsgrad für die einzelnen Tragwerkelemente von 70% definiert. Dies gewährleistet in der Regel eine plausible Vordimensionierung und verhindert eine Unterdimensionierung für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

## 6.7 Nachbearbeitung – „Post-Processing“

In diesem Teilbereich werden die Ergebnisse der statischen Berechnung aus dem analysierten Modell gesammelt.

Dazu gehören:

- der mittlere und maximale Ausnutzungsgrad der Tragwerkselemente
- die maximale Durchbiegung
- die berechnete, erforderliche Schalungsfläche von Stahlbetonelementen als Grundlage für die Kostenberechnung

Das analytische Berechnungsmodell wird angepasst, damit die Lage der einzelnen Strukturelemente realitätsnäher ist und der tatsächliche Höhenbedarf der Tragkonstruktion ermittelt werden kann. Der Nomenklatur verschiedener BIM-Authoring Softwares folgend wird das daraus resultierende Modell „physisches Modell“ genannt. Die Anpassung betrifft das Primärsystem, das Sekundärsystem und das Aussteifungssystem in der Dachebene.

In der folgenden Abbildung ist der Unterschied zwischen analytischem und physischem Modell ersichtlich. Das analytische Modell ist in grün hervorgehoben. Hier befinden sich die Stabachsen des Dachtragwerks in einer Ebene und bilden einen Schnittpunkt mit den Stützenachsen. Zunächst wird die Höhenlage der Primärträger so angepasst, dass diese auf den Stützenköpfen liegen und somit der erforderliche Lichtraum eingehalten wird. Des Weiteren werden die Sekundärträger im Standardfall so verschoben, dass diese auf den Primärträgern zum Liegen kommen. Diese Einstellung kann allerdings angepasst werden, sodass das Sekundärsystem in einer Ebene mit dem Primärsystem liegt.

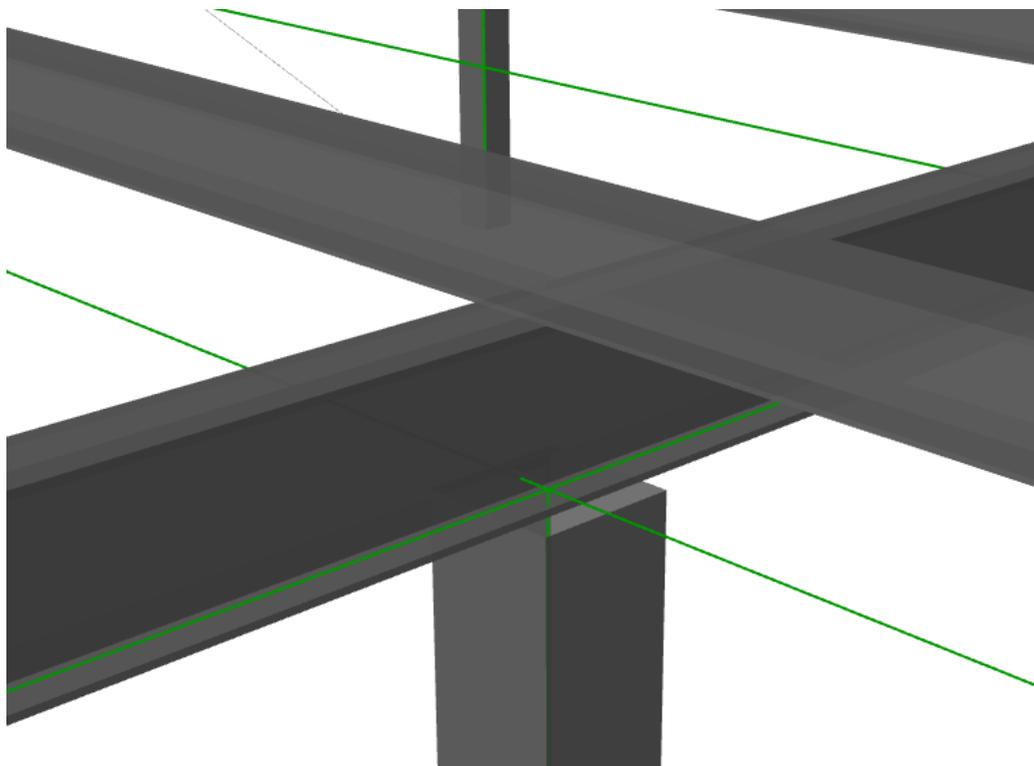


Abbildung 6.14: Analytisches Berechnungsmodell in grün, physisches Modell inkl. der Querschnitte der Primär- und Sekundärträger in grau.

## 6.8 Ergebnisse und Kostenberechnung – „Results & Manufacturing Costs“

Der Bereich Ergebnisse dient der Sammlung, Weiterverarbeitung sowie Darstellung der Bemessungsergebnisse. Die hier gesammelten Werte bilden auch die Grundlage für die Berechnung der Fitness-Function. Auf Basis der in Kapitel 1.7 definierten Kostenkennwerte wird eine Grobkostenberechnung der Tragwerkselemente exkl. Fundierung durchgeführt. Diese Grobkostenberechnung dient einzig dem Zweck des Vergleichs verschiedener Vorentwurfsvarianten und hat anderweitig keine Aussagekraft.

## 6.9 Berechnung Bewertungsfunktion – „Calculation Fitness Function“

In diesem abschließenden Schritt erfolgt die Bewertung der Vorentwurfsvariante mittels der in Kapitel 1.7 definierten Bewertungsfunktion. Dann werden alle den Vorentwurf charakterisierenden Eingangsparameter und Berechnungsergebnisse in einem Ergebnisvektor gespeichert und können abschließend in eine XLS-Datenbank für die Erstellung der Variantenstudie exportiert werden.

Tabelle 6.2: Bestandteile Ergebnisvektor für die Charakterisierung einer Vorentwurfsvariante

Kategorie	Zeile	Beschreibung
Parameter Geometrie	0	Raster Primär [m]
	1	Felder Primär [Stk]
	2	Raster Sekundär [m]
	3	Felder Sekundär [Stk]
Parameter Tragwerk	4	Strukturtyp Primärsystem
	5	Strukturtyp Sekundärsystem
	6	Strukturtyp Stützen
	7	Aussteifungssystem
Ergebnisse Tragwerksberechnung	8	Querschnitt Primärkonstruktion
	9	Querschnitt Sekundärkonstruktion
	10	Querschnitt Stützen
	11	Masse Primärtragwerk [kg]
	12	Masse Sekundärtragwerk [kg]
	13	Columns Mass [kg]
Ergebnisse Bewertungsfunktion	14	Constraints
	15	Objective 1 – Reduktion der Lebenszykluskosten
	16	Objective 4 - Dauerhaftigkeit der Tragstruktur
	17	Objective 5 - Nutzflächenreserve in Gebäude
	18	Objective 6 - Maximierung Nettoraumhöhen
	19	Objective 7 - Reduktion von Stützen und Lastabtragenden Elementen
	<b>20</b>	<b>Bewertungsfunktion</b>

## 7 Proof of Concept – Variantenstudie

Ziel der Variantenstudie ist es, die Arbeitsweise mit dem PARAT anhand einer realen Aufgabenstellung zu testen und zu präsentieren. Folgende Ziele werden formuliert:

- Grundlegende Überprüfung des definierten Workflows
- Test der eingesetzten Berechnungsalgorithmen und Schnittstellen
- Plausibilisierung der Ergebnisse der Fitness-Funktion
- Statische Vergleichsberechnung mittels FE-Software zur Überprüfung der gewählten Querschnitte

### 7.1 Aufgabenstellung

Das gewählte Pilot-Projekt ist eine Produktionsstätte der Nahrungsmittel- und Kosmetikproduktion, welche bereits in der Use-Case Analyse untersucht wurde (Use-Case 2A). Die Produktionshalle weist eine Fläche von 5760m<sup>2</sup> auf.

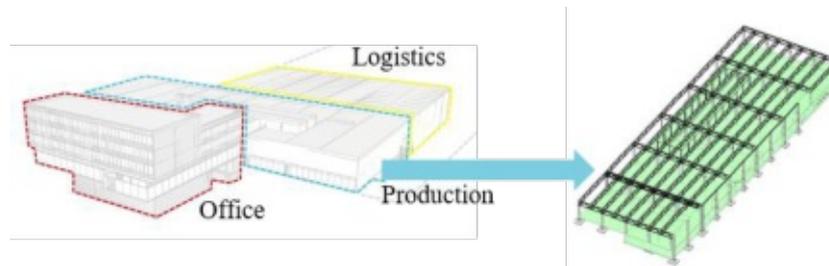


Abbildung 7.1: Der Proof of Concept wird anhand einer Variantenstudie für das Produktionsgebäude 2A der Use-Case Analyse durchgeführt.

Die reale Produktionshalle weist insgesamt eine Dimension von 48m x 120m auf, wobei ein Achsraster von 12m primär und 24m sekundär zum Einsatz kommt. Der Strukturtyp ist sowohl primär als auch sekundär ein Stahlfachwerk mit einer Trägerhöhe von 2,4m. Die Stützen sind Stahlbeton-Fertigteilstützen mit einem Querschnitt von 60/60cm. Für das Aussteifungskonzept kommen keine Verbände zum Einsatz. Sämtliche Horizontalkräfte werden über eingespannte Stützen abgetragen. Da für das vorliegende Produktionsgebäude keine alternativen Nutzungsszenarien vorliegen, wird nur jenes in Betracht gezogen, welches bei diesem Use-Case aktuell in Verwendung ist. Die maximale Gebäudehöhe beträgt für die Produktionshalle 10,3m. Abzüglich des geplanten extensiven Dachaufbaus mit einer Stärke von 40cm ergibt sich somit eine maximale Tragwerks-Oberkante von 9,9m.

Folgende Fragen sollen untersucht werden:

- Welche Strukturtypen und -raster liefern die flexibelsten Hallentragwerke?
- Welche Strukturtypen und -raster liefern das kostengünstigste Hallentragwerk?
- Kann ein Vorentwurf als „Optimum“ angesehen werden?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Baukostenberechnung und der Erfüllung der definierten Objectives?

### 7.2 Workflowdefinition

Zur Lösung der Optimierungsaufgabe wird zunächst der Modellierungsraum auf die vorliegende Problemstellung zugeschnitten. Diese Einschränkung wird aus zwei Gründen getroffen:

- Reduktion der zu untersuchenden Vorentwurfsvarianten für ein rasches Optimierungsergebnis
- Vorauswahl plausibler Raster-Geometrien und Kombinationen

Bei einer vorgegebenen Hallendimension von 48m x 120m werden 9 verschiedene Rasterkombinationen untersucht:

Tabelle 7.1: Untersuchte Rasterkombinationen

Rasterkombinationen									
Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Primärachsraster (x-)	12	12	12	16	16	16	24	24	24
Primärraster Felder	4	4	4	3	3	3	2	2	2
Sekundärachsraster (y-)	6	12	20	6	12	20	6	12	20
Sekundärraster Felder	20	10	6	20	10	6	20	10	6

Für diese 9 Rasterkombinationen werden die folgenden Strukturtyp-Kombinationen untersucht, wobei als Stütztyp immer Stahlbeton Fertigteilstützen zum Einsatz kommen:

Tabelle 7.2: Untersuchte Strukturtyp-Kombination

Abkürzung	C	SF	SP	TG	TF	SM
Strukturtyp Primär	FT-T-Träger	Stahlfachwerk	Stahlprofil	BSH-Träger	BSH-Fachwerk	Stahlfachwerk
Strukturtyp Sekundär	FT-T-Träger	Stahlfachwerk	Stahlprofil	BSH-Träger	BSH-Träger	Stahlprofil

Somit ergibt sich eine vorläufige Anzahl von 54 verschiedenen Vorentwurfsvarianten. Diese werden nun sowohl für das Aussteifungssystem 0 (Eingespannte Stützen) als auch 6 (2 Wand- und Dachverbände in X- und Y-Richtung) untersucht, wobei eine Lastreserve von  $F_{RT}=1,0 \text{ kN/m}^2$  angesetzt wird. Zusätzlich wird die Variante Aussteifungssystem 0 mit einer Lastreserve von  $F_{RT}=0,0 \text{ kN/m}^2$  berechnet. Die insgesamt untersuchte Anzahl an Varianten beläuft sich so auf 164 Vorentwürfe.

Die relative Bewertung der einzelnen Objectives zueinander wird ausgewogen vorgenommen (Wichtung 0,20 pro Objective).

Die Eingabe der Parameter der einzelnen Entwürfe erfolgt direkt in der Grasshopper-GUI. Die Ergebnisse der einzelnen Varianten werden anschließend in einer XLS-Tabelle gesammelt und analysiert.

### 7.3 Optimierungsergebnis

Für eine nähere Untersuchung der Optimierungsergebnisse werden zunächst jene Vorentwürfe gefiltert, bei welchen keine Verletzung der Constraints auftritt. Bei insgesamt 51 Vorentwurfsvarianten werden die Constraints verletzt, wobei in fast allen Fällen die vergleichsweise hohe Sekundärspannweite von 20m zu einer Verletzung der Constraints  $c_1$  oder  $c_2$  führt. Von den somit verbleibenden 113 möglichen Varianten werden die jeweils günstigsten sowie die flexibelsten Rasterkombinationen einer jeden Strukturtyp-Kombination untersucht. Auf der nächsten Seite sind diese 36 Vorentwurfsvarianten dargestellt.

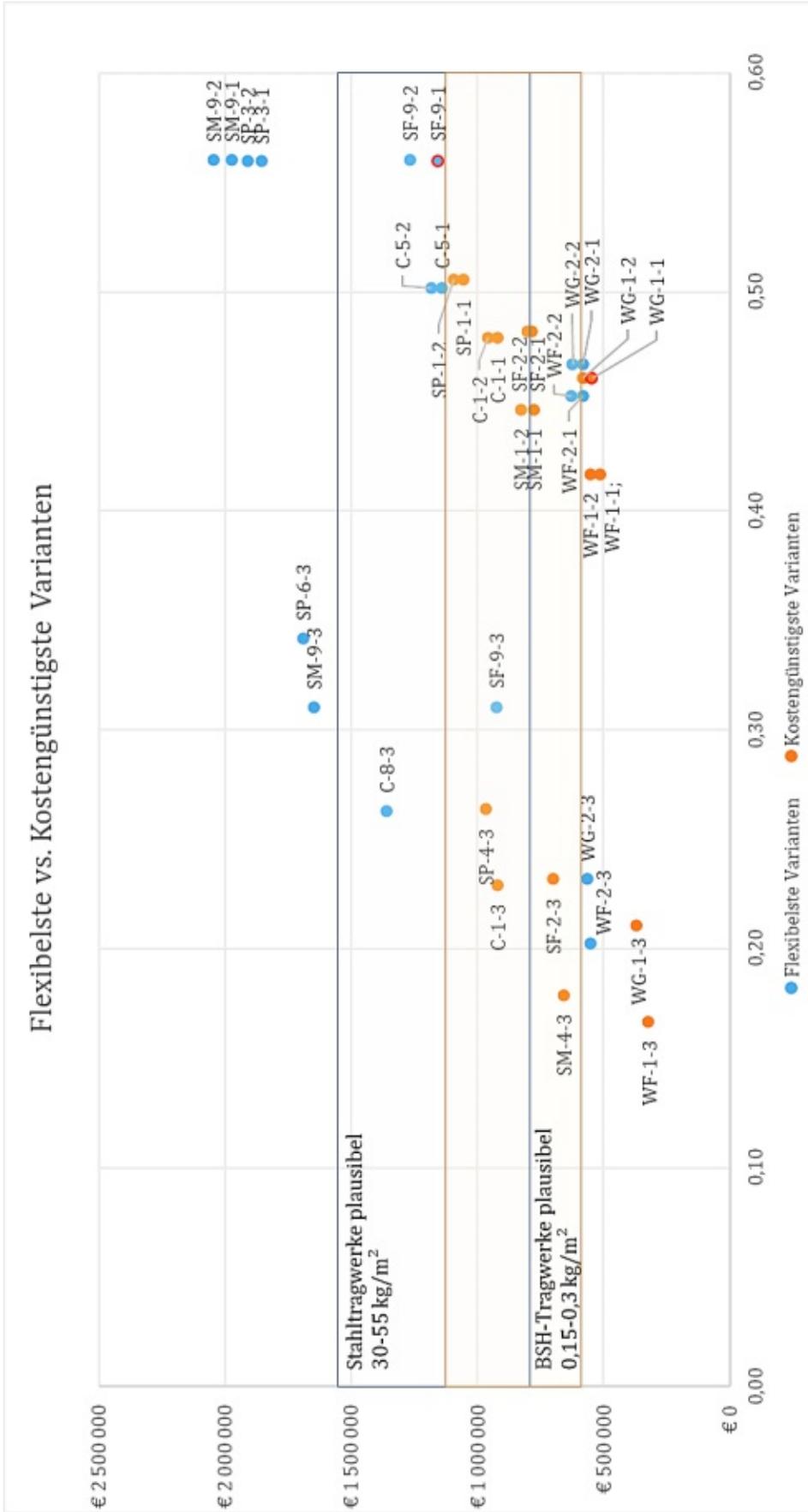


Abbildung 7.2: Die jeweils günstigsten, sowie flexibelsten Rastkombinationen einer jeden Strukturtyp-Kombination

Bei der Betrachtung des Ergebnisraumes sind einige Muster rasch zu erkennen:

- Varianten mit einer Lastreserve von  $F_{RT}=1,0 \text{ kN/m}^2$  weisen ein deutlich besseres Flexibilitätsrating auf (0,464 zu 0,223 im Mittel), wobei die Varianten im Mittel nur um etwa 115 000€ teurer ausfallen.
- Varianten mit Aussteifungssystem 0 (Varianten mit Nummer x.1) und Aussteifungssystem 6 (x.2) weisen nahezu das gleiche Flexibilitätsrating auf, wobei die Varianten mit Aussteifungssystem 6 geringfügig teurer sind (im Mittel ca. 45 000€).

Der Strukturtyp Stahl gemischt (SM) weist eine hohe Flexibilität auf (mittleres Rating  $>0,50$ ), birgt allerdings auch die höchsten Kosten. Der Strukturtyp Stahlfachwerk (SF) hingegen kann mit einer ähnlich hohen Flexibilität bei deutlich geringeren Kosten punkten. Die geringsten Kosten bei einer respektablen Flexibilität weisen die BSH-Trägersysteme (TG) auf. Betonkonstruktionen (C) bewegen sich im Mittelfeld und bieten einen guten Trade-Off zwischen Flexibilität und Kosten. In der folgenden Abbildung ist eine 3D-Visualisierung der flexibelsten (SF 9-1) und der günstigsten (TG 1-1) Variante ersichtlich.

### Stahlfachwerk SF 9-1

### BSH-Träger TG 1-1

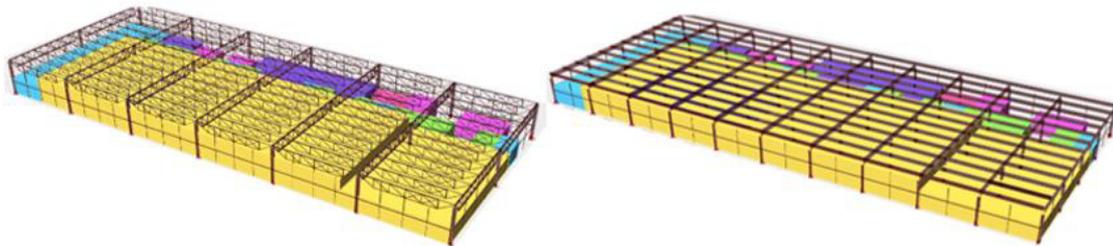


Abbildung 7.3: 3D-Visualisierung flexibelster (SF 9-1) und kostengünstigster (TG 1-1) Vorentwurf

Im Anschluss sind die jeweils flexibelsten Vorentwürfe der Varianten mit Lastreserve  $F_{RT}=1,0 \text{ kN/m}^2$  und Aussteifungssystem 0 tabellarisch dargestellt.

Tabelle 7.3: Die flexibelsten Vorentwürfe der Variante  $F_{RT}=1,0 \text{ kN/m}^2$  und Aussteifungssystem 0

Flexibelste Varianten ( $A=120 \times 48 \text{ m} = 5760 \text{ m}^2$ , $F_{RF} = 1,0 \text{ kN/m}^2$ , Aussteifungssystem 0)						
Strukturtypen	C	SF	SP	TG	TF	SM
Flexibelster Vorentwurf	C 5-1	SF 9-1	SP 3-1	TG 2-1	TF 2-1	SM 9-1
Primärachsraster (x-)	16	24	12	12	12	24
Primärraster Felder	3	2	4	4	4	2
Sekundärachsraster (y-)	12	20	20	12	12	20
Sekundärraster Felder	10	6	6	10	10	6
Nettokosten in Tausend €	€ 1 140 k	€ 1 157 k	€ 1 856 k	€ 583 k	€ 584 k	€ 1 974 k
o <sub>4</sub> - Dauerhaftigkeit der Tragstruktur	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
o <sub>5</sub> - Nutzflächenreserve in Gebäude	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
o <sub>6</sub> - Maximierung Netto-raumhöhen	0,63	0,29	0,77	0,59	0,53	0,29
o <sub>7</sub> - Reduktion von Stützen und Lastabtragenden Elementen	0,24	0,81	0,33	0,14	0,14	0,81

## 7.4 Interpretation

### 7.4.1 Plausibilisierung auftretenden Rohbaukosten und Streuungsbereiche

Grundsätzlich weisen die verschiedenen Entwurfsvarianten einen hohen Streuungsgrad hinsichtlich der zu erwartenden Baukosten auf, wie in Abbildung 7.2 ersichtlich. Dies ist auf mehrere Gründe zurückzuführen:

- Es ist zu erwähnen, dass ein hoher Streuungsgrad der geschätzten Rohbaukosten aufgrund der Methodik der Variantenstudie zu erwarten ist, da Tragwerke mit sehr unterschiedlichen Primär- und Sekundärspannweiten miteinander verglichen werden. (Rasterkombination 1 - 12m x 6m, Rasterkombination 2 - 24m x 20m)
- Tendenziell sind die Holzdachtragwerke zu günstig und weisen mit einem mittleren Materialverbrauch von ca.  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$  einen unterdurchschnittlichen Materialverbrauch verglichen mit einem branchenüblichen Materialverbrauch von etwa  $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$  auf. Die Bemessung der Holztragwerke muss somit nochmals untersucht werden – ein Teilaspekt ist höchstwahrscheinlich die Bemessung der primären BSH-Träger als Durchlaufsystem (Variante WG-1-1), sowie der Einsatz von BSH-Fachwerken bei unrealistisch geringen Spannweiten (WF-1-1)
- Die Stahldachtragwerke weisen in der Regel einen plausiblen Materialverbrauch von in etwa  $30\text{-}55 \text{ kg}/\text{m}^2$  auf. Einzig jene Rasterkombinationen mit 20m Sekundärspannweite (3, 6, 9) in Kombination mit Profil-Stahlträgern in Sekundärachse führen zu sehr massiven Querschnitten bis zu HEA800, welche nicht praxistauglich sind und eine sehr hohe Masse aufweisen.

Aufgrund dieses hohen beobachteten Streuungsbereichs wird ersichtlich, dass in einzelnen Teilbereichen der Bemessung noch Anpassungen notwendig sind, insbesondere gilt dies für BSH-tragwerke.

Die auftretenden Ausreißer bei den Stahltragwerken mit hoher Sekundärspannweite lassen darauf schließen, dass alternative Sekundärtragsysteme wie zum Beispiel unterspannte Stahlträger zur Verfügung gestellt werden sollten. Ein Mechanismus mit dem Ziel des „Filterns“ solcher unplausibler Varianten wird nicht angestrebt, da diese ohnehin aufgrund der hohen zu erwartenden Rohbaukosten für die Variantenstudie nicht relevant sind.

### 7.4.2 Qualitative Analyse der evaluierten Flexibilitätskriterien

Die 162 Vorentwurfsvarianten, welche während der Variantenstudie mittels dem PARAT generiert werden, bieten eine Grundlage für eine qualitative Analyse der formulierten Flexibilitätskriterien. Diese qualitative Analyse gliedert sich in zwei Schritte. Zunächst wird für jedes der 4 Objectives der Ergebnisraum analysiert, welcher bei der Variantenstudie kalkuliert wird. Anschließend werden die gemittelten Kostenauswirkungen der einzelnen Objectives aufgezeigt. Hiermit soll dargestellt werden, wie sich die einzelnen Flexibilitätskriterien in Abhängigkeit der generierten Vorentwurfsvarianten verhalten. Im untenstehenden Histogramm ist die absolute Häufigkeit von Bewertungen in einer bestimmten Werteklasse ersichtlich.

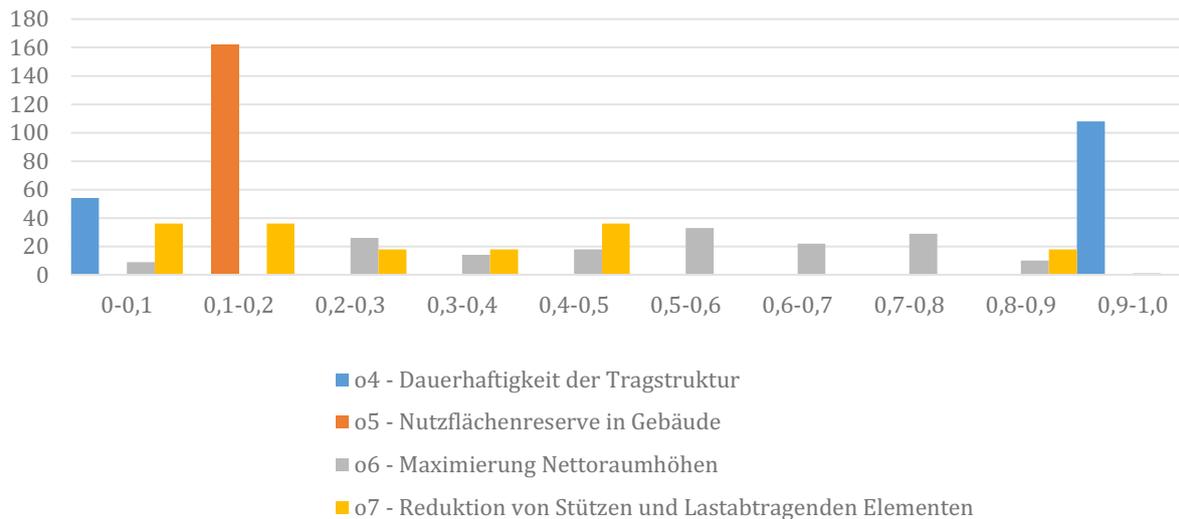


Abbildung 7.4: Histogramm mit den absoluten Häufigkeiten der einzelnen Bewertungen, eingeteilt in 10%-Klassen. Der Ergebnisraum der einzelnen Objectives ist hier klar ersichtlich.

Objective 4 ist in Abhängigkeit der definierten Lastreserve determiniert und weist somit keinen Streubereich auf. Auch Objective 5 ist durch die Aufgabenstellung determiniert, da alle Entwürfe als Eingangsgröße eine definierte Hallengröße und ein definiertes Groblayout aufweisen. Die Objectives 6 und 7 hingegen weisen einen größeren Streubereich auf,

- Objective **o<sub>4</sub>** – Dauerhaftigkeit der Tragstruktur

Im Rahmen der Variantenstudie wurden 108 Vorentwurfsvarianten erstellt, bei welchen eine Lastreserve von  $F_{RT}=1,0$  kN/m<sup>2</sup> angesetzt wird. Für jene Varianten ist **o<sub>4</sub>=1,0** determiniert. Zusätzlich werden 54 Varianten erstellt, bei welchen keine Lastreserve angesetzt wird, was eine Bewertung von **o<sub>4</sub>=0,0** bedingt. Dieser eingeschränkte Ergebnisraum bedingt eine starke Abhängigkeit der Gesamtbewertung von der definierten Lastreserve. In folgender Abbildung ist der Einfluss der angesetzten Lastreserve auf die finale Flexibilitätsbewertung dargestellt. Im Mittel wird das Flexibilitätsrating der Vorentwurfsvarianten um 23,5% besser, wenn eine Lastreserve von  $F_{RT}=1,0$  angesetzt wird. Dieser Verbesserung des Flexibilitätsratings steht eine Erhöhung der Kosten gegenüber, da die erhöhten Lastanforderungen zu vergrößerten Querschnitten der einzelnen Tragwerkelemente führen. Die Abbildung auf der folgenden Seite zeigt den Vergleich jener Vorentwürfe, welche eingespannte Stützen, aber eine unterschiedliche Lastreserve  $F_{RT}$  aufweisen. Im Mittel erhöhen sich die kalkulierten Kosten der Haupttragelemente um 15%, wenn eine solche Lasterhöhung vorgenommen wird. Insbesondere die BSH-Systemkombinationen weisen eine starke Erhöhung der Kosten in Abhängigkeit der angesetzten Lastreserve auf. Es ist allerdings anzumerken, dass die Auswirkungen der zusätzlichen Belastung stark davon abhängen, welche Lasten nutzungsbedingt bereits auf das Tragwerk aufgebracht werden. In jedem Fall sollte die Größenordnung der angesetzten Lastreserve an diese Nutzlasten angepasst werden.

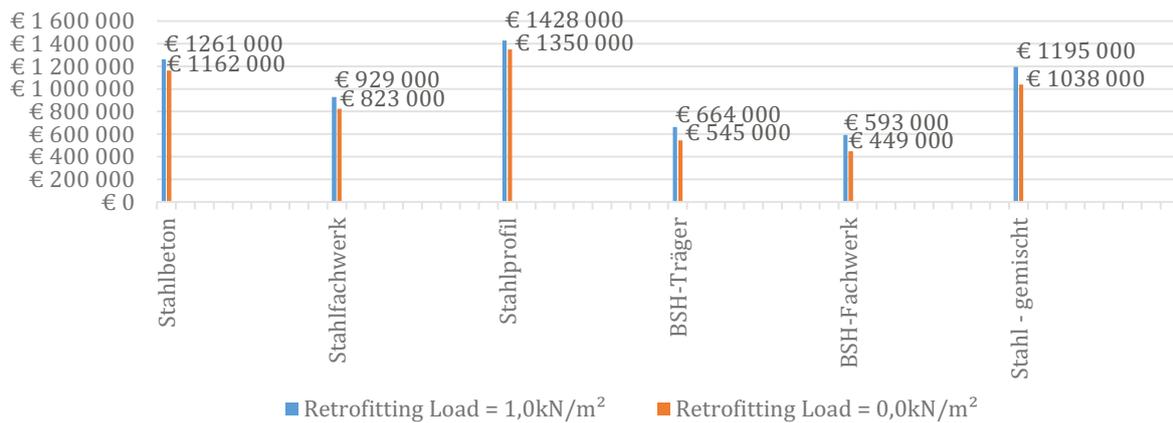


Abbildung 7.5: Die mittleren Kosten der Varianten  $F_{RT}=1,0\text{kN/m}^2$  sowie  $F_{RT}=0,0\text{kN/m}^2$ . Die mittlere Kostensteigerung beträgt ca. 15%.

- Objective  $o_5$  – Nutzflächenreserve im Gebäude

Objective 5 ist bei vorliegender Variantenstudie determiniert. Im Falle einer Vergrößerung der Halle würde proportional hierzu eine Kostensteigerung stattfinden. Aufgrund dieser Proportionalität werden keine zusätzlichen Untersuchungen durchgeführt.

- Objective  $o_6$  – Maximierung der Nettoraumhöhen

Ziel ist die Maximierung der zur Verfügung stehenden Nettoraumhöhe unter Einhaltung der maximalen Tragwerksoberkante von 9,9m. Die erforderliche Mindest-Nettoraumhöhe von 6,5m führt zu einer theoretisch maximalen Höhenreserve von 3,4m. Im Mittel weisen die Stahlprofilkonstruktionen mit einer Tragwerkshöhe von 78cm das beste Ergebnis auf. Dies entspricht einer Bewertung von 0,77 in Objective 4 wie in untenstehender Abbildung ersichtlich. Wenig überraschend weisen Fachwerkstrukturen aufgrund der großen Trägerhöhen die schlechteste Bewertung auf.

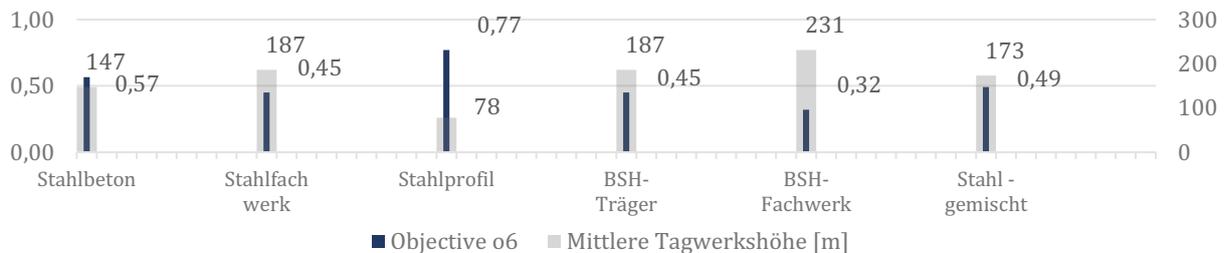


Abbildung 7.6: Mittlere Bewertung  $o_6$  der einzelnen Strukturtyp-Kombinationen und die damit korrespondierenden Tragwerkshöhen

Aufgrund des großen Spielraumes hinsichtlich der Kosten der einzelnen Raster- und Strukturtyp-Kombinationen kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den kalkulierten Kosten und Objective 6 nachgewiesen werden.

- Objective  $o_7$  – Reduktion von Stützen und lastabtragenden Elementen

Die Rasterkombinationen 1-9 liefern die Eingangsgrößen für die Berechnung von Objective 7. Mittels der automatisierten Vordimensionierung während der parametrischen Tragwerksberechnung können die Auswirkungen dieser Rasterkombinationen auf die Kosten und Flexibilität in Abhängigkeit evaluiert werden.

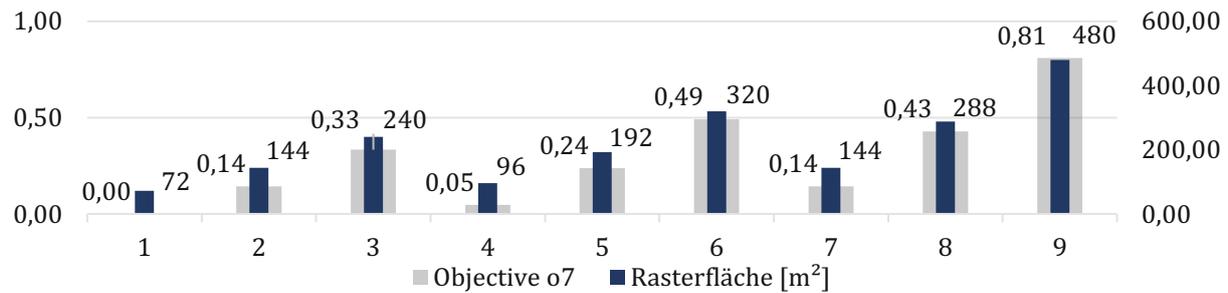


Abbildung 7.7: Objective 7 der untersuchten Rasterkombinationen und deren Rasterfläche. Der quadratische Zusammenhang zwischen Rasterfläche und der Bewertung ist erkennbar.

Rasterkombination 9 weist mit einer Bewertung von 0,81 die beste Bewertung auf. Bei der Auswertung der Varianten zeigt sich wie erwartet ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den kalkulierten Kosten und der Bewertung von Objective 7. Dieser Zusammenhang ist in folgender Abbildung klar ersichtlich.

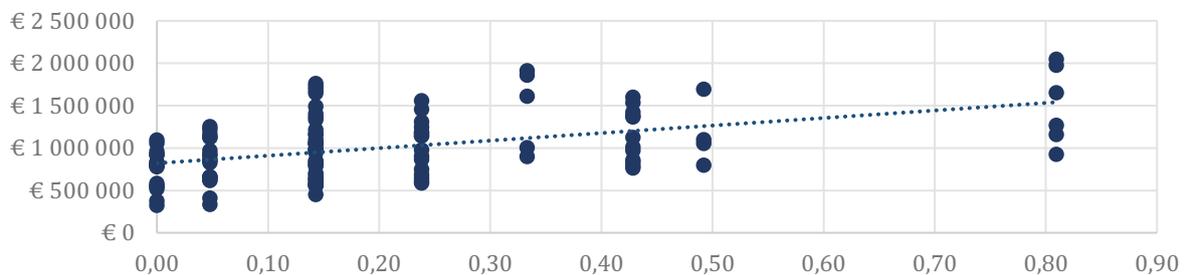


Abbildung 7.8: Veranschaulichung des Kosteneinflusses von Objective 7. Jede berechnete Vorentwurfsvariante wird durch einen Punkt veranschaulicht und mittels einer Trendlinie der Zusammenhang zwischen kalkulierten Kosten und Objective 7 veranschaulicht.

Die qualitative Analyse der Vorentwurfsvarianten hat gezeigt, dass die Flexibilitätskriterien die erwarteten Ergebnisse in Abhängigkeit der geometrischen Parameter und Tragwerksparameter liefern.

#### 7.4.3 Vergleichsberechnung mittel FE-Statiksoftware

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse der stabstatischen Berechnung und Dimensionierung in Karamba3D wird eine Kontrollberechnung mittels der Finite-Elemente-Berechnungssoftware DLUBAL RFEM durchgeführt. Untersucht werden die beiden Varianten SF 9-1 sowie TG 2-1. Die Auswahl fällt auf diese Systeme, da bei jenen die besten Ergebnisse innerhalb der Variantenstudie erreicht werden. Zusätzlich wird somit der verwendete Optimierungsalgorithmus „OptimizeCrossSection“ von Karamba3D überprüft. Für die Vordimensionierung der Stahlbetonträger wird keine Überprüfung durchgeführt, da jene ohnehin mittels der vorkalkulierten Tragmomente dimensioniert wurden. Die untersuchten Entwürfe wiesen folgende Parameter auf:

Tabelle 7.4: Parameter und Lastangaben der Varianten für die Vergleichsberechnung

	SF 9-1	TG 2-1
Primärachsraster (x-)	24	12
Primärraster Felder	2	4
Sekundärachsraster (y-)	20	12
Sekundärraster Felder	6	10
Strukturtyp Primär	Stahlfachwerk	BSH-Träger
Strukturtyp Sekundär	Stahlfachwerk	BSH-Träger
<b>Lastaufstellung</b>		
	<b>Lastangaben</b>	<b>Aufgebracht via</b>
Lastfall 1 - Eigengewicht	Wichte Material	Nativ in Modell
Lastfall 2 - Dachaufbau	2,4 kN/m <sup>2</sup>	Linienlast Sekundärsystem
Lastfall 3 - Schneelast	0,8 kN/m <sup>2</sup>	Linienlast Sekundärsystem
Lastfall 4 - Nutzlast	0,5-1,0 kN/m <sup>2</sup>	Linienlast Sekundärsystem
Lastfall 5 - Reserve F <sub>RT</sub>	1,0 kN/m <sup>2</sup>	Linienlast Sekundärsystem
<b>Bemessungskombination</b>		
GZT	1,35*LF1+1,35*LF2+1,50*0,50*LF3+1,50*LF4+1,50*LF5	
GZG - charakteristisch	1,00*LF1+1,00*LF2+0,50*LF3+1,00*LF4+1,50*LF5	
<b>Berechnungsparameter</b>		
DLUBAL RFEM	Stabtheorie 1. Ordnung – linear-elastisch	
Karamba3D	Stabtheorie 1. Ordnung – linear-elastische	
<b>Bemessungsvorschrift</b>		
DLUBAL RFEM	ÖNORM EN 1993-1:2007	ÖNORM EN 1995-1-1:2015
Karamba3D	ÖNORM EN 1993	Spannungs-Basierte Vorbemessung

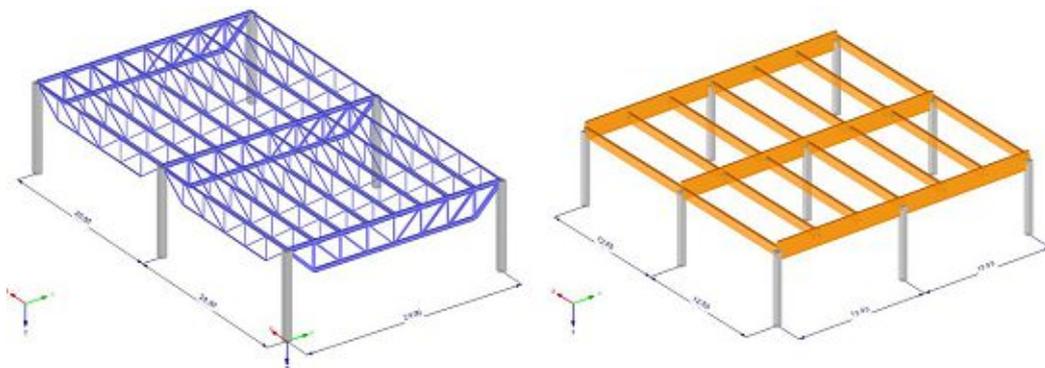


Abbildung 7.9: Statische Modelle der Vergleichsmodelle in DLUBAL RFEM, links SF 9-1, rechts TG 2-1

Die Abbildung der vorangehenden Seite zeigt die beiden Berechnungsmodelle, welche in DLUBAL RFEM erstellt werden. Hierfür werden jeweils zwei Sekundärfelder mit der halben Hallenbreite von 24m modelliert. Die Stahlfachwerke der Entwurfsvariante SF 9-1 werden in primärer und sekundärer Richtung als Einfeldträger modelliert. Die Sekundärträger der Variante TG 2-1 sind ebenfalls Einfeldträger, wohingegen die Primärträger als Zweifeldträger mit 24m Spannweite konzipiert werden. Im Anschluss werden die Berechnungsergebnisse für den Grenz-zustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dargestellt und diskutiert.

Tabelle 7.5: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung GZT – SF 9-1

Primärsystem						
	Querschnitt	$N_{Ed}$ - RFEM	$\eta$ - RFEM	$N_{Ed}$ - Karamba3D	$\eta$ - Karamba3D	$\eta$ -Abw.
Obergurt	HEA450	-3347kN	0,88	-3463kN	0,97	+9%
Untergurt	HEA400	3177kN	0,85	3258kN	0,90	+5%
Pfosten 1	HEA260	-1443kN	0,83	-1475kN	0,99	+16%
Pfosten 2	HEA200	-1037kN	0,70	-1086kN	0,85	+15%
Pfosten 3	HEA180	-632kN	0,83	-676kN	0,90	+7%
Pfosten 4	HEA160	-419kN	0,69	-475kN	0,80	+11%
Diagonale 1	HEA400	2052kN	0,55	2095kN	0,56	+1%
Diagonale 2	HEA240	1477kN	0,82	1546kN	0,86	+4%
Diagonale 3	HEA220	904kN	0,60	966kN	0,63	+3%
Diagonale 4	HEA160	333kN	0,36	357kN	0,39	+3%
Sekundärsystem						
	Querschnitt	$N_{Ed}$ - RFEM	$\eta$ - RFEM	$N_{Ed}$ - Karamba3D	$\eta$ - Karamba3D	$\eta$ -Abw.
Obergurt	HEA180	-436kN	0,99	-431kN	0,97	-2%
Untergurt	HEA100	387kN	0,79	397kN	0,82	+3%
Pfosten 1	HEA120	-180kN	0,50	-189kN	0,40	-10%
Pfosten 2	HEA100	-108kN	0,43	-107kN	0,39	-4%
Diagonale 1	HEA100	303kN	0,62	314kN	0,69	+7%

Die Berechnung im Grenzzustand der Tragfähigkeit hat gezeigt, dass für die Stahlfachwerkkonstruktion die Schnittgrößenberechnungen der beiden Modelle, bis auf eine vernachlässigbare Abweichung unter 5%, vergleichbare Ergebnisse liefert. Die Berechnung im PARAT mittels Karamba3D liefert hier in der Regel geringfügig höhere Schnittgrößen als die Berechnung in RFEM.

Bei der Dimensionierung von rein zugbeanspruchten Bauteilen erfolgt die Dimensionierung ausschließlich über einen Vergleich der Bemessungsnormalkraft mit der plastischen Normalkraft des Stahlquerschnitts. Diese Nachweisführung erfolgt in beiden Programmen analog, wodurch sich die Abweichungen im evaluierten Ausnutzungsgrad rein durch die Abweichung in der Bemessungsnormalkraft ergeben.

Bei druckbelasteten Bauteilen hingegen wird ein Biegeknicknachweis geführt, wodurch der resultierende Bemessungswiderstand stark von der Berechnungs-Annahme zur Knicklänge abhängt. Die Bemessungsergebnisse der beiden statischen Berechnungen unterscheiden sich hier etwas, wobei beobachtet werden kann, dass die Berechnungs-Annahmen von Karamba3D eher eine Annahme auf der sicheren Seite darstellen. Dennoch sollte für eine treffsichere Bemessung die Knicklänge für die einzelnen Elemente in PARAT angegeben werden. Karamba3D sieht diese Möglichkeit bei der Definition der einzelnen Elemente vor. Es ist festzuhalten, dass die in PARAT durchgeführte Querschnittsauswahl eine Vordimensionierung darstellt, welche im Vergleich zur detaillierten FE-Berechnung mittels DLUBAL RFEM die Querschnitte auf der sicheren Seite dimensioniert.

Tabelle 7.6: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung GZG – SF 9-1

		Primärsystem				
	l/200	u <sub>z</sub> - RFEM	η - RFEM	u <sub>z</sub> - Karamba3D	η - Karamba3D	η-Abw.
Spannweite 24m	12cm	4,4cm	0,45	7,8cm	0,65	+22%
		Sekundärsystem				
	l/200	u <sub>z</sub> - RFEM	η - RFEM	u <sub>z</sub> - Karamba3D	η - Karamba3D	η-Abw.
Spannweite 20m	10cm	5,7cm	0,57	4,2cm	0,42	-17%

Die Berechnung der elastischen Verformung unter charakteristischer Lastkombination hat gezeigt, dass die berechneten Verformungen der Systeme zwar eine ähnliche Größenordnung aufweisen, dennoch allerdings um etwa 20% voneinander abweichen. Es ist allerdings zu bemerken, dass die Grenzverformung von l/200 sowohl in Primär- als auch in Sekundärriichtung eingehalten wird. Um der dennoch bestehenden Unsicherheit entgegenzuwirken wird empfohlen, auf der sicheren Seite strengere Grenzwerte für die Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit festzulegen.

Im Falle der BSH-Trägerkonstruktion ist ebenfalls zu beobachten, dass die Schnittgrößenberechnungen beider FE-Programme vergleichbare Ergebnisse mit einer Schwankungsbreite von ca. 5% liefern. Für den Primärträger werden 2 maßgebliche Bemessungsquerschnitte definiert; einerseits die Stelle des maximalen Feldmoments, andererseits der Querschnitt im Stützbereich mit kombinierter Querkraft- und Momenten-Belastung.

Tabelle 7.7: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung – TG 2-1

		Primärsystem				
	Querschnitt	M <sub>Ed</sub> /V <sub>Ed</sub> - RFEM	η - RFEM	M <sub>Ed</sub> /V <sub>Ed</sub> - Karamba3D	η - Karamba3D	η-Abw.
Feldmitte M	160/22cm	878kNm	0,49	905kNm	0,72	+23%
Auflager M	160/22cm	-1200kNm	0,66	-1145kNm	0,89	+23%
Auflager V	160/22cm	438kN	1,08	426kN	Kein Nachweis	-
		Sekundärsystem				
	Querschnitt	M <sub>Ed</sub> /V <sub>Ed</sub> - RFEM	η - RFEM	M <sub>Ed</sub> /V <sub>Ed</sub> - Karamba3D	η - Karamba3D	η-Abw.
Feldmitte M	80/30cm	522kNm	0,80	549kNm	0,95	+15%
Auflager V	80/30cm	165kN	0,60	165kN	Kein Nachweis	-

Im Falle reiner Momenten-Beanspruchung liefert der spannungsbasierte Vordimensionierungsansatz in Karamba3D Ergebnisse auf der sicheren Seite im Vergleich zur detaillierteren Nachweisführung in DLUBAL RFEM. Die mittlere Abweichung des Ausnutzungsgrades beträgt in etwa 20%. Bei der Betrachtung des Stützbereiches des Trägers zeigt sich allerdings rasch der Nachteil einer Vordimensionierung, welche rein auf der Biegetragfähigkeit des Querschnitts aufbaut. Die hohen Querkräfte führen zu einem Schubversagen des Primärträgers. Dies zeigt, dass bei der Vordimensionierung von Durchlaufsystemen eine Überprüfung des maximalen Schubwiderstandes zwingend erforderlich ist. Alternative kann auf Durchlaufsysteme verzichtet werden.

Im Falle eines Einfeldträgers, wie er im Sekundärsystem vorliegt, ist der Biegenachweis in Feldmitte für Rechteckbalken maßgebend. Dies zeigt auch der, im Vergleich zum Biegenachweis, niedrige Ausnutzungsgrad von 60% beim Nachweis der Schubtragfähigkeit.

Tabelle 7.8: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung GZG – TG 2-1

		Primärsystem				
	l/200	u <sub>z</sub> - RFEM	η - RFEM	u <sub>z</sub> - Karamba3D	η - Karamba3D	η-Abw.
Spannweite 12m	6cm	1,52cm	0,25	2,1cm	0,35	+10%
		Sekundärsystem				
	l/200	u <sub>z</sub> - RFEM	η - RFEM	u <sub>z</sub> - Karamba3D	η - Karamba3D	η-Abw.
Spannweite 12m	6cm	3,96cm	0,66	3,4cm	0,56	-10%

Auch die elastischen Verformungsberechnungen des Vorentwurfs TG 2-1 weisen Unterschiede auf. Die Ausnutzungsgrade relativ zur Grenzverformung von l/200 unter charakteristischer Lastkombination differieren um bis zu 10%. Es ist allerdings wiederum zu bemerken, dass die Grenzverformung von l/200 sowohl in Primär-, als auch in Sekundärrichtung eingehalten wird.

Zusammenfassend hat die statische Vergleichsberechnung ergeben, dass die vordimensionierten Querschnitte unter Voraussetzung definierter Randbedingungen plausibel sind. Insbesondere die Schnittgrößenberechnung liefert Ergebnisse, welche durchaus mit einer detaillierten FE-Berechnung vergleichbar sind. Folgende Randbedingungen werden auf Basis der Vergleichsberechnung definiert:

- Für Durchlaufsysteme in BSH- oder Stahlbetonbauweise ist in der Regel keine rein Momenten-basierte Vordimensionierung ausreichend. Bei solchen Systemen sollten zusätzlich die Querkraftwiderstände in einer Nachlaufberechnung überprüft werden. Bis diese Berechnung in der Vordimensionierung implementiert ist, sollte die Anwendung des PARAT auf Einfeld-Systeme beschränkt werden.
- Die bestehende Unsicherheit von in etwa  $\pm 10\%$  bei den berechneten Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sollte durch strengere Grenzwerte (z.B. Grenzwert l/250) kompensiert werden. Zusätzlich sollte eine genauere Untersuchung zu den kalkulierten elastischen Verformungen in Karamba3D durchgeführt werden.

## 8 Diskussion und Schlussfolgerung

### 8.1 Resümee

Es ist höchste Zeit für die Entwicklung innovativer und integraler Planungswerkzeuge, welche den zunehmend hohen Anforderungen einer ganzheitlichen Planung in frühen Projektphasen gewachsen sind. Wie in der Literaturrecherche gezeigt, wird dieser Forschungsbedarf zunehmend erkannt, und es werden verschiedene Forschungsansätze getroffen, um die Planung flexiblerer Gebäude zu erleichtern. Diese Forschungsansätze sind allerdings oftmals normativer und deklarativer Natur, und es konnte nur ein vergleichbares Forschungsprojekt analysiert werden, welches die automatisierte Bewertung von Flexibilitätskriterien anhand parametrischer Entwürfe anstrebt. Dieses beschränkt sich allerdings auf den Wohnbau. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Tool bietet nun eine vergleichbare Grundlage für den Industriebau.

Die umfangreiche Use-Case Analyse führt zu einer praxisgerechten Auswahl der relevanten Entwurfsparameter moderner Industriebauten. Relevante Tragwerkselemente wurden analysiert und die geometrischen Parameter sowie tragwerksspezifischen Parameter dargelegt.

Wie gezeigt bieten moderne Softwareanwendungen und die laufende Erhöhung der zur Verfügung stehenden Rechenleistung ungeahnte Möglichkeiten für einen integralen und transparenten Planungsprozess. Durch die Entwicklung des Frameworks für die parametrische Tragwerksanalyse und die anschließende Umsetzung in Grasshopper und Karamba3D wird gezeigt, wie durch diese innovative Softwareanwendung eine zusätzliche Entscheidungsgrundlage für Planende geschaffen werden kann. Natürlich kann dennoch nicht der Anspruch erfüllt werden, alle erdenklichen Variationen von Tragwerkssystemen und Gebäude-Geometrien modellierbar zu machen. Allerdings wird einerseits eine Grundlage für die Analyse von Teilbereichen geschaffen und andererseits kann das Skript mehrmals für einzelne Gebäudeteile angewendet werden, wodurch auch komplexe Grundrisse untersucht werden können.

Die Variantenstudie zeigt, dass eine plausible Vordimensionierung und Bewertung zahlreicher Vorentwurfsvarianten in kurzer Zeit möglich ist und so gezielt, Tragwerke für eine detailliertere Untersuchung ausgewählt werden können. Es kann transparent dargelegt werden, mit welchen Kosten und Nutzen eine Erhöhung der Flexibilität entsprechend der formulierten Kriterien erzielt werden kann. Eine Optimierung von Tragwerken entsprechend ihrer Flexibilität ist somit einfach und rasch möglich, wodurch ein faktischer Gegenpol zur oftmals stark kostenorientierten Entscheidungsfindung im Entwurfsprozess geschaffen wird. Durch die Möglichkeit, nahezu unendlich viele verschiedene Tragwerkskombinationen und Hallen-Geometrien im Rahmen einer Variantenstudie zu untersuchen, kann sichergestellt werden, dass während eines zeitlich stark begrenzten Vorentwurfsprozesses das höchste Maß an Flexibilität bei gleichbleibenden Kosten erzielt werden kann.

Mittels der bereits existierenden Schnittstellen zwischen Grasshopper und diverser FE-Berechnungsprogramme kann zusätzlich rasch die Grundlage für eine weiterführende Statik geschaffen werden.

Ziel der Arbeit soll es allerdings keinesfalls sein, die Tragwerksplanung aus der frühen Planungsphase zu exkludieren, im Gegenteil. Vielmehr soll ein Werkzeug für die Tragwerksplanung geschaffen werden, um fundierte und aussagekräftige Variantenstudien anzufertigen und somit in kurzer Zeit den größten Planungsmehrwert für die Bauherrenschaft zu generieren. Eine treffsichere Auswahl der Tragwerkparameter und die plausible Formulierung des Modellierungsraumes in Abhängigkeit der projektspezifischen Rahmendbedingungen ist ohnedies nur auf Basis der Einschätzung der Tragwerksplanung möglich.

## 8.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Abschließend werden die beiden formulierten Forschungsfragen analysiert und beantwortet.

### 8.2.1 Forschungsfrage 1:

*Welche Parameter und Abhängigkeiten müssen für die Planung flexibler Tragwerkssysteme im Industriebau berücksichtigt werden?*

Im Rahmen der State of the Art – Analyse wurden tragwerksspezifische und geometrische Parameter definiert und deren mögliche Ausprägungen analysiert.

Tabelle 8.1: Geometrische Parameter

Kategorie	Parameter	Beschreibung
Geometrische Parameter	Raster Primär [m]	Primärrastermaße
	Felder Primär [Stk]	Primärrasterfeldanzahl
	Raster Sekundär [m]	Sekundärrastermaße
	Felder Sekundär [Stk]	Sekundärrasterfeldanzahl
	Bruttofläche [m <sup>2</sup> ]	Bruttofläche der Halle berechnet aus Achsraster
	Lichte Raumhöhe [m]	Lichte, nutzbare Raumhöhe unterhalb der Tragkonstruktion
	Konstruktionshöhe [m]	Konstruktionshöhe von UK Tragwerk bis OK Dachaufbau
	Tragwerkshöhe [m]	Gesamte Tragwerkshöhe Primär, Sekundär, Tertiär
	Gebäudehöhe gesamt [m]	Gesamtgebäudehöhe (OK Dachaufbau, nicht Traufe oder Attika), bei Satteldächer Firsthöhe

Tabelle 8.2: Tragwerksspezifische Parameter der untersuchten Tragwerkselemente

Kategorie	Parameter	Ausprägungen (Auszug)
Struktur	Strukturtyp	Fachwerk, Profilträger, etc.
	Strukturtyp Detail	Ständerfachwerk, FT I-Träger, etc.
Materialität	Material	Vollholz, Brettschichtholz, Stahlbeton, Stahl
	Materialgüte	C50/60, GL24h, S235, etc.
Querschnitt	Querschnitt*	HEA 140, 180/28cm, etc.
	Querschnitt Untergurt	Bei Fachwerkträger, od. Unterspannung
	Querschnitt Pfosten	Bei Fachwerkträger, od. Unterspannung
	Querschnitt Diagonale	Bei Fachwerkträger, od. Unterspannung
Geometrie	Spannweite	6-35m
	Einflussbreite	1,25-24,4m
	Trägerhöhe	15-400cm

Zusätzlich wurden Flexibilitätskriterien anhand eine Literaturrecherche definiert und ein Berechnungsalgorithmus zur Evaluierung dieser Objectives entwickelt.

Tabelle 8.3: Flexibilitätsparameter (Objectives) einer Gebäudestruktur

Ziel	Bezeichnung	Objective	Indikator	Evaluierung
Flexibilität	04	Dauerhaftigkeit der Tragstruktur	Zusätzliche Tragreserve bei Planung	Last $F_{RT}$
	05	Nutzflächenreserve in Gebäude	Ungenutzte Gebäudefläche	Prozentuell
	06	Maximierung Netto-raumhöhen	Ungenutzte Netto-raumhöhe	Längenbasiert
	07	Reduktion von Stützen und Lastabtragenden Elementen	Achsraaster	Prozentuell

### 8.2.2 Forschungsfrage 2

*Wie kann eine flexible und integrale Tragwerksplanung und -analyse unter Anwendung von digitalen, parametrischen Tools ermöglicht werden?*

Durch die Implementierung von Informationen der Produktions- und TGA-Planung (Groblayoutplan und auftretende TGA-Lasten in Abhängigkeit der Nutzung) wird bereits von Beginn des parametrischen Planungsprozesses an eine integrale Planung gefördert und unterstützt. Diese native Berücksichtigung von maßgeblichen Abhängigkeiten unterschiedlicher Fachbereiche ist ein entscheidender Vorteil digitaler, parametrischer Planungstools. Entscheidender Schritt bei der Implementierung von parametrischen Planungstools für die Tragwerksplanung ist die kritische Definition des zugrundeliegenden Berechnungsablaufs. In dieser Forschungsarbeit werden hierfür zunächst jene Abhängigkeiten in graphischer Form dargestellt, welche innerhalb des parametrischen Berechnungsablaufs berücksichtigt werden sollen. Die Abhängigkeiten und der definierte Modellierungsraum sind in Abbildung 4.19 ersichtlich.

Weiters ist eine grundlegende Auseinandersetzung mit dem angedachten Planungsprozess erforderlich. Zu diesem Zweck wird ein Framework entwickelt, welches die Arbeit mit dem PARAT in der frühen Planungsphase definiert. Das definierte Framework ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird die Berechnungslogik des parametrischen Tragwerkskripts aufgebaut.

Entscheidend für die Vordimensionierung entscheidender Tragwerkelemente sind treffsichere Bemessungsalgorithmen, welche in Abhängigkeit des gewählten Materials und des Strukturtyps rasche und plausible Querschnittsdimensionen auswählen. Zu diesem Zweck werden die in Karamba3D verwendeten Optimierungsalgorithmen verwendet, sowie eigens iterative Vordimensionierungsalgorithmen entwickelt.

### 8.3 Zukunftsausblick

Aufbauend auf der Element-basierten Plattform des PARAT können beliebig zusätzliche Tragwerkselemente in die Berechnung inkludiert werden. Maßgebliche Tragwerksteile, auf deren Modellierung bislang verzichtet wurde, sind die Fundierung sowie die Konstruktion der Bodenplatte. Beide stellen allerdings große Kostenpositionen dar, und gerade die Auswahl eines Fundierungskonzepts ist ein iterativer Prozess, welcher vom Einsatz parametrischer Berechnungstools stark profitieren würde. Bei Bekanntsein des Baugrundes kann in einfacher Form in Abhängigkeit der Ablastung eine Gründung vordimensioniert werden. Dies würde einen großen Schritt hin zu einem ganzheitlichen Vorentwurf bedingen. Analog gilt dies für die Auswahl einer geeigneten Bodenplatte. Im Industriebau ist deren Stärke maßgeblich von den auftretenden Einzellasten des Produktionsprozesses abhängig. Die hierfür notwendigen Informationen lassen sich simpel mittels der implementierten Schnittstelle zur Groblayoutplanung übertragen.

In weiterer Folge wird das entwickelte PARAT in die digitale Plattform des Forschungsprojektes BIM\_Flexi integriert, wo insbesondere die Kopplung an VR-Softwareanwendungen und BIM-Softwareanwendungen implementiert wird. Es ist geplant, die Flexibilitätskriterien zu erweitern und auch LCA-Berechnungen in die Vorentwurfsanalyse zu integrieren, analog dem hier vorgestellten Entwurf zur Kostenkalkulation der Tragwerkselemente. So kann eine umfassende Grundlage für einen multi-kriteriellen Optimierungsalgorithmus geschaffen werden, welcher direkt auf die Ergebnisse des PARAT zugreift.

## Literaturverzeichnis

1. **Z. Nadoushani, A. Akbarnezhad.** Effects of structural systems on the life cycle carbon footprint of buildings. *Energy and Buildings*. 2015, 102.
2. **P. Wiendahl, J. Reichardt, P. Nyhuis.** *Handbuch Fabrikplanung : Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München : Carl Hanser Verlag, 2014.
3. *Flexible buildings for an adaptable and sustainable future.* **J. Goslings, et al.** s.l. : Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2008, 2008.
4. **Slaughter, E.S.** Design strategies to increase building flexibility. *Building Research & Information*. 2001, 29.
5. *Framework proposal for a bim-based digital platform for flexible design and optimization of industrial buildings for industry 4.0.* **J. Reisinger, I. Kovacic, H. Kaufmann, P. Kán, I. Podkosova.** São Paulo : 37th CIB W78 Information Technology for Construction Conference (CIB W78), 2020.
6. **S.K. Albers, U. Konradt, A. Walter, J. Wolf.** *Methodik der empirischen Forschung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2009.
7. **Obergrießer, M.** *Digitale Werkzeuge zur integrierten Infrastrukturbauwerksplanung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017.
8. **C. Preisinger, M. Heimrath.** Karamba—A Toolkit for Parametric Structural Design. *Structural Engineering International*. 2014, Bd. 24, 2.
9. **F. Shadram, T.D. Johansson, W. Lu, J. Schade, T. Olofsson.** An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy. *Energy and Buildings*. 2016.
10. **I. Sartori, A.G. Hestnes.** Energy use in the life cycle of conventional and. *Energy and Building*. 2007, 39.
11. **L. Gustavsson, A. Joelsson.** Life cycle primary energy analysis of residential. *Energy and Buildings*. 2010, 42.
12. **J.-T. San-José Lombera, I. Garrucho Aprea.** A system approach to the environmental analysis of industrial buildings. *Building and Environment*. 2010, 45.
13. *Design strategies for low embodied energy and greenhouse gases in buildings: analyses of the IEA Annex 57 case studies.* **T. Malmqvist, H. Birgisdottir, H.W. Aoife, A. Moncaster, V. John, A. Passer.** s.l. : World Sustainable Building Conference, 2014.
14. **I. Kovacic, L. Waltenberegger, G. Goullis.** Tool for life cycle analysis of facade-systems for industrial buildings. *Journal of Cleaner Production*. 2016, 130.
15. **Graubner, C.A.** Nachhaltig Bauen mit Beton. *Der Stadtbaustein im im DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhaben*.
16. **J. Kwok Wai Wong, J. Zhou.** Enhancing environmental sustainability over building life cycles through. *Automation in Construction*. 2015, 57.

17. **B. Lee, N. Pourmousavian, J.L.M. Hensen.** Full-factorial design space exploration approach for multi-criteria decision making of the design of industrial halls. *Energy and* . 2016, 117.
18. *FLEX 4.0, a practical instrument to assess the adaptive capacity of buildings.* **Geraedts, R.** s.l. : SBE16 Tallinn and Helsinki Conference; Build Green and Renovate Deep, 2016.
19. **N. Israelsson, B. Hansson.** Factors influencing flexibility in. *Structural Survey*. 2009, 27.
20. **J. Reisinger, P. Hollinsky, I. Kovacic.** *Design Space Representation for Multi-Criteria Decision Making in* . Wien : Technische Universität Wien, 2020.
21. **J. Till, T. Schneider.** Flexible housing: the means to the end. *Archit. Res. Q.* 2005, 9.
22. **A.M.M. Hasan, A.A. Torky, Y.F. Rashed.** Geometrically accurate structural analysis models in BIM-centered software. *Automation in Construction*. 2019, 104.
23. **A. Rolvink, J. Breider, J. Coenders.** *Structural Components - a parametric associative design toolbox for conceptual structural design*. Valencia : Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2019.
24. **R. Sacks, R. Barak.** Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice. *Automation in Construction*. 4, 2008, 17.
25. **K. Shea, R. Aish, M. Gourtovaia.** Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction*. 2005, Bd. 2, 14.
26. **C. Cavalliere, G.R. Dell'Osso, F. Favia, M. Lovicario.** BIM-based assessment metrics for the functional flexibility of building designs. *Automation in Construction*. 2019, 107.
27. **C. Cavalliere, et al.** Life cycle assessment data structure for building information modelling. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 199.
28. **V. Rodrigues, A. Martins, M.I. Nunes, A. Quintas, T.M. Mata, N.S. Caetano.** LCA of constructing an industrial building: focus on embodied carbon and energy. *Energy Procedia*. 2018, 153.
29. **Franke, L.** *Baukonstruktion im Planungsprozess*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2002.
30. **Pawellek, G.** *Ganzheitliche Fabrikplanung*. Berlin : Springer Verlag, 2014.
31. **U. Bracht, D. Geckler, S. Wenzel.** *Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin : Springer Verlag, 2018.
32. **Thormark, C.** A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*. 2002, 37.
33. **M. Röck, et al.** LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*. 2018, 140.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Digitale Plattform BIM Flexi, rot hervorgehoben jene Teilbereiche, welche im Rahmen der Diplomarbeit erarbeitet werden (Grafik entnommen aus (5)) .....	2
Abbildung 2.1: Methodik und Arbeitsschritte .....	7
Abbildung 4.1: Mittelwerte der Primär- und Sekundärspannweiten gegliedert nach der Industriesparte .....	12
Abbildung 4.2: Mittelwerte, Minima und Maxima der Rastermaße .....	12
Abbildung 4.3: Histogramm der auftretenden Rastermaße.....	12
Abbildung 4.4: Lichte Raum- und Konstruktionshöhen gemittelt nach Sparten.....	13
Abbildung 4.5: Anzahl der Strukturtypen Sekundärsystem, inkl. deren Materialität.....	15
Abbildung 4.6: Anzahl der Strukturtypen Sekundärsystem nach Sparte.....	15
Abbildung 4.7: Mittlere Spannweite der Strukturtypen Sekundärsystem nach Materialität.....	15
Abbildung 4.8: Verbaute Laufmeter der einzelnen Strukturtypen Sekundärsystem sowie deren Anzahl innerhalb der Use-Cases (Raumfachwerk ausgenommen) .....	16
Abbildung 4.9: Definition der parametrischen Querschnittsgeometrie des Stahlbeton Fertigteil T-Trägers für das Sekundärsystem, die Höhe h repräsentiert die Nummer aus der Querschnittsgruppe (z.B. T50 -> h=50cm) .....	16
Abbildung 4.10: Anzahl der Strukturtypen Primärsystem, inkl. deren Materialität.....	17
Abbildung 4.11: Anzahl der Strukturtypen Primärsystem nach Sparte.....	17
Abbildung 4.12: Mittlere Spannweite der Strukturtypen Primärsystem nach Materialität.....	17
Abbildung 4.13: Verbaute Laufmeter der einzelnen Strukturtypen Primärsystem sowie deren Anzahl innerhalb der Use-Cases (Raumfachwerk ausgenommen) .....	18
Abbildung 4.14: Definition der parametrischen Querschnittsgeometrie des Stahlbeton Fertigteil T-Trägers für das Primärsystem, die Höhe h repräsentiert die Nummer aus der Querschnittsgruppe (z.B. T75 -> h=75cm) .....	18
Abbildung 4.15: Verbaute Laufmeter der einzelnen Strukturtypen Stützen sowie deren Anzahl innerhalb der Use-Cases.....	19
Abbildung 4.16: Anzahl der unterschiedlichen Stützenquerschnitte und eingesetzte Betongüte	19
Abbildung 4.17: Untersuchte Aussteifungssysteme für Dachtragwerke .....	20
Abbildung 4.18: Summierte Laufmeter der Fassadenunterkonstruktion nach Material .....	21
Abbildung 4.19: Darstellung des definierten Modellierungsraumes und dessen Abhängigkeiten	22
Abbildung 5.1: Framework – Arbeitsweise mit dem parametrischen Tragwerksskript PARAT ..	25
Abbildung 5.2: Definition berechnete Höhen im Gebäude .....	28
Abbildung 5.3: Beispielberechnung $o_7$ für 3 unterschiedliche Rastermaße, bei $A_{0pt}=288m^2$ .....	29
Abbildung 6.1: Grundlegender Aufbau des parametrischen Skripts inkl. Beschreibung der Teilbereiche.....	33
Abbildung 6.2: Importiertes Groblayout in Blockform – die Farben repräsentieren unterschiedliche Produktionsbereiche.....	34
Abbildung 6.3: Achsraster, Stützenfuß- und Stützenkopfpunkte des parametrischen Tragwerksmodells .....	36
Abbildung 6.4: Mesh zur Erstellung der Dachlast, zugehörige Sektion im PARAT .....	37
Abbildung 6.5: Nutzungsbereiche und daraus resultierende Abhängelast – die unterschiedlichen Lasten i.A. der Nutzungsbereiche sind klar erkennbar .....	37

Abbildung 6.6: Die zugrundeliegende Mesh ist farblich hervorgehoben – Die Lastgenerierung erfolgt auf Basis der Stützenkopf- und -fußpunkte der jeweils äußersten Stützenreihen (Auswahl mittels „Tree Branch“-Komponente in Grasshopper.).....	38
Abbildung 6.7: Formuliert Gelenksbedingungen im Falle einer Tragwerksstruktur aus Profilträgern (als Kreise um die lokale Trägerachse dargestellt) – die Momentenverläufe $M_y$ unter Eigengewicht zeigen die korrekte Umsetzung der Gelenksbedingungen in der statischen Berechnung .....	39
Abbildung 6.8: Übersicht über die Erstellung der Strukturelemente Primärsystem; die anderen Strukturelemente werden sinngemäß nach dem gleichen Schema erstellt .....	41
Abbildung 6.9: Generierung eines Elements am Beispiel des Strukturtyps Stahlprofil des Primärsystems .....	41
Abbildung 6.10: Anpassung des Fassadenrasters auf beliebige Werte ist möglich, das Standardmaß beträgt 6,0m x 6,0m.....	43
Abbildung 6.11: Berechnungsablauf dargestellt im Grasshopper GUI.....	44
Abbildung 6.12: Berechnete Tragmomente der FT-T-Trägerquerschnitte des Sekundärsystems	45
Abbildung 6.13: Berechnete Tragmomente der FT-T-Trägerquerschnitte des Sekundärsystems	45
Abbildung 6.14: Analytisches Berechnungsmodell in grün, physisches Modell inkl. der Querschnitte der Primär- und Sekundärträger in grau. ....	46
Abbildung 7.1: Der Proof of Concept wird anhand einer Variantenstudie für das Produktionsgebäude 2A der Use-Case Analyse durchgeführt. ....	48
Abbildung 7.2: Die jeweils günstigsten, sowie flexibelsten Rastkombinationen einer jeden Strukturtyp-Kombination .....	50
Abbildung 7.3: 3D-Visualisierung flexibelster (SF 9-1) und kostengünstigster (TG 1-1) Vorentwurf.....	51
Abbildung 7.4: Histogramm mit den absoluten Häufigkeiten der einzelnen Bewertungen, eingeteilt in 10%-Klassen. Der Ergebnisraum der einzelnen Objectives ist hier klar ersichtlich.	53
Abbildung 7.5: Die mittleren Kosten der Varianten $F_{RT}=1,0\text{kN/m}^2$ sowie $F_{RT}=0,0\text{kN/m}^2$ . Die mittlere Kostensteigerung beträgt ca. 15%.....	54
Abbildung 7.6: Mittlere Bewertung $o_6$ der einzelnen Strukturtyp-Kombinationen und die damit korrespondierenden Tragwerkshöhen .....	54
Abbildung 7.7: Objective 7 der untersuchten Rasterkombinationen und deren Rasterfläche. Der quadratische Zusammenhang zwischen Rasterfläche und der Bewertung ist erkennbar. ....	55
Abbildung 7.8: Veranschaulichung des Kosteneinflusses von Objective 7. Jede berechnete Vorentwurfsvariante wird durch einen Punkt veranschaulicht und mittels einer Trendlinie der Zusammenhang zwischen kalkulierten Kosten und Objective 7 veranschaulicht. ....	55
Abbildung 7.9: Statische Modelle der Vergleichsmodelle in DLUBAL RFEM, links SF 9-1, rechts TG 2-1 .....	56

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Untersuchte Use Cases nach Sparten.....	4
Tabelle 3.1: Kriterien für die Flexibilität eines Gebäudes .....	9
Tabelle 4.1: Geometrische Parameter .....	11
Tabelle 4.2: Geometrische Parameter .....	13
Tabelle 4.3: In der Use-Case Analyse untersuchte Tragwerkselemente, fett hervorgehoben sind jene, welche im Modellierungsraum berücksichtigt werden .....	14
Tabelle 4.4: Analytierte tragwerksspez. Parameter der untersuchten Tragwerkselemente.....	14
Tabelle 4.5: Modellierungsraum für das Element Sekundärsystem.....	16
Tabelle 4.6: Modellierungsraum für das Element Primärsystem .....	18
Tabelle 4.7: Modellierungsraum für das Element Primärsystem .....	19
Tabelle 4.8: Typische Aussteifungselemente im Industriebau .....	20
Tabelle 4.9: Modellierungsraum für das Element Fassadenunterkonstruktion.....	21
Tabelle 5.1: Kriterien für Flexibilität einer Gebäudestruktur .....	26
Tabelle 5.2: Kostenkennwerte für die vereinfachte Kostenberechnung (Netto) .....	27
Tabelle 5.3: Unterkategorien und Beschreibung der verwendeten Constraints .....	30
Tabelle 6.1: Berücksichtigte Materialkennwerte für BSH-Elemente.....	42
Tabelle 6.2: Bestandteile Ergebnisvektor für die Charakterisierung einer Vorentwurfsvariante	47
Tabelle 7.1: Untersuchte Rasterkombinationen .....	49
Tabelle 7.2: Untersuchte Strukturtyp-Kombination .....	49
Tabelle 7.3: Die flexibelsten Vorentwürfe der Variante $F_{RT}=1,0\text{kN/m}^2$ .....	51
Tabelle 7.4: Parameter und Lastangaben der Varianten für die Vergleichsberechnung .....	56
Tabelle 7.5: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung GZT – SF 9-1 .....	57
Tabelle 7.6: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung GZG – SF 9-1 .....	58
Tabelle 7.7: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung – TG 2-1 .....	58
Tabelle 7.8: Vergleich der Ergebnisse der statischen Berechnung GZG – TG 2-1.....	59
Tabelle 8.1: Geometrische Parameter .....	61
Tabelle 8.2: Tragwerksspezifische Parameter der untersuchten Tragwerkselemente .....	61
Tabelle 8.3: Flexibilitätsparameter (Objectives) einer Gebäudestruktur .....	62